

Politechnika Wrocławska

DZIEDZINA: inżynieryjno-techniczna

DYSCYPLINA: Architektura i Urbanistyka

ROZPRAWA DOKTORSKA

Kształtowanie Modeli Ruchu Nowoczesnych Systemów Strukturalnych z Wykorzystaniem Rozwiązań Architektury Responsywnej

mgr inż. arch. Szymon Jankowski

Promotor / Promotorzy:
dr hab. inż. Waldemar Bober, prof. PWr

Promotor pomocniczy:
dr inż. arch. Kajetan Sadowski

Słowa kluczowe: architektura responsywna, modele zachowań struktur, zmienność geometryczna, zmienność topologiczna,

WROCŁAW 2025

Spis treści

1. Wstęp....13
1.1 Efektywność w architekturze....13
1.2 Historia koncepcji i realizacji responsywności....14
1.2.1 Początkowe idee i koncepcje formujące Responsywność architektoniczną i strukturalną 14
1.2.2 Symulacje responsywności skali mikro....17
1.2.3 Systemy kontroli responsywności jako wynikowa rozwoju systemów oceny stanu obiektów 18
1.2.4 Krystalizacja nomenklatury architektury ruchomej....18
1.2.5 Wzrost kompleksowości badawczej, pierwsze struktury....19
1.3 Główne obecne kierunki badań responsywności strukturalnej....21
1.3.1 Elementy systemu ruchu w strukturze responsywnej....22
1.3.2 Modele zachowań struktur responsywnych....23
1.3.3 Fizyczne systemy pomiarowe....25
1.3.4 Bezpieczeństwo struktur ruchomych....27
1.3.5 Rodzaje obciążeń wywołujących reakcje w strukturach responsywnych 30
1.3.6 Symulacyjne metody badawcze....30
1.3.7 Realizacja ruchu w strukturach responsywnych....31
1.3.8 Struktura nośna modeli responsywnych....33
1.3.9 Sposoby ewaluacji energetycznej efektywności responsywności strukturalnej 34
1.3.1 Systemy badania środowiska....35
2. Cel, zakres i tezy pracy....36
2.1 Cel pracy....36
- *Systematyzacja pojęć i podejść do modelowania, kształtowania i realizacji architektury responsywnej wśród struktur reagujących na obciążenia zewnętrzne*....36
- *Przedstawienie i ewaluacja szeregu modeli zachowań opartych o zróżnicowane podejścia teoretyczne do kształtowania form przestrzennych dla różnych typów struktur*....36
- *Opracowanie i omówienie szeregu rozwiązań elementarnych dla fizycznych realizacji struktur responsywnych*....36
- *Przedstawienie wyników prac modelowych i koncepcyjnych w odniesieniu do aktualnych badań, tendencji badawczych i praktyk w realizacji struktur responsywnych* 36
2.2 Tezy pracy....36
1. Bazowanie modeli zachowań architektury responsywnej może opierać się o algorytm ewolucyjny pod warunkiem współwystępowania razem z modelami deterministycznymi sterowania ruchem....36
2. Algorytm ewolucyjny stosowany do doboru odpowiedzi na zmienne warunki obciążeń zewnętrznych pozwala na efektywne poszukiwanie tendencji i sposobów doboru geometrii, które następnie mogą zostać ujęte w predefiniowanych systemach sterowania strukturą 36

2.3 Zakres pracy....39
2.4 Stanowisko badawcze....40
3. Logika kształtowania modeli zachowań struktur responsywnych....42
3.1 Analiza istniejących modeli zachowań....42
3.1.1 Systemy badania środowiska....42
3.1.2 Złożoność obliczeniowa modeli wobec precyzji generowania odpowiedzi geometrycznych....44
3.1.3 Systemy realizacji i kontroli reakcji geometrycznych....44
3.1.4 Problematyka niezawodności oraz skalowania elementów wykonawczych w strukturach responsywnych....47
3.1.5 Sposoby ewaluacji efektywności i szacowanie nakładów dla struktur responsywnych....48
3.2 Kształtowanie koncepcji modelu zachowań....49
3.2.1 Koncepcja modułu głównego....49
3.2.2 Bezpieczne geometrie....52
3.2.3 Forma pełnego modelu zachowań struktury responsywnej....52
3.2.4 Zależność bezpieczeństwa pracy struktur responsywnych w zależności od stopnia nasycenia modeli zachowań....54
4. Podnoszenie efektywności modeli struktur dyskretnych w oparciu o sposób uzyskiwania stabilnych geometrii w wyniku analizy dynamicznych relaksacji....55
4.1 Wstęp....55
4.1.1 Podstawy teoretyczne metod poszukiwania form struktur membranowych 55
4.1.1.1 Struktury oparte o krzywą łańcuchową....55
4.1.1.2 Struktury o minimalnej powierzchni....56
4.1.1.3 Struktury pneumatyczne....57
4.2 Badania uzyskiwania efektywności poprzez budowę modeli sterowanych zachowaniami membranowymi....58
4.2.1 Budowa stanowiska badawczego wraz z modelem zmian geometrii....58
4.2.2 Sposób działania modelu podczas symulacji....62
4.2.3 Przygotowanie przypadków obciążeniowych na potrzeby badań....63
4.2.4 Badania doboru wartości parametrów wejściowych symulacji....63
4.2.4.1 Przebieg badania....63
4.2.4.2 Wyniki....64
4.2.5 Badanie wpływu liczby iteracji obliczeń dynamicznej relaksacji na efektywność wynikową struktury....65
4.2.5.1 Przebieg badania....65
4.2.5.2 Wyniki....65
4.2.5.3 Problematyka wpływu geometrii wejściowej na wynik badania w metodzie symulacyjnej....67

4.2.6 Badanie potencjału unifikacji przypadków obciążeniowych na cele realizacji matryc zachowań 67
4.2.6.1 Przygotowanie i przebieg badań 68
4.2.6.2 Wyniki 68
4.2.6.3 Wnioski 69
4.2.7 Badanie symulacyjne nakładów energetycznych na cele realizacji ruchu struktury 70
4.2.7.1 Wcześniejsze badania 70
4.2.7.2 Sformułowanie metody ewaluacji 70
4.2.7.3 Budowa stanowiska badawczego 71
4.2.7.1 Wyniki 73
4.3 Podsumowanie 75
5. Responsywność struktur powłokowych – ewaluacja zagadnień elementarnych budowy i modeli zachowań zmian geometrii 76
5.1 Wstęp 76
5.1.1 Stopień złożoności wzajemnego wpływu geometrycznego i statycznego elementów modeli powłokowych 76
5.1.2 Teoretyczne zagadnienia ruchu modeli powłokowych 76
5.1.2.1 Rozwiązania ruchu w strukturach powłokowych 77
5.2 Badanie modelu symulacyjnego zachowań 77
5.2.1 Koncepcja modelu 77
5.2.1.1 Koncepcja modelu i zasady działania 77
5.2.1.2 Koncepcja podpór 78
5.2.1.3 Właściwości fizyczne i statyczne oraz model ruchu struktury 79
5.2.2 Badania efektywności ruchu struktury 79
5.2.2.1 Przygotowanie do badań 79
5.2.2.2 Wyniki 80
5.2.2.3 Wnioski 81
5.3 Badania formy podpór modelu 82
5.3.1 Modele zachowań, a dokładność badań 82
5.3.1.1 Przygotowanie prób badawczych 82
5.3.2 Przebieg i wyniki badań 83
5.3.3 Wnioski 84
5.4 Badania elementarne fizycznej struktury 85
5.4.1 Koncepcja modelu 85
5.4.2 Badania zdolności realizacji fizycznej struktury podpory na podstawie opracowanej koncepcji 86

5.4.3 Układ sterowania ruchem, sposób działania modelu....88
5.4.4 Koncepcja modelu łączenia podpory z powłoką....90
5.5 Badania alternatywnego modelu podpór....92
5.5.1 Koncepcja modelu i zagadnienia dokładności symulacji\ 92
5.5.2 Budowa modelu....95
5.6 Badania symulacyjne naprężeń na podporze dla zróżnicowanych zakresów ruchu modelu 97
5.6.1 Koncepcja badań i przygotowanie przypadków obciążeń 97
5.6.2 Wyniki....99
5.7 Badania kompleksowe symulacji ruchu powłoki przy zastosowaniu modeli podpór 100
5.7.1 Opis koncepcji modelu ruchu i pracy symulacji....100
5.8 Koncepcja modelu badawczego wykorzystującego zjawisko elastooptyczne 102
5.8.1 Koncepcja modelu....102
5.8.2 Zjawisko elastooptyczne i sposób jego wykorzystania w pomiarowaniu struktury fizycznej....102
5.8.3 System czujników wspomagający wizualizację elastooptycznego zjawiska 104
5.9 Podsumowanie....104
6. Sposoby lokalnej zmiany układów naprężeń i ugięć w strukturach płytowych z zastosowaniem modyfikatorów punktowych....106
6.1 Wstęp....106
6.1.1 Koncepcja modyfikacji w strukturach powłokowych....106
6.1.2 Stan badań sposobów wprowadzania ruchu w strukturach ciągłych ...106
6.1.3 Koncepcja sposobu działania modyfikatorów punktowych....107
6.2 Badania efektywności użycia modyfikatorów punktowych indywidualnych w strukturach powłokowych....108
6.2.1 Teoria i budowa modelu symulacyjnego operowania modyfikatorem punktowym 108
6.2.2 Sposób działania modelu modyfikatora....108
6.2.3 Przygotowanie przypadków obciążeniowych oraz sposobu działania modyfikatorów 110
6.2.4 Przebieg badania operowania modyfikatorem w celu redukcji naprężeń maksymalnych 111
6.2.5 Wyniki badań....111
6.2.6 Modelowanie modyfikatora oraz ewaluacja jego działania....116
6.2.6.1 Kształtowanie elementów ruchomych....116
6.2.6.2 Kształtowanie połączenia modyfikatora z powłoką....117
6.2.6.3 Badania oraz geometryczna analiza modyfikatora....118
6.2.6.4 Wyniki badania modyfikatora....119

6.2.7 Wnioski....122
6.3 Systemy modyfikatorów punktowych – koncepcje oraz symulacje....122
6.3.1 Wstęp....122
6.3.2 Koncepcja ruchu i koordynacji....123
6.3.3 Badania efektywności pracy systemu modyfikatorów....123
6.3.4 Przygotowanie, parametry badania....125
6.3.5 Przebieg i wyniki badania....126
6.3.6 Wyniki badania....126
6.3.7 Wnioski....129
6.3.8 Podsumowanie....130
6.4 Badanie efektywności redukcji naprężeń oraz ugięć przy użyciu parametryzowanych pozycji elementów systemu modyfikatorów....131
6.4.1 Wstęp i przygotowanie badania....131
6.4.2 Wyniki badania....131
6.4.3 Wyniki i tendencje doboru układów przez system....132
6.4.4 Problematyka działania systemów modyfikatorów o zróżnicowanym stopniu złożoności....135
6.5 Badania zdolności przygotowania modelu dla pojedynczego modyfikatora systemowego 136
6.5.1 Wstęp....136
6.5.2 Budowa modelu....136
6.5.3 Badania geometrii modyfikatorów pod obciążeniami modelowymi....138
6.5.4 Wnioski....138
6.6 Podsumowanie....138
7. Kontrola geometrii i rozkładu naprężeń struktur ramowych z wykorzystaniem koncepcji modyfikatorów węzłowych....140
7.1 Wstęp....140
7.2 Koncepcja ruchu modyfikatorów ramowych....141
7.2.1 Założenia teoretyczne ruchu oraz kontroli geometrii....141
7.2.2 Budowa modelu badawczego....146
7.2.3 Przygotowanie prób badawczych....149
7.2.4 Wyniki badań....149
7.3 Badanie wpływu wielkości siłowników na efektywność responsywności..153
7.3.1 Wyniki badań....153
7.3.2 Wnioski....155
7.4 Badanie wpływu modyfikatorów węzłowych na struktury sztywne topologicznie 155
7.4.1 Wstęp....155
7.4.2 Budowa modelu....156
7.4.3 Przypadki obciążeniowe....158
7.4.4 Wyniki badań....159

7.5 Badania zdolności podniesienia tempa generowania wyników geometrycznych przy użyciu modelu zachowań hybrydowych iteracyjno-losowych 163
7.5.1 Wstęp 163
7.5.2 Budowa modelu zachowań w oparciu o działanie hybrydowe iteracyjne 163
7.5.3 Wyniki badań 168
7.5.4 Wnioski 169
7.6 Modyfikacja stref węzłowych struktur o swobodnej formie 170
7.6.1 Budowa modelu 170
7.6.2 Wyniki badań 173
7.6.2.1 Zjawisko kosztu parametrycznego wpływu geometrii na układ naprężeń 173
7.7 Koncepcje architektonicznego wykorzystania rozwiązań responsywności struktur ramowych 174
7.8 Podsumowanie 177
8. Podnoszenie skuteczności reakcji modeli zachowań przy użyciu preakcji 179
8.1 Teoria modeli zachowań w kontekście wymogu użycia preakcji 179
8.2 Opis rozwiązań modeli i sposobów ich działania 180
8.2.1 Zastosowanie i teoria kształtowania modeli preakcji 180
8.2.2 Opis 4 modeli zachowań preakcji na cele badania skuteczności ich użycia 181
8.2.2.1 Model operowania grubością kratownicy przestrzennej 182
8.2.2.2 Model agregacji węzłów 183
8.2.2.3 Model sterowany geometriami uzyskiwanymi w wyniku symulacji z użyciem algorytmu dynamicznych relaksacji 185
8.2.2.4 Model oparty o koncepcję rozważań teoretycznych W. Zalewskiego w odniesieniu do wykresów strumieni sił 186
8.2.3 Obsługa modeli preakcji podczas badań 191
8.2.4 Przygotowanie przypadków obciążeniowych 192
8.2.5 Wyniki badań 195
8.2.5.1 Wpływ responsywności na ogólne wyniki 195
8.2.5.2 Model cząstkowy nr 1 196
8.2.5.3 Model cząstkowy nr 2 198
8.2.5.4 Model cząstkowy nr 3 199
8.2.5.5 Model cząstkowy nr 4 201
8.2.5.6 Wyniki zmian naprężeń i ugięć modeli podczas ruchów pośrednich między geometriami docelowymi 203

8.2.5.7 Wyniki ruchu modelu operowanego dynamicznymi relaksacjami wraz z koncepcją podniesienia efektywności jego pracy.....206

8.2.5.8 Wyniki czasu obliczeniowego w zależności od rodzaju obciążenia oraz tendencje uzyskiwanych geometrii.....207

8.2.5.9 Wyniki zachowania poziomu sprawności struktury podczas kontrolowanego losowo sterowanego usuwania pojedynczych elementów nośnych 208

8.2.5.10 Wnioski z badań zachowań modeli.....209

8.3 Badania zachowań struktur podczas realizacji ruchów pośrednich.....210

8.3.1 Teoria ruchów pośrednich w oparciu o wyniki badań wstępnych.....210

8.3.2 Idea „sub-moves" jako redukcji wpływu niekontrolowanych ruchów pośrednich na statykę struktur responsywnych.....211

8.3.3 Budowa modelu badawczego sub-moves.....212

8.3.4 Aparat analizy danych oraz obsługa systemu.....214

8.3.5 Wyniki badania.....215

8.3.6 Wnioski.....218

8.4 Podsumowanie.....219

9. Modelowanie elementów systemów strukturalnych dla architektury responsywnej 221

9.1 Badanie gotowości realizacyjnej modelu fizycznego badanego algorytmami ewolucyjnymi i optymalizacyjnymi.....221

9.2 Ograniczenia wykonalności struktur responsywnych.....222

9.2.1 Geometryczne ograniczenia.....222

9.2.2 Ograniczenia realizacji elementów prętowych.....223

9.2.3 Ograniczenia realizacji i zdolności translacji węzłów.....223

9.2.4 Wnioski analizy ograniczeń ruchu.....224

9.2.5 Badania ograniczenia ruchu modeli responsywnych przez ruch wyłącznie wybranymi sekcjami struktury.....224

9.2.5.1 Cel badania.....225

9.2.5.2 Wyniki badania.....225

9.3 Modelowanie węzłów struktur responsywnych w oparciu o wymagania responsywności.....228

9.4 Wstęp, przykłady struktur istniejących.....228

9.4.1 Badania modelowe systemów strukturalnych dla architektury responsywnej 229

9.4.1.1 Koncepcja modelu pierścieniowego.....229

9.4.1.2 Model bryłowy oparty na geometrii dwunastościanu foremnego.....233

9.4.1.2.1 Budowa modelu.....234

9.4.1.2.2 Badanie sztywności i wpływu nieosiowości sił zewnętrznych na przenoszenie naprężeń przez węzeł 236
9.4.1.2.3 Możliwości kształtowania przestrzennych struktur z użyciem systemowego rozwiązania modelu bryłowego 237
9.4.1.2.4 Badanie wpływu stopnia sztywności struktury na niedokładności wykonawcze zmian geometrii 238
9.4.1.3 Redukcja wpływu nieosiowości przenoszenia naprężeń z wykorzystaniem koncepcji węzła obrotowego centrycznego 240
9.4.1.3.1 Budowa modelu węzła centrycznego – założenia teoretyczne 240
9.4.1.3.2 Badania modelu geometrycznego węzła z użyciem analizy MES . 243
9.4.1.3.3 Zjawisko obrotu wspólnego gniazda z węzłem 244
9.4.1.3.4 Wnioski z analiz modelu 244
9.5 Model struktury półautomatycznie ekspandującej 245
9.5.1 Teoria ruchu modelu ekspandującego 245
9.5.2 Koncepcja nazewnictwa elementów na cele nadzoru ekspandowania struktury 246
9.5.3 Model pełnej geometrii pręta oraz samoformującego węzła 248
9.5.4 Dziedziczenie nazw prętów i metoda osadzania nowych segmentów w procesie wzrostu 250
9.5.4.1 Problematyka dwukrotności teleskopowania i metoda jej niwelacji ... 251
9.6 Podsumowanie 253
10. Koncepcje implementacji responsywności topologicznej w rozwiązaniach architektury responsywnej 255
10.1 Wstęp 255
10.1.1 Aktualne badania 255
10.1.2 Koncepcja modelu responsywnego topologicznie 257
10.1.3 Topologia układów belki środkowej 258
10.2 Badania efektywności działania modułu dla zróżnicowanych geometrii i złożoności struktur 259
10.2.1 Założenia wstępne 259
10.2.2 Budowa modelu badawczego 260
10.2.3 Działanie modelu badawczego oraz przygotowanie przypadków obciążeniowych 261
10.2.4 Wyniki badań i zdolność zachowania geometrii podczas oddziaływania obciążeń w próbach badawczych 264
10.2.5 Tendencje układów prętów środkowych 269
10.2.6 Analiza istotności poszczególnych elementów modelu 271
10.2.7 Wnioski badań efektywności geometrii 273

10.3 Badania potencjału wzrostu efektywności modelu zdolnego do responsywności topologicznej 274
10.3.1 Budowa modelu 274
10.3.2 Wyniki badań 275
10.3.3 Wnioski 276
10.4 Koncepcja fizycznego modelu responsywnego topologicznie 277
10.4.1 Koncepcja i geometria modelu 277
10.5 Badania zachowań modelu i właściwości statycznych w szerokim spektrum pozycji dyskretnych 278
10.5.1 Wnioski 279
10.6 Badanie wpływu zakresu błędu dokładności połączeń modułu na transfer nie osiowych sił między modułami 280
10.7 Podsumowanie 281
11. Modele podnoszenia efektywności struktur z wykorzystaniem rozwiązań responsywności topologicznej 283
11.1 Wstęp 283
11.2 Koncepcje ruchu responsywności topologicznej oraz zagadnienia problemowe ich realizacji 284
11.2.1 Formy ruchu stosowane w modelach responsywnych topologicznie 285
11.2.2 Problematyka niedokładności i podatności połączeń podczas ruchu między topologiami docelowymi 285
11.2.3 Dyskretyzacja ruchów modeli na cele analizy statycznej 286
11.3 Modelowanie modułu responsywnego topologicznie wraz z matrycą układów 287
11.3.1 Budowa modelu responsywnego 290
11.3.2 Analiza układów topologicznych 291
11.3.1 Analiza statyczna z uwzględnieniem połączeń 293
11.4 Badania użycia modułu w strukturach modularnych 294
11.4.1 Budowa modelu 294
11.4.1 Wyniki badań 297
11.4.2 Wnioski 299
11.5 Efektywność architektoniczna responsywności topologicznej 299
12. Streszczenie rozprawy doktorskiej 302
13. Dissertation Abstract 304
14. Spis grafik 306
15. Spis tabel 313
16. Bibliografia 315
17. Załączniki 328
17.1 Załączniki fizyczne 328
17.2 Załączniki w formie cyfrowej 328

1. Wstęp

1.1 Efektywność w architekturze

Konieczność efektywnego projektowania architektonicznego wymusza stałe poszukiwania przestrzeni do podnoszenia tej efektywności. Może być ona definiowana w najprostszy sposób jako realizacja podejścia „więcej za mniej" powszechna w podejściu R.B. Fullera[1]. Oznacza ono tak ilość materiału, nakład pracy, impakt środowiskowy jak i uniwersalność czy adaptacyjność przestrzeni architektonicznych. Efektywność ta powinna przynosić pozytywne skutki doraźne jak mniejszy nakład materiałowy, lecz jednocześnie musi pozwalać na spełnienie Fullerowskiej idei w perspektywie czasu, dodając czwarty wymiar projektowania jakim jest czas. Obecnie spektrum zagadnień w jakich doszukiwać można się sposobów na podniesienie efektywności architektonicznej ulega stałemu rozszerzaniu. Najpopularniejsze kierunki rozwoju związane są z ekologią, zrównoważeniem, adaptacyjnością oraz prefabrykacją. Stałe zwiększanie liczby dziedzin rozwoju efektywności architektonicznej występuje ze względu na rosnącą pulę rozwiązań szczegółowych, technologicznych, lecz również rozbudowywaną bazę opracowań teoretycznych, koncepcyjnych. Zasadne jest stać w polemice z twierdzeniem, że rozwój efektywności stanowi wyłącznie wynikową rozwoju technologicznego, gdyż architektura rozwija się koncepcyjnie, po to by przyjąć w procesie projektowym formy rzeczywiste. To prowadzi do wnioskowania, że modelowanie, kształtowanie, czy poszukiwanie form architektonicznych jest odrębnym od projektowania działaniem, lecz nierozerwalnie przed nim następującym. Należy w dalszej kolejności rozgraniczyć, że kształtowanie konstrukcji, struktury, form nośnych przynależne jest architekturze, natomiast konstrukcyjne dostosowywanie koncepcji do aktualnych dostępnych rozwiązań i wymagań stanowi dopiero dalszy proces projektowy przynależny budownictwu.

Opisywana w pracy architektura responsywna sięgająca połowy XX wieku odnosi się do struktur, modeli nośnych obiektów, dystrybucji naprężeń i kontroli ugięć w celu zmniejszenia nakładów w dowolnej formie pozwalając na wzrost efektywności. Oznacza to, że pozornie konstrukcyjne zagadnienia pozostając w sferze koncepcyjnej, modelowej stanowią wyłącznie architekturę. Architektura responsywna polega w głównej mierze na zastąpieniu statyki ruchem modelu prowadząc do zamiany masy materiału na energię operacyjną w bilansie dodatnim na rzecz responsywności. Dziedzina ta wpisuje się więc w przedstawioną definicję efektywności, a analizowana może być w szeregu skal dokładności od prostych analiz energetycznych i materiałowych, przez LCA po bilanse rzeczywistych struktur dające kompleksowy obraz efektywności uwzględniający wszystkie nakłady wraz z kosztami trudnymi do oszacowania jak konserwacja, czy ekonomia geograficzna materiałów. Responsywność ma pozwalać na redukcję nakładów materiałowych jak i również lepsze wykorzystanie przestrzeni rozumiane jako gęstość funkcjonalności realizowanych w danej kubaturze. Zagadnienie to dotyczy głównie miast, gdzie przestrzeń pozostaje materiałem wliczanym w ekonomię obiektu. To oznacza, że responsywność pozwalając na zwiększenie uniwersalności przestrzeni na cele realizacji większej liczby czynności prowadzi do oszczędności. Obecnie jednak ze względu na rozwijający się charakter dziedziny podejście to stanowi wyłącznie teoretyczne rozważanie.

Początkowo skala efektywności była równoważna z masą struktury oraz proporcją nośności do masy, co umożliwiało projektowanie większych, bardziej rozłożystych i wytrzymalszych struktur. Zauważalny był jednak niedobór badań wpływu topologii na efektywność konstrukcji, a mniej efektywna optymalizacja przekrojów dominowała do początku XX wieku [2]. Z czasem na popularności zaczęły zyskiwać rozwiązania komputerowej optymalizacji konstrukcji czyniąc z optymalizacji topologicznej coraz częściej wykorzystywane narzędzie projektowe, pierwotnie zaczerpnięte z dziedziny zajmującej się projektowaniem samolotów [3]. Rozpoczęło to proces dostosowywania narzędzia do potrzeb

architektonicznych projektowania i efektywnej realizacji [4]. Z czasem zaczęto wykorzystywać również algorytmy ewolucyjne oraz projektowanie wspomagane sztuczną inteligencją [2].

Równolegle analiza efektywności konstrukcji uległa znacznej zmianie. Prosta tendencja komparatywnej oceny nośności do masy między podobnymi obiektami rozwinięta została o czynnik czasu oraz nakładów, by łącząc się z ogólnym rozliczeniem analizy materiałowej dawać całościowy obraz efektywności konstrukcji. Rozwój analiz środowiskowych dodatkowo wywarła wpływ na kompleksowość analiz responsywności pozwalając na bardziej miarowy wskaźnik opłacalności implementacji responsywności w obiekcie. Potrzeba uniwersalizacji parametru wynikała z konieczności znalezienia wskaźnika osiągającego optimum między nakładami początkowymi oraz końcowymi. Proste wskaźniki nie były więc wystarczające.

Architektura responsywna stanowiąc propozycję odpowiedzi na wymóg podnoszenia efektywności łączy w sobie modelowanie strukturalne, informatykę i mechatronikę. Wraz ze stopniem zaawansowania badań włączane są do niej kolejne dziedziny jak metrologia, czy elektronika. Jest ona więc przykładem dziedziny silnie interdyscyplinarnej. Ideowe podejście pozwala na wyekstrahowanie zagadnień pojedynczej tematyki w celu indywidualizacji problemu do zdefiniowania metod ruchu lub zarządzania strukturą, lecz już na wczesnym etapie badawczym potrzebna jest wiedza specjalistyczna z pogranicza nauk. Praca skupia się wyłącznie na kształtowaniu architektury responsywnej dostosowującej się pod wpływem zewnętrznych obciążeń do redukcji naprężeń oraz ugięć w czasie użytkowania. Oznacza to pominięcie całej problematyki ruchu w strukturze, który następuje w wyniku innych bodźców, jest nieautonomiczny oraz pozwala na uzyskanie innych celów niż statyczna kontrola struktury.

1.2 Historia koncepcji i realizacji responsywności

1.2.1 Początkowe idee i koncepcje formujące Responsywność architektoniczną i strukturalną

W połowie XX wieku, gdy na świecie dominował rozwój statycznego budownictwa wielkoskalowego, a w Europie szczególnie wschodniej rozpoczął się proces odchodzenia od pełnej standaryzacji i prefabrykacji zespołów osiedli, powstawał zupełnie odrębny, futurystyczny nurt architektoniczny zapoczątkowany przez Negroponte oraz równolegle Archigram w 1961 roku. Mimo zupełnie odrębnych podejść do architektury w obu przypadkach stwierdzić można, że chęć odejścia od statyki i tworzenie koncepcji napędzających wyobraźnię odbiorców stanowiły główny sposób przekazu wizji dynamicznej architektury [5]. Archigram będący grupą młodych architektów, których zainteresowania oscylowały wokół nowoczesnych technologii, ruchu, światła, podróży kosmicznych zaproponował wprowadzenie mobilności do architektury rewolucjonizując podejście do myślenia o dotychczas całkowicie sztywnych, nieprzesuwnych ścianach i stropach w układzie ortogonalnym. Ich fascynacja nowymi technologiami i konsumpcjonizmem szły w sukurs rozważaniom innych[5]. Prace jak „A Walking City" czy „Plug-In City" pozostawały manifestem, który nigdy nie oczekiwał realizacji. Miały pozostać postulatem tego, czego od architektury oczekiwano w dalekiej przyszłości [6], lecz nie w formie skopiowanej z grafik, a jako powszechna funkcjonalność architektury. Miał on kierować wzrok na ówczesny problem trwałości i stałości budynków licując silnie z rosnącym tempem życia użytkowników. Podobnym manifestem efektywności pozostawał projekt Manhattan Dome [7] jako jeden z pierwszych tak obrazowo nakreślonych potrzeb zwiększenia efektywności gospodarowania zasobami przez przykład architektonicznej koncepcji. W tym samym czasie wydano drugą wersję pracy Norberta Wiener'a, pierwotnie napisaną ponad 10 lat wcześniej „Cybernetics: or control and Communication in the Animal and the Machine"[8], która zdefiniowała podstawy działania serwomotorów i wprowadziła określenie cybernetyki odnoszące się do sterowania i komunikacji tak zwierząt, jak i maszyn, dając przyczynek do inkorporacji określenia również w ramy architektury ruchomej. Pozycja ta szczególnie wrażeniowo silnie jak na swoje czasy łączyła człowieka i szerzej organizmy żywe z programowalnym urządzeniem. Dodanie mechatronice aspektu humanizmu pozwoliło na

dynamiczny rozwój koncepcji synergii maszyny i człowieka, a w konsekwencji poprzez translację idei na inne dziedziny również inteligentnej architektury i człowieka. W 1961 roku Emilio Perez Pinero zaprezentował model „Movable Theater" [9], projektem modelu nawet w małej skali wyprzedzając realizacje pozostałych w tej dziedzinie oraz prezentując potencjał badanego potem szeroko mechanizmu nożycowego[1] [10]. Model ten dzięki prostej koncepcji, modularności i możliwości dostosowywania do potrzeb rozkładania zyskał szeroki rozgłos i ukonstytuował z czasem odrębną dziedzinę „Foldable Structures". Model zaprezentowany jako autonomicznie rozkładany z pozycji pojazdu transportowego przewożącego architekturę odpowiadającą na potrzebę dostępności i szybkości realizacji wskazywał od razu dalszy kierunek rozwoju badań. W tym samym czasie Archigram kontynuował rozważania nad koncepcją miasta starając się poprzez kinetykę i ciągły ruch jego elementów ustanowić człowieka centrum wydarzeń proponując ideę Living City, czy wiele koncepcji Instant City [5]. Rozwiązania te stanowiły bardziej przetworzoną ideę ruchu. Nie pełnił on jedynie dodatkowej funkcjonalności. Pozwalając na ruch elementów składowych miasta można było odnosić się do efektywności wykorzystania przestrzeni. Widać było w koncepcji konkretny powód wykorzystania ruchu. Bardziej jednak zauważalny był on w koncepcji „Fun Palace" autorstwa Cedric'a Price'a i Joan'a Littlewood'a z 1964 roku [11]. Przejawiająca się w idei daleko rozwinięta uniwersalizacja każdej dostępnej przestrzeni miała na swój indywidualny sposób być jednym z wielu manifestów włączenia czasu do puli parametrów kluczowych w projektowaniu oraz zarządzaniu obiektem. Obiekt skali całego miasta utrzymujący formę ramy przestrzennej silnie zmodularyzowanej dla pełnej uniwersalności pozwalać miał na przemieszczanie komórek mieszkalnych, czy użytkowych między dowolnymi miejscami w obrębie ramy. Idea sposobu funkcjonowania takiej megastruktury wzbogacona była szeregiem grafik obrazowo streszczających sposób korzystania z modelu, lecz również zawierała dokumentację elementarnych rozwiązań, gdzie szczegółowe rysunki pozwalały na przekazanie sposobu ruchu, mocowania elementów, procesu zmiany położenia, czy kluczowego w odniesieniu do architektury – sposobu interakcji człowieka z obiektem. Idea zbyt odległa od ówczesnego stanu techniki pozostawała jedynie nakreśleniem kierunku możliwego rozwoju. Zaowocowało to szereg lat później stając się bezpośrednią inspiracją do zaprojektowania i realizacji centrum Pompidou oraz dla wspominanej wcześniej koncepcji Plug-In City Archigramu [12]. W 1965 zaprezentowano City of the Future będące nawiązaniem do „the Walking City" Archigramu, które miało korzystać z rozwiązań inteligentnych. Było to podejście odmienne od dotychczasowych ze względu na szeroką technologizację założenia. Sama motoryka obiektu nie była kluczowa. Najważniejsze pozostawało wprowadzenie funkcjonalności pozwalających na możliwie elastyczne dostosowywanie przestrzeni pod aktualne wymagania aktualnego ich użytkownika. W 1970 roku Price rozpoczął budowę jednej z niewielu swoich zrealizowanych koncepcji jaką było Inter-Action Centre, które już w 1981 roku zostało zburzone jako przestarzałe. Przykład ten jednak bardzo dobrze prezentuje rozbieżność idei i możliwości realizacyjnych lat formowania się koncepcji architektonicznych. Pierwsze prace ideowe oparte były o spektakularnie dowolny ruch niezależny od dostępności miejsca, czasu i zasobów. Gdy postęp technologii przyspieszył, w celu jego wykorzystania nie tylko modelowano, ale i projektowano architekturę przyszłości czyniąc ją bardziej przystępną za cenę ograniczeń funkcjonalności do ruchu po trajektoriach, ograniczeniach dostępności i znacznej redukcji skali pomysłów. Gdy projekty spotykały się z realizacjami, redukcja postępowała i Inter-Action Center będąc bezpośrednim wynikiem koncepcji Price'a oraz jego autorskiego nadzoru pozwalał jedynie na wymontowywanie i ponowne wmontowywanie modularnych powtarzalnych jednostek w wyznaczonych miejscach, lecz bez zaplecza badawczego, czyniąc realizację nietrwałą i niefunkcjonalną[13]. Samo pojęcie przestarzałości ***„obolescence"*** wprowadzono już na początku XX wieku w stanach zjednoczonych, a następnie w Japonii [14] stając się przyczynkiem do projektowania efektywniejszego i

[1] Mechanizmy nożycowe w architekturze (z ang. Scissor-like elements) opierają się zawsze na prostej budowie dwóch elementów przecinających się w widoku, połączonych w jednym punkcie. Tworzą mechanizm wykorzystywany często w rozwiązaniach składalnych struktur, szczególnie małych oraz miniaturowych skal ze względu na podatności połaczeń [198].

lepszego zarządzania materiałem oraz przestrzenią, a prawie wiek później model zróżnicowania tempa degradacji metaforycznych komponentów obiektu zaprezentował słynnym diagramem Stewart Brand [15]. W latach 70 XX wieku nie występowało zróżnicowanie na architekturę kinetyczną, ruchomą, adaptacyjną, czy responsywną. Wszystkie koncepcje pozostawały architekturą zmienną. Wtedy też coraz częściej wykorzystywano technikę i technologię w koncepcjach architektonicznych. Były to nadal idee odległe od ruchu ścian, czy stropów, lecz starano się w proste konstrukcje wdrożyć aspekt zmienności. „Kinetic Architecture" Wiliam'a Zuk'a pozostaje kamieniem milowym w myśleniu o zmienności i możliwości dostosowania do potrzeb użytkownika[16]. Jasno definiowana kinetyka, liczne analogie do biomimikry [17] i biomimetyki[18] przyspieszyły postęp włączania rozwiązań mechanicznych w architekturze. Pozycja ta jasno określała stopnie autonomiczności działania robotów i maszyn, lecz starając się uchwycić heurystyczne zdolności ówczesnej automatyki pozostawano w sferze wyłącznie koncepcyjnej. Postęp technologiczny postulowany przez Archigram w formie nierealizowalnych ówcześnie ale pobudzających wyobraźnię projektów stymulował wyobrażenia dalszych twórców. Pod koniec lat 70.tych wyidealizowane koncepcje zaczęto formować w architektoniczne mechanizmy. Doszukując się analogii także w naturze, budowie szkieletów zwierzęcych jak skrzydła mewy, czy sekwencja ruchu rzęsek i pneumatyce ich działania[19] . Nadal jednak zbyt dosłownie traktowano naśladowanie natury. W miejsce ekstrakcji logiki ruchu lub zmienności starano się upodabniać modele i pomysły do znanych już form naturalnych. Rozumiano potencjał łączenia architektury z elektroniką i starano się ustandaryzować interfejs, płaszczyznę kontaktu między człowiekiem, a zautomatyzowanym budynkiem [20].Zauważano problem antropomorfizacji maszyn i ruchomej architektury, a także realnych ograniczeń ruchomych struktur, które musiały być kontrolowane i zarządzane przez człowieka [21]. Formowało się również określenie inteligentnego środowiska jako zdolności danej struktury do badania, pomiarowania pewnych zjawisk i warunków w swoim otoczeniu, czego przykładem może być „Surrounding Mirrors" z 1970 roku [22]. Od zawsze skala pojedynczych budynków czy szeregu zabudowań była niewystarczająca. W portfolio większości znanych twórców dawnych czasów znaleźć można było koncepcje całych miast, często jako samodzielnych, samowystarczalnych jednostek. W 1960 roku idea „Cloud Nine" autorstwa Buckminstera Fullera i Shoji Sadao trafiła do odbiorcy ponownie będąc manifestem większej idei. Architektura pozostawała jedynie narzędziem przekazu komunikatu społecznego. W przeciwieństwie do innych prezentowanych przykładów, dzieło Fullera wykorzystywało kinetykę do ruchu całej struktury, będąc rozwiązaniem znajdującym analogie w „The Walking City", lecz motywowane w zupełnie inny sposób. „Cloud Nine" proponowało znacznie bardziej rozbudowane pojęcie efektywności poprzez synergetykę[2] [23]. Poszukiwanie tej holistycznej metody ewaluacji architektonicznej zauważalne jest do dziś w metodach obliczeniowych, algorytmach ruchu, czy sposobach realizacji zmian geometrii w architekturze responsywnej. Strukturom takim w sukurs szedł rozwój mikroelektroniki. Kolejne rewolucje przemysłowe 2.0 oraz później 3.0 nakierowywały na wykorzystanie ich w różnych gałęziach techniki znajdując szereg zastosowań z czasem również w architekturze. Zyskujące na popularności układy zintegrowane[3] znacznie upraszczające końcowemu projektantowi przygotowanie koncepcji i dalej dokumentacji owocowały takimi i podobnymi pomysłami prowadząc z czasem do inteligentnych miast [24].

[2] Synergetyka (z ang. ***„synergetics"***) jest określeniem stworzonym i opisanym przez Richarda Buckminstera Fullera do opisu efektywności w kontekście szerszym niż powszechnie przyjmowany. W myśl koncepcji wszystko wzajemnie na siebie oddziałuje, a efektywność to zdolność wykorzystania zasobu tak, aby minimalizować straty w odniesieniu do całego układu (np. planety), a nie pojedynczego elementu (np. silnika)

[3] Z ang. „embedded" odnoszące się do gotowych elektronicznych rozwiązań mikrokontrolerów pracujących samodzielnie, nie wymagających zewnętrznych komponentów do realizacji zadań. Logika takich samowystarczalnych rozwiązań pierwotnie wykorzystywana w elektronice przeniesiona została z czasem na płaszczyznę architektoniczną w postaci modularności i rozwiązań uniwersalnych.

1.2.2 Symulacje responsywności skali mikro

W latach 70.tych komputer jako nowe, futurystyczne urządzenie coraz szybciej prezentował kolejne dziedziny jego potencjalnego zastosowania. Były to działania każdorazowo pionierskie prowadzące często do nieoczekiwanych wyników. Niepewność badawcza często swoje źródła znajdowała w interakcji człowieka z maszyną. Ludzka niedokładność oraz komputerowa interpretacja tworzyły mariaż na styku nauki i sztuki, a jednym z wyraźniejszych przykładów tej zależności w dziedzinie architektonicznej pozostaje projekt S.E.E.K. kierowany przez Nicholasa Negroponte [25]. Na przełomie 1969 i 1970 roku wraz z grupą Architecture Machine Group stworzył model obrazujący interakcje materii ożywionej z zaprogramowanym urządzeniem. W obudowanej poliwęglanem przestrzeni umieścił dziesiątki różnej wielkości sześciennych bloków częściowo wypełniających przestrzeń. Nad całą przestrzenią roboczą zlokalizowany został podajnik suwnicowy odpowiadający za chwytanie i przemieszczanie wszystkich bloków zgodnie z zadaną instrukcją. Podajnik wyposażony był w system czujników rozpoznający aktualny układ bloków w przestrzeni roboczej. System ten był kluczowy ze względu na wpuszczenie do środka grupy myszy mających symulować przypadek, niedokładności, degradację przestrzeni w celu badania jak sztywno zaprogramowane systemy są w stanie działać i realizować zadania w warunkach dalekich od laboratoryjnych, naturalnych poddanych działaniu przypadku [26]. Zwierzęta przesuwając, lub strącając bloki wprowadzały losowość. Projekt był bardzo wyraźnym przedstawieniem wszystkich trudności jakie stały później przed architekturą responsywną. Interakcja ta była na czasy projektu zbyt złożona, a zmienność w czasie użytkowania mimo licznych analiz koncepcyjnych pozostawała jedynie ideą. W czasach badania powstało określenie „Cybernetics", które Negroponte inkorporował do architektury. Ujęta w opisanym badaniu jednoznacznie pokazywała obecną rozbieżność między możliwościami dostosowywania architektury do użytkownika, a wyprzedzającymi swoje czasy ideami. Określenie z czasem ulegając niewielkim zmianom zachowało się do obecnych czasów, choć na początku XX wieku wyodrębniła się znacznie bardziej organiczna jej forma przybierając postać „Hylozoic Ground" w 2010 autorstwa Philip'a Beesley'a [27] wpisując się w nurt filozofii hylozoizmu postulującej jedność materii i duchowości[28]. Dziedzina ta obecnie znacznie odbiegła od ram architektonicznych wpisując się w sztuki wizualne.

Wraz z dalszym rozwojem technologii zauważano trudności realizacji wyidealizowanych rozwiązań ruchomej architektury i konieczność poprawy integracji sensorów, aktuatorów i wpasowywania się struktury w otoczenie i jego zmienne warunki. Określenia ***„additive architecture"***, czy ***„substitutive architecture"*** prezentowały odmienne koncepcje sprostania temu wyzwaniu[19], a eksperymenty pozostawały nadal w formie modelowej jak „AISI Project" grupy projektowej zarządzanej przez William'a Zuk'a. Projekty te realizowane były jako autonomiczne systemy dostosowujące się do otoczenia, a nie optymalizowane do niego. Ich budowa i działanie można nazwać pełnym systemem [29]. ***„Jedynie system jako pierwszy podział wszechświata oraz lokalny fenomen wyznaczalny geometrycznie…"***[1], uważano za odpowiednią formę dla architektury odpowiadającej na bodźce z otoczenia [30], choć stopień izolacji systemu od otoczenia pozostał w dyskusji punktem niejasnym[23]. Precyzując tę definicję to Negroponte nakierował kształtowanie form na właściwą dla dzisiejszych czasów architekturę responsywną [31], postulując że jest ona naturalnym produktem integracji mocy obliczeniowej z przestrzenią i strukturą [22]. Modele te przyczyniły się do ukonstytuowania określenia ***„architektury transformacyjnej"*** [32].

1.2.3 Systemy kontroli responsywności jako wynikowa rozwoju systemów oceny stanu obiektów

Bardzo wyraźnie zauważalny był wieloletni proces materializacji projektów z koncepcji w szczegółowe opisy elementów z jakich kinetyczna architektura powinna być złożona. Na początku przemian i szybkiego rozwoju zauważano potencjał i kierunki, w których architektura responsywna może się rozwijać [19], [33], [34].Popularyzujące się ruchy ekologicznego i zrównoważonego projektowania napędzały eksperymenty, a wykorzystanie czujników, systemu zarządzania ruchem i aktuatorów stawało się standardem [34] tworząc pierwsze ramy projektowania responsywności. Rozwój budownictwa wielkoskalowego oraz stopnia złożoności elementarnych rozwiązań w budownictwie i wykorzystanie coraz bardziej zaawanasowanych materiałów przyczynił się do rozwoju gałęzi metrologii zajmującej się pomiarami stanu architektury w czasie rzeczywistym. Początkowe proste półanalogowe pomiary tensometryczne zastępowane były systemami precyzyjniejszymi, szybszymi i mierzącymi głównie geometrię w miejsce dotychczasowych sił dających wyniki pośrednie. Proste aparatury zamienione zostały na systemy z czasem dostarczając kompleksowych rozwiązań określanych jako ***„Structural Monitoring Systems”*** (SMS). Stosowane głównie w budynkach wysokich i wysokościowych pozwalały na automatyzację kontroli budynku. Stosunkowo wcześnie zaczęto stosować w nich systemy bezprzewodowe [35] i światłowodowe [36], a z czasem zniwelowany problem niedokładności wyników ustąpił miejsca konieczności dobierania coraz efektywniejszych sposobów przetwarzania wykładniczo rosnącej liczby precyzyjnych danych pomiarowych kontroli struktury [37]. Stopniowe rozbudowywanie się systemów pozwoliło na badanie nie tylko stanu technicznego budynków, lecz również warunków otoczenia pozwalając na predykcyjne symulacje zachowań struktur pod wpływem bodźców zewnętrznych. Mimo, iż Taipei 101 jest przykładem wieżowca zabezpieczanego systemami głównie ze względu na oddziaływania dynamiczne nadal w pełni wpisuje się w typ obiektu wyposażonego w niezwykle złożony SMS [38]. Poza analizą aktualnego stanu struktury oferuje on predykcyjny system w celu planowania ruchów przeciwwagą kontrującą na bieżąco powstające wychylenia obiektu[39]. Systemy te ewoluowały stopniowo w formę obecnych systemów pomiarowych dla architektury responsywnej. Każdy model responsywny w celu wygenerowania odpowiedzi musi posiadać system monitorowania warunków. Mimo iż obecne systemy w małym stopniu korzystają z technologii sięgających początków SMS to w ich pierwszych projektach lat 60/70tych należy doszukiwać się pierwowzorów wzrostu zainteresowania ruchomą architekturą, dostosowującą się tak do użytkownika jak i środowiska zauważa się w kryzysie paliwowym z 1973 roku [22] oraz w niskim udziale nowoczesnego budownictwa w strukturze zabudowań w latach 70.tych [40].

1.2.4 Krystalizacja nomenklatury architektury ruchomej

Obecnie wyróżnić można wiele dziedzin architektury wykorzystujących formę zmienności jako jedną z głównych cech różnicujących je spośród innych typów. Dominującymi nurtami są architektura kinetyczna, adaptacyjna, interaktywna, inteligentna oraz responsywna [16], [31], choć podział ten nie jest jednoznaczny, a niejednokrotnie jest zawężany lub rozbudowywany [41], [42], [43], [44]. Niektóre opracowania nie wyróżniają responsywnej architektury, przypisując jej cechy architekturze inteligentnej lub adaptacyjnej [45]. Co więcej architektura ta dzieli mnogość rozwiązań technicznych z pokrewnymi zagadnieniami, co stawia ją bardzo blisko projektów zachowujących wytrzymałość dynamiczną lub przeciwstawiającą się porywom wiatru [46]. Architektura kinetyczna jako najwcześniejsza zapoczątkowana przytaczanymi wcześniej ideami konceptualistów oparta jest o zasadę wprowadzenia ruchu do dowolnych jej elementów. Zmiana położenia nie jest przypisana wyłącznie elementom nośnym. Znaczna większość obiektów klasyfikowanych jako kinetyczna architektura korzysta z takich rozwiązań wyłącznie w elewacji[47], lub wyposażeniu wewnętrznym[48]. Przede wszystkim kinetyka nie musi odpowiadać na zewnętrzne bodźce. Może być nimi sterowana w sposób bezwładny. Oznacza to, że ruch jest pewną formą autoprezentacji nie wpływając na sposób użytkowania obiektu[49]. Adaptacyjność z kolei oznacza zdolność dostosowywania się

do bodźca. Może nim być dowolny mierzalny parametr jaki oddziałuje na stan obiektu lub sposób jego użytkowania. Adaptacją nazwać można jednocześnie proces biernego poddawania się struktury bodźcowi. Jest to szerokie spektrum możliwości modelowania ruchu, w którym zawiera się również responsywność. Równolegle do responsywności wyodrębnić można interaktywność, która jest uzyskaniem przez system możliwości odpowiedzi na działanie użytkownika lub bodźca zewnętrznego. W adaptacyjności nie są potrzebne systemy pomiarowe. Aparaturą wystarczającą jest wszystko to co pozwala na realizację zadać zleconych przez użytkownika[50] . Ostatecznie architektura responsywna stanowi najnowszy typ architektury rozwinięty dzięki miniaturyzacji elektroniki i powszechnemu dostępowi do układów scalonych. Charakteryzuje się ona zdolnością wygenerowania odpowiedzi na bodziec zewnętrzny. Odpowiedź ta wynika zawsze z obranego systemu automatycznego sterowania co oznacza, że nie może być prostym wynikiem oddziaływania czynnika na strukturę. Zawsze pozostaje wymagającą wkładu energetycznego odpowiedzią struktury wygenerowanym w wyniku analizy danych wejściowych. Forma i skala odpowiedzi wynika z indywidualnych cech danego systemu, lecz zawsze wymaga dodatkowego wkładu energii zewnętrznej. Architektura responsywna jest zdolna do ciągłego pomiarowania środowiska w jakim się znajduje, analizowania danych i reagowania na bodźce i zmiany otoczenia [29], [45], [51]. Wydzielenie jej spośród pokrewnych dyscyplin formalizuje się poprzez autonomiczność zachowań, która może być stopniowana [19] oraz celowość ruchu, która musi stanowić odpowiedź na bodźce zewnętrzne nie pozostając jedynie bierną wynikową zmiany otoczenia jak w przypadku realizacji Blur autorstwa Diller Scofidio i Renfro [52].

Architektura responsywna wraz z rozwojem technologii formalizując się kolejnymi realizacjami przeszła typowe przemiany z upraszczających zagadnienia techniczne, choć nadal skomplikowanych idei architektów, do znacznie trudniejszych w realizacji, lecz prostszych w działaniu modeli interdyscyplinarnych [53], [54]. Obecnie projekty reagujące na bodźce zewnętrzne zmianą kształtu stanowią nieproporcjonalnie małą część architektury responsywnej zdominowanej przez formy elewacyjne. Wśród przypadków responsywnej konstrukcji dominują struktury tensegrity [45]. Reprezentatywne konstrukcje responsywne o w pełni sztywnych układach konstrukcyjnych stanowią nową oraz małą grupę obiektów nakreślającą kilka podstawowych problemów modelowych dziedziny. [38], [39]. Ich realizacje i podejścia projektowe stanowią każdorazowo silnie zindywidualizowany proces. Przez wynikający z tego faktu brak analogii trudno jest odnajdywać powiązania i dokonywać porównań pojedynczych obiektów, często przełamujących barierę architektury, stając się architektonicznym rozwiązaniem maszyny [54]. Pod koniec XX wieku systemy badania i zabezpieczania obiektów podczas dynamicznych obciążeń stanowiły osobną dziedzinę, lecz sposoby pomiarów pozostały podobne w przypadku struktur responsywnych. Czujniki indukcyjne, pomiary laserowe, tensometry w powszechnym użyciu tworzyły wystarczająco niezawodne systemy pomiarowe, lecz rosnące wymagania bezpieczeństwa wymuszały nadmiarowość aparatury. Cecha ta przeniesiona została z czasem na płaszczyznę responsywności.

1.2.5 Wzrost kompleksowości badawczej, pierwsze struktury

W latach 90tych coraz powszechniejsze stawały się komputery prywatne, a dostęp do nich zwiększał się w tempie wykładniczym. W wyniku upowszechniania technologii przystępowano do tworzenia pierwszych grup badawczych architektury responsywnej w odniesieniu do struktury nośnej. Najwcześniejszym modelem w pełni przynależnym do badanej dziedziny był obiekt opisywany w [55]. Model pozwalał na dostosowanie obiektu w celu zwiększania bezpieczeństwa podczas wyjątkowych przypadków obciążeniowych. Kontrola ta jednak nie opierała się o zmianę geometrii lecz o aktywne systemy tłumienia i usztywniania obiektu. Oba problemy były nietrywialne co wyodrębniało dziedzinę naukową skupioną na sposobach kontroli strukturalnej obiektu [56]. Rozwój systemów od lat 70tych trwał najintensywniej do lat 2000. Kiedy to dziedzinę, a następnie branżę zdominowała prefabrykacja i modularność, a tworzenie i zarządzanie systemami zaczęło stanowić osobną specjalizację [57]. Mając jednak możliwość ingerencji systemem bezpośrednio w strukturę

nośną proponowano szereg odmiennych sposobów kontroli. Na początku lat 2000 na cele badań zdolności modelu do zmiany geometrii w czasie użytkowania obiektu przygotowano modularny model badawczy w formie cięgien i prętów silnie osadzony klasyfikacyjnie w kategorii tensegrity [44]. Mimo iż koncepcja statycznych struktur tensegrity powstała w 1969 roku wraz z realizacją „Needle Tower" przez Kenneth'a Snelson'a dopiero model autorstwa zespołu badawczego Kristina Shea, Etienne Fest i Ian F.C. Smith zaimplementowali ruch w czasie użytkowania. Sama zmienność struktury nie nosiła znamion innowacyjności. Z opisu charakteru tensegrity zdefiniowanego przez R.B.Fullera ***„wyspa ściskania w morzu rozciągania"*** [23] wnioskować można pewną niestałość struktur przedstawianą następnie w patencie [58], lecz pierwsze badania użycia cech tensegrity do stworzenia modelu o zmiennej geometrii sięgają wczesnych lat 2000. Obiekt złożony z 3 podstawowych modułów tensegrity liczących po 6 prętów i 24 cięgna uformowany w układzie centrycznym wsparty na 3 podporach stanowił jeden z pierwszych przykładów architektury responsywnej dostosowującej geometrię w odpowiedzi na zmiany obciążeń zewnętrznych. Pierwsze badania skupiały się na ogólnej ewaluacji sprawności i precyzji dostosowywania sił sprężających cięgien [59], co stanowić miało podstawę do sterowania kontrolą odkształceń na dalszych etapach prac. Struktura oparta była o prosty system mierzący obciążenia przykładane w dyskretnych miejscach struktury stanowiących węzły. Z czasem badaniom podlegały również efektywniejsze wersje oprogramowania kontroli struktury pozwalając w 2008 roku na przystąpienie do badań kompensacji niedokładności wykonawczych oraz degradacji struktury w czasie rzeczywistym z zastosowaniem systemów korekcyjnych [54]. Systemy cięgnowe oraz prętowe stanowią najprostszą formę ustrojów pod względem implementacji responsywności na zewnętrzne obciążenia. Jasny podział na węzły oraz pręty bądź cięgna, przykładanie sił wyłącznie w węzłach upraszczały znacząco systemy kontroli struktur oraz sterowanie nimi. Pierwsze algorytmy sterowania wykorzystane w modelu oparte były o iteracyjne metody dynamicznych relaksacji struktury w celu ujednolicenia naprężeń i niwelowania przemieszczeń. Translacje również mierzone wyłącznie w węzłach stanowiły dalsze uproszczenia w konsekwencji pozwalając na uzyskanie modelu o skrajnie zredukowanych ograniczeniach uzyskiwanych geometrii i złożonościach strukturalnych[59]. W kolejnych latach Tensegrity zastępowano stopniowo przez modele w pełni sztywne topologicznie jako kratownice przestrzenne oraz płaskie.

Dyskretne struktury z czasem zyskiwały na liczbie publikacji i opracowań sposobów kontroli geometrii i naprężeń, lecz zauważalny był wciąż brak badań skupionych wokół modeli płytowych, czy powłokowych. Niszę tę w 2012 roku rozpoczął wypełniać projekt Stuttgart Smartshell będący prototypową strukturą powłokową wykonaną z 5 warstw drewna klejonego krzyżowo, wspartą w 4 narożach podporami uzyskującymi zdolność ruchu we wszystkich kierunkach w układzie przestrzennym[53]. Model korzystając z nowoczesnych technik pomiarowych i rozbudowanego aparatu obliczeniowego mógł w czasie rzeczywistym nie tylko generować responsywność w postaci ruchów redukujących ugięcie modelu, lecz również agregować dane na cele przetwarzania rozbudowywanych na bieżąco baz danych [60]. Struktura wykorzystywała uczenie maszynowe. Mimo iż czyniła to w ograniczonym stopniu stanowiła jeden z pierwszych przykładów modeli responsywnych korzystających z opisanego rozwiązania. Wszystkie modele responsywne charakteryzują się znaczną kompleksowością budowy jak i problematyki ruchu oraz modelowania i dalej projektowania struktur. Wraz z postępem badań nad Stuttgart Smartshell zdolność ruchu i szybkość odpowiedzi systemu przestawały dla jednostki stanowić dominantę badawczą. Optymalizacja modelu ukierunkowana została na systemy pomiarowe oraz lokalizację zredukowanej liczy siłowników [61], co podobnie jak w przypadku systemów SMS stanowiło wyzwanie maksymalizacji danych przestrzennych i fizycznych przy minimalnych kosztach agregacji i przetwarzania danych. Wszystkie działania badawcze orientowane były na wzrost efektywności architektonicznej. Postępująca optymalizacja modelu pozwalając na znaczne redukcje nakładów na realizację i obsługę modelu argumentowała określenie jej indywidualnego typu struktur jako „ultra-

lekkich"[4]. Mimo iż określenie znane było wcześniej odnosiło się głównie do mieszanek betonowych i ich klasyfikacji masowej [62]. Stuttgart Smartshell zdefiniował pierwszy spośród parametrów porównawczych modeli architektury responsywnej jakim była redukcja masy modelu względem analogicznych statycznych modeli.

Rozwój dziedziny widoczny był w formowaniu grup badawczych operujących na pojedynczych modelach w celu prowadzenia badań prowadzących do podnoszenia efektywności w rozbudowującej się puli zagadnień. Początkowy problem wprowadzenia ruchu szybko wypierany był przez elementarne zagadnienia jak lokalizacja czujników, przetwarzanie danych systemów monitorujących [63], optymalizacja czasu pracy algorytmów sterowania, redukcja nakładów energetycznych [64], czy redukcja liczby elementów pozwalających strukturom zachowywać pełną funkcjonalność [65]. Począwszy od ruchu elementów nośnych stopniowo badano możliwości wzrostu efektywności modeli poprzez analizę i dostosowywanie kolejnych funkcji i cech modeli. Zmiana położenia węzłów kontrolowana zmianą długości prętów[66], [67], czy dalej opracowanie algorytmów deterministycznej zmiany geometrii[68], a następnie formułowanie sposobów obliczania efektywności w postaci dyskretnych pojedynczych wynikowych wskaźników [69] w sposób skokowy podnosiły efektywność koncepcji i modeli. Od roku 2017 głównie Gennaro Senatore rozpoczął badania fizyczne zdolności zmienności geometrycznej kolejno dużych zmian formy i dalej małych zmian redystrybuujących naprężenia [70]. Realizacje jak ***„Infinitelly Stiff Bridge"*** [71] nakreślały konieczność zupełnie odmiennego od dotychczasowego podejścia do ewaluacji struktur responsywnych gdzie naprężenia i ugięcia pozostają dynamicznymi zmiennymi nawet dla statycznych przypadków obciążeniowych, a ich pomiar musi uwzględniać czas i wykorzystanie algorytmów sterujących dla stworzenia niezbędnego kontekstu generowania odpowiedzi. Mimo realizacji fizycznych modeli zastosowanie responsywności wyraźnie ograniczone pozostawało do wyłącznie dyskretnych struktur poza wymienionym Stuttgart Smartshell. Nisza kształtowania responsywności struktur powłokowych i tarczowych zaczyna być wypełniana dopiero współcześnie, a badania jak [72], czy [73] i [74] pozostają pionierskie w dziedzinie architektury responsywnej. Odmiennym podejściem do zagadnienia struktur monolitycznych charakteryzuje się grupa naukowa D1244 stworzona w celu realizacji pierwszego pełnoskalowego modelu struktury responsywnej zmieniającej geometrię w odpowiedzi na zmienne obciążenia zewnętrzne[75]. Szereg publikacji opisujący przygotowania, teorię ruchu, realizacje struktury, sterowanie zmiennością geometryczną i ewaluację wyników jest obecnie opracowywany dostarczając informacji na temat najnowocześniejszych rozwiązań pomiaru, ruchu i kontroli w architekturze responsywnej.

1.3 Główne obecne kierunki badań responsywności strukturalnej

Od początków komputeryzacji to w miniaturyzacji i funkcjonalności doszukiwano się najszybszego i najwyraźniejszego rozwoju. W architekturze początkowo miała ona pomóc w efektywniejszym, szybszym i tańszym projektowaniu oraz dalej zarządzaniu obiektami [76]. O ile projektowanie wraz ze zdefiniowaniem BIM-u i jemu pokrewnych określeń wyznaczało jasny i zrozumiały kierunek postępu, o tyle zarządzanie przechodziło liczne przemiany i obecnie znajduje zastosowanie w bardzo zróżnicowanych dziedzinach architektury i architekturze pokrewnych. Wraz ze współczesnymi zmianami procesu projektowego rozpoczęto orientować komputeryzację architektury w kierunku ekologiczności. Automatyzacja i podążająca za nią optymalizacja wyznaczyły najpierw redukcję materiału jako cel ekologiczny, a następnie racjonalizację kolejnych etapów realizacji budynków jak transport, produkcja, czy przygotowanie półproduktów. Po przeciwnej stronie tego procesu znajduje się bezpieczeństwo konstrukcji według przepisów realizowane jako nadmiarowa ilość materiału przy zachowaniu

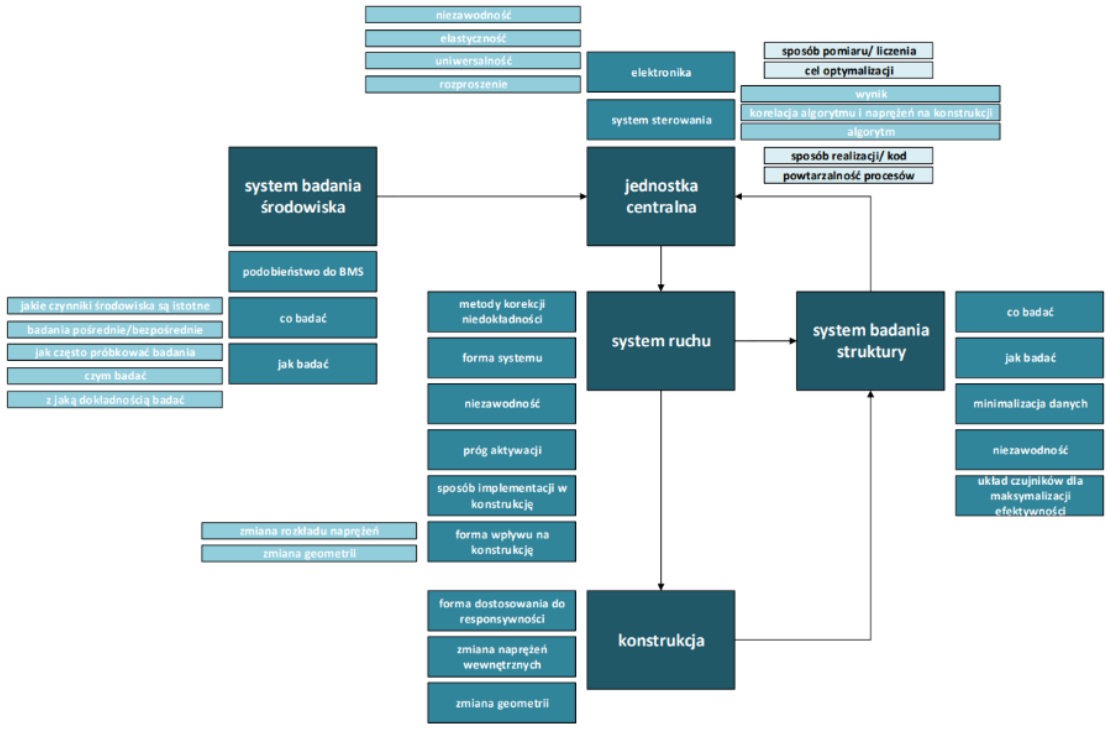
[4] Z eng. ***„ultra-lightweight"*** – określenie konkretnego rodzaju struktur przestrzennych[199]. W architekturze responsywnej odnoszące się do modeli zdolnych przenosić deklarowane obciążenia wyłącznie przy zastosowaniu zmienności geometrycznej[125].

bezpiecznego poziomu wykorzystania materiału [77], [78]. Dualizm ten wytworzył nową niszę badawczą, której rozwiązania pozwoliłyby na uzyskanie bezpieczeństwa użycia architektury i pełnej jej efektywności przez dłuższy lub cały okres użytkowania. Celem obecnej architektury responsywnej ze względu na konieczność znalezienia optimum obu warunków jest minimalizacja energii i materiału na cele spełniania wymagań projektowych [64], [68], [73], [79], [80]. Redukcja energii wbudowanej która przez znaczną część życia obiektu jest przewymiarowana i uzyskanie bardziej wytężonych przekrojów, które w sytuacjach ekstremalnych przeciwdziałają chwilową małą energią ruchu, a nie permanentną znaczną energią wbudowaną otworzyło ścieżkę rozwoju architektury responsywnej [53], [73], [79], [81], [82], [83], [84], [85]. Rozwiązanie to czerpie ze znanych już wcześniej analiz stopnia zrównoważenia architektury. Realizowane wcześniej poprzez zmniejszanie masy struktury lub wskaźników zanieczyszczenia środowiska poprzez redukcję emisyjności, w architekturze łączącej się trwale z mechaniką i mechatroniką wykorzystuje dodatkowy wymiar czasu, bez którego analiza dowolnej responsywnej struktury pozostaje całkowicie niemiarowa. Mimo iż niedoskonały parametr redukcji masy struktury responsywnej względem analogicznej statycznej formy wymaga znalezienia z czasem bardziej uniwersalnych alternatyw, to jest obecnie najczęściej wykorzystywany do weryfikacji opłacalności dalszych badań. Podejście tej zradykalizowanej formy zmniejszania wagi struktury stało się przyczynkiem do wyewoluowania nowego określenia bardziej efektywnych struktur ultra-lekkich. Określenie bardziej odnosi się obecnie do typów struktur niż do celowości implementacji responsywności. Struktury takie pozostają ultra-lekkie, lecz mogą być modelowane i realizowane oraz zarządzane w bardzo zróżnicowany sposób. Dobór odpowiedniego zakresu ruchu modelu, opracowanie systemu kontroli zmian geometrii w celu zabezpieczenia przed nieosiągalnymi geometriami, systemy zabezpieczeń na wypadek sytuacji wyjątkowych oraz przeciążeń struktur stanowią fundamentalne wyzwania każdego obiektu architektury responsywnej. Szereg badań rozszerza pulę problemów badawczych o redukcję liczby siłowników, szybszą responsywność modeli, czy efektywniejsze generowanie form docelowych geometrii [86].

1.3.1 Elementy systemu ruchu w strukturze responsywnej

Każda struktura responsywna złożona jest z kilku podstawowych elementów wymaganych do uzyskania pełnej funkcjonalności. Zgodnie z teorią [55] jest to system pomiaru środowiska, elementy statyczne struktury nośnej, elementy ruchome nośne, jednostka obliczeniowa i sterująca, model zachowania oraz system kontroli statyki struktury. Możliwe jest łączenie między sobą niektórych systemów, lecz zawsze struktura responsywna pozostaje realizacją interdyscyplinarną, której częściom składowym da się przypisać wszystkie wymienione funkcje. Pełne zestawienie elementów struktury responsywnej przedstawiono na Grafika 1. Systemy pomiarowe pozwalają na uzyskanie przez strukturę pewnego stopnia zdolności poznawczych potrzebnych do rozpoznawania parametrów środowiska wpływających na formę reakcji. Ta ogólna definicja nie określa nigdy jakie dane potrzebne są aby w minimalny lub pełny sposób operować strukturą. Jednocześnie w części przypadków responsywności systemy pomiaru środowiska oraz samej struktury mogą być tożsame i wynika to z logiki modelowania obiektów oraz użycia samych systemów. Systemy te ulegały zmianom na przestrzeni lat wraz z postępem technologicznym i opisane będą w dalszej części pracy. Struktura nośna każdego modelu pozostaje nierozerwalna z elementami odpowiadającymi za ruch. W celu uzyskania statyczności modelu po każdorazowej zmianie geometrii konieczne jest wydajne połączenie obu elementów. Mogą przyjmować one różny stopień złożoności, a ich kształtowanie mimo znacznej niszy badawczej obecnie nie jest eksplorowane. Najważniejszym spośród teoretycznych elementów pozostaje model zachowań. Stanowi on główny i często jedyny sposób sterowania strukturą. Służy on analizie danych zbieranych z czujników tak otoczenia jak i czujników struktury, doboru odpowiednich reakcji na podstawie analizy oraz kontroli zmiany formy modelu i reagowania w przypadku wystąpienia niedokładności. Oznacza to, że model zachowań w największym stopniu odpowiada za efektywność. Najczęściej wzrost efektywności architektonicznej w architekturze responsywnej realizowany jest obecnie poprzez podniesienie walorów pracy modeli zachowań. Algorytmy ruchu oparte są o różne zagadnienia teoretyczne, działają z różną

skutecznością i wymagają indywidualnych mocy obliczeniowych na cele szybkiej realizacji obliczeń odpowiednich reakcji geometrycznych. Algorytmy te stanowią główny temat niniejszej pracy.



Grafika 1.Schemat blokowy elementów składowych struktury responsywnej. W zależności od stopnia złożoności modelu liczba podsystemów i elementów może ulegać rozwinięciu ilościowemu, lecz nie jakościowemu.

1.3.2 Modele zachowań struktur responsywnych

Jeszcze u schyłku XX wieku rozpoczęto wdrażanie programów zarządzania komputerowego strukturami. Od początku wiodącymi ścieżkami rozwoju zostały sieci neuronowe [2] i logika rozmyta[5]. Różne opracowania w odmienny sposób podchodzą do kwestii stopniowania autonomiczności struktur, choć w większości przypadków skupiają się na zdolnościach do zarządzania, przewidywania i planowania zmian geometrycznych [33].

Modelowanie ruchu różnicować można ze względu na sposób realizacji redystrybucji naprężeń i niwelowania ugięć. Istnieją dwa podstawowe sposoby podziału zmienności geometrycznej. Pierwsza polega na zmianie rozkładu sił w elementach poprzez duże zmiany geometryczne [67] pozwalające na przemieszczanie węzłów względem podpór oraz między sobą wzajemnie. Struktury takie wymagają znacznych nakładów energetycznych na ruch[68] i stanowią rozwiązania o małej efektywności w porównaniu do innych, nowszych rozwiązań. Druga obecnie najczęściej badana z kolei wykorzystuje przesztywnienie struktury w celu redystrybucji naprężeń poprzez wprowadzanie sztucznie wytwarzanych sił rozciągających lub ściskających poprzez teleskopowanie siłowników [83]. Jest to technika małych zmian geometrii. Oba systemy oparte są o te same zasady ruchu lecz ruch egzekwowany jest w celu pośredniego lub bezpośredniego wpływu na rozkład sił.

[5] Logika rozmyta (z eng. ***„fuzzy techniques”/”fuzzy logics”***). Jest to forma logiki wielowartościowej, w której rolę wartości pełni całe spektrum w przedziale od 0 do 1 zamiast wyłącznie dwóch wartości skrajnych. Z jej wykorzystaniem łatwiej systemom elektronicznym naśladować funkcje decyzyjne przynależne organizmom żywym. [33]

Oba te zjawiska da się kontrolować w obrębie pojedynczej struktury jednocześnie, lecz sposób operowania i rezultaty będą różne w zależności od stopnia wyznaczalności statycznej konstrukcji[66], [87]. Na podstawie tej formy realizacji responsywności można określać odmienne cele. Wzrost sztywności struktury [84], czy redukcję energii całkowitej [33]. Na przełomie wieków XX/XXI dało się zauważyć tendencje prób implementacji ruchu w celu spełnienia wymagań norm budowlanych [88]. Z czasem jednak odchodzono od tego podejścia jako zbyt złożonego na początkowym etapie badań określając cele bardziej elementarne jak redukcja maksymalnych naprężeń[89].

Najwyższym stopniem rozwinięcia responsywności według W. Zuk jest heurystyczne samodzielne uczenie sterowania konstrukcją przez nią samą [19]. Obecnie żadne z opisywanych modeli i uwzględnionych prac nie pochyla się nad rozwojem tego zagadnienia. Co więcej wszystkie prace badają ruch konstrukcji w pojedynczych przypadkach obciążeniowych co sprowadza systemy responsywności do układów dostosowywalnych każdorazowo do indywidualnych konstrukcji, mimo iż algorytmy podzielić można na budowane na przypadkach obciążeniowych oraz na deterministycznych zasadach zachowania. W przypadku pierwszych odpowiedź bazuje na pewnej liczbie reakcji predefiniowanych [74], [90], [91], podczas gdy inne korzystając z algorytmów zachowań konstrukcji są zdolne samodzielnie znajdować rozwiązania [64], [68], [84]. Podział ten jest subiektywny, lecz bazuje na określeniu pewnych granic czasu wymaganych na przeliczenie pojedynczej reakcji co definiuje możliwość samodzielności[6] odpowiedzi systemu w czasie rzeczywistym [87].

Znaczna część opracowań w mniejszym lub większym stopniu zauważa potrzebę wyznaczenia optimum między strukturą responsywną a statyczną. Poszukiwanie efektywnej wartości jako prostsze do wykonania na rzeczywistym modelu prezentuje metodę wyznaczania uśrednionej wartości responsywności [33], [51], lecz kompleksowe podejście w tej materii oznacza włączenie optymalizacji do funkcji zmiany kształtu, czyniąc z niej integralną składową poszukiwania metod ruchu [64], [68], [87]. Oznacza to konieczność poszukiwania geometrii wyjściowej modelu tak aby dowolny ruch zużywał minimalną ilość energii. Co więcej dowiedziono, że funkcja zdolności ruchu w zależności od liczby siłowników dla struktur określanych jako sztywne posiada optimum, wynikające ze znacznej dysproporcji czasu występowania sił wyjątkowych do stopnia zabezpieczenia konstrukcji [33], [64]. Problem ten nie dotyczy projektów określanych jako półaktywne i pasywne [9]. Determinuje to znaczne uproszczenie zachowań konstrukcji ale zmniejsza znacząco złożoność badań.

Optimum należy dla struktur responsywnych znajdować również na styku niezawodności oraz oszczędności. Zabezpieczenie systemów ruchu, zwiększanie zakresu bezpieczeństwa użytkowania są znacznie bardziej złożonymi zagadnieniami niż dla struktur statycznych ze względu na konieczność sterowania elektroniką i mechaniką obiektu oraz koniecznością operowania analizą statyczną w ruchu. Finalnie bezpieczeństwo należy zapewnić na wielu polach implementacji ruchu i projektu konstrukcji [92] . W celu zapewnienia bezpieczeństwa coraz powszechniej stosuje się rozdzielne systemy pomiarowe indywidualne dla pomiarów środowiska i dla samej struktury. Podział ten umożliwia rozbudowę systemu kontroli tak, aby móc minimalizować niedokładności wykonawcze ruchów [66]. Z czasem każda struktura ruchoma podlega zjawisku rosnących niedokładności. Utrata precyzji jest bezpośrednim następstwem skwantyfikowanej natury sterowania. Dowolnie gęste próbkowanie ruchu siłowników nadal generować będzie niedokładności co wymusza dla uzyskania satysfakcjonującej precyzji systemów zewnętrznych układów kontroli ruchu [93].

[6] Samodzielność reakcji przytaczana w odniesieniu do liczby modeli zachowań wymaganych do sterowania strukturą. Modele sterowane pewnym stopniem losowości nigdy nie mogą być samodzielne, ponieważ nie dają gwarancji konkretnego czasu potrzebnego na uzyskanie odpowiedzi geometrycznej.

Pierwsze algorytmy orientowane były na najprostsze wymagania – redukcji masy przy zachowaniu granicy naprężeń. Głównym czynnikiem jako naleciałość dawnej trywialnej imaginacji samoświadomych urządzeń architektonicznych było ograniczenie obliczeniowe napędzane brakiem uproszczeń w kluczowych elementach konstrukcyjnych [88]. Wydajność metod obliczeniowych z czasem zaczęła spotykać się z rosnącymi możliwościami obliczeniowymi i coraz dokładniejszą analizą przy zachowaniu rozsądnych uproszczeń symulacyjnych.

W symulacjach oraz obliczeniach realistycznie przyjmuje się, że siłowniki pracują liniowo. Fakt ten implikuje jednak znaczne konsekwencje, ponieważ jedynie kwantyfikacja ich wysuwu umożliwia zbadanie choć części potencjalnych rozwiązań [33]. Ilość siłowników przemnożona przez ilość stanów wysuwu osiąga nadal wartości uniemożliwiające przeliczenie wszystkich układów w czasie rzeczywistym. Dobrą praktyką jest dyskretyzacja teleskopowanego pręta w celu uzyskania wymiernej liczby przypadków [64]. Analogiczny iteracyjny charakter wykorzystuje się w realizacji ruchu. Od lat 90-tych zauważano potrzebę przyspieszenia poszukiwania rozwiązań geometrii i zachowań konstrukcji poprzez pewną formę nauki systemu zazwyczaj opieraną o sieci neuronowe i uczenie maszynowe z nadzorem [33]. Dodatkowym rozwiązaniem zmniejszającym ilość przeliczanych stanów jest prowadzenie badania poszukiwania formy zaczynając od minimalnej energii stopniowo rozszerzając pulę coraz bardziej złożonych rozwiązań ostatecznie otrzymując pierwszą najniższą energetycznie ścieżkę zmiany geometrii [83]. Wszystkie te algorytmy jednak nie dają pewności uzyskania wyniku w określonym czasie. Nieliczne prace poruszają temat nieliniowości zachowania struktur podczas zmiany geometrii między dwoma docelowymi układami [84], [94], [95], a rozsądnym uproszczeniem pozostaje iteracyjne podejście do ruchu dzielące geometrię wejściową od wyjściowej na odpowiednio małe segmenty [64]. Zauważalne jest jednak jak duże odchylenia a nawet przekroczenia wymagań wytrzymałości występują podczas zmiany geometrii miedzy dwoma kolejnymi docelowymi formami struktury [83]. Układ jest nieliniowy dla dwóch sąsiednich odcinków, lecz pozostaje stały podczas ruchu wzdłuż pojedynczego odcinka. Możliwe jest również podejście linearyzacji pracy struktury ale przy założeniu pewnego rozbudowania formuł matematycznych dla upodobnienia do zachowań nieliniowych. Takie nieliczne modele kosztem precyzji starają się wprowadzić szybsze reakcje do konstrukcji- w czasie rzeczywistym [68]. Nawet dla stosunkowo prostych modeli z ograniczonymi modelami ruchu dyskretyzacja pozwala na wprowadzenie dodatkowych funkcjonalności w modelu ze względu na znaczną redukcję nakładu na opracowanie algorytmu ruchu.

1.3.3 Fizyczne systemy pomiarowe

Większość systemów odpowiedzialnych za monitorowanie geometrii konstrukcji czerpie z układów HMS[7][45]. struktury o prostszej budowie i metodzie wprowadzania ruchu korzystają z rozwiązań aktywnie stężanych rusztów [51]. Opracowanie [44] podaje, że naturalnym rozwinięciem systemów HMS są struktury adaptacyjne. Wszystkie one jednak wymagają uwzględnienia możliwości zniszczenia, co implikuje konieczność projektowania ponadwymiarowej liczby czujników i stanowisk pomiarowych. Projekt powinien zakładać możliwość zniszczenia dowolnego pojedynczego stanowiska pomiarowego bez krytycznego wpływu na dokładność pomiarów całej konstrukcji [96]. Już pierwsze realizacje i koncepcje responsywności zakładały wykorzystanie sztucznej inteligencji w systemach responsywnych w celu przyspieszenia poszukiwania rozwiązań oraz znajdowania efektywniejszych geometrii docelowych [33], [97], [98]. Obecnie zauważa się przejście z komputerowo sterowanej zmiany geometrii do sztywnych algorytmów, w wyniku czego sztuczna inteligencja, logika rozmyta, sieci neuronowe stanowią rozwiązania w sferze poprawy rozpoznawania bodźców środowiska i poprawności reakcji konstrukcji.

[7] HMS – (eng. „Health Measurement System) - Systemy kontroli geometrii często określa się jako wywodzące się z SMS lub tożsamych HMS [33]

Większość technik pomiarowych korzysta z metod pośredniego pomiaru co może doprowadzać do niedokładności[8]. Dotyczy to pomiarów położenia z wykorzystaniem akcelerometrów, wysuwu siłownika enkoderem zliczającym kolejne kroki, czy przykładane siły lub sumowanej energii całkowitej.

Dla zdecydowanej większości struktur określone są dwie granice ich użycia. Pierwsza odnosi się do wystąpienia maksymalnych naprężeń na elemencie nośnym. Dzięki łatwości bezpośrednich pomiarów tej wielkości fizycznej wszystkie pomiary struktur wykonywane są poprzez bezpośrednio montowane czujniki na strukturze. Konieczne jest jednak ujęcie wystąpienia czujników w budowie struktury ze względu na odczuwalną wielkość i masę czujników względem reszty struktury. Ich obecność w zdecydowanej większości przypadków wpływać będzie na wyniki pomiarów, gdyż czujnikami najczęściej zostają belki tensometryczne [64] lub same tensometry [71], [99], rzadziej czujniki piezoelektryczne [91] Dość stała baza sensorów z tensometrami jako główną metodą pomiaru nie są jednak regułą. Do badań skupionych w pierwszej kolejności na redukcji drgań z sukcesem stosuje się akcelerometry [63]. Opracowanie [99] zwraca uwagę na dryf pomiarowanych w ten sposób wartości proponując stosowanie filtrów poprawiających dokładność. Problem ten nie dotyczy jednak modeli korzystających z bezpośrednich technik lub tych które posiadają stały punkt odniesienia [68], [71], [87], [96], choć badanie całego systemu zawsze oznacza użycie osobnego systemu pomiarowania, który ma pewną skończoną precyzję rozpoznawania geometrii. Rosnącą popularność zauważa się wśród systemów wykorzystujących precyzyjne pomiary geometrii, które powiązane są ściśle z drugim ograniczeniem stawianym przed modelami responsywnymi jakim jest dopuszczalne odkształcenie. Systemy pomiarowe geometrii bazują na pomiarach bezpośrednich całej geometrii modelu. Wśród nich szczególnie często wykorzystywane są systemy DIC[9] [71] uzyskujący poprawność rozwiązań na poziomie 97-98% [68], pozwalające na precyzję na poziomie 0,1mm. Pozwala to na określenie odkształceń na całej powierzchni modelu płaskiego lub przestrzennego przy wykorzystaniu większej liczby symultanicznie pracujących kamer. Metoda ta mimo długiego stażu w badaniach naukowych jest stale rozwijana i pozwala coraz precyzyjniej określać odkształcenia. Pośrednio umożliwia również analizę naprężeń [100]. Znając przemieszczenia względne poszczególnych punktów referencyjnych na modelu możliwe jest zdefiniowanie sił wewnętrznych jakie zaistnieć musiały w celu odkształcenia modelu. Zasada ta jest wykorzystywana dla modeli jednomateriałowych przy zdefiniowaniu Modułu Younga [101]. Systemem pozwalającym na precyzyjniejsze, lecz punktowe pomiary są czujniki indukcyjne [102] oraz LVDT [103]. Działając w oparciu o pomiary pola magnetycznego czujniki uzyskują precyzję 0,1um pozwalając na opracowanie systemów wysokiej precyzji lub wspomaganie systemów DIC. Odkształcenia mierzone są najczęściej w sposób nieinwazyjny. Można przyjąć, że nie wpływają na wyniki pomiarów. Wartości ugięć nie definiują funkcjonalności lub zagrożenia użytkowania struktury responsywnej [67]. Stanowią jedynie informację na cele określenia aktywacji systemu kompensacji odkształceń. Wartości dopuszczalnych odkształceń, czyli takich przy których system zgodnie z założeniami funkcjonuje całkowicie sprawnie są różne. Zróżnicowane są one dla odmiennych konstrukcji i określane odmiennie w zależności od charakteru pracy. Dla niektórych struktur wynoszą 1/360 rozpiętości [66], w przypadku innych zawierają się w przedziale od 1/360 do 1/500 w zależności od rodzaju struktury i jej skali [87], a w najbardziej wymagających przypadkach przyjmuje się 1/1000 [64], [68]. Unikatową natomiast dla struktur responsywnych możliwość „nieskończonej sztywności” wykorzystano by zaprojektować quasi-nieodkształcalną strukturę

[8] W metrologii niedokładności te określane jako „dryf wartości” wymuszają uwzględnienie czasu badania przy analizie skali błędu narastającego od rozpoczęcia badania. Jednym ze sposobów jej redukcji jest stosowanie filtrów (np. Filtr Kalmana w redukcji błędu estymacji).

[9] DIC – (eng „Digital Image Correlation”) – Metoda polegająca na wykonywaniu zdjęć odkształcanego modelu w odstępach liczonych w ułamkach sekund lub pojedynczych sekundach i porównywaniu następujących po sobie obrazów. Do analiz można wykorzystywać jedną kamerę w celu uzyskania obrazu płaskiego lub systemu kamer dla budowania przestrzennego modelu struktury w czasie rzeczywistym. Specjalistyczne oprogramowania pozwalają na odpowiednie tempo generowania modeli i obliczanie deformacji struktury z wysoką precyzją.

[51], [71], [74], [104]. Zazwyczaj jednak główna cecha konstrukcji responsywnych czyli oszczędność energetyczna ogranicza przypadki użycia aktywnych systemów pozwalając na swobodne uginanie do granicy odkształceń. Dopiero takie podejście pozwala na uzyskanie efektywności większej niż dla struktur statycznych.

Od początku wprowadzania skonkretyzowanych rozwiązań technologicznych do konstrukcji brano pod uwagę konieczność stosowania dwóch systemów pomiarowych [92]. Wyjątek stanowią tu jedynie proste modele mierzone z użyciem pojedynczych czujników, których charakter jest bardziej edukacyjny aniżeli badawczy [51]. Pierwszy odpowiadający za badanie warunków otoczenia oraz drugi pełniący formę kontrolną poprzez nadzór poprawności reakcji struktury i jej zgodności z oczekiwaniami [46], [71]. W [99] dodatkowo skupiono się na opisie efektywnej wzajemnej walidacji i dosycaniu informacji przez zdwojone systemy [92]. Poprawny dobór i rozkład czujników jest więc kluczowy ponieważ stanowi o poprawności działania konstrukcji. Nie jest możliwe badanie całej struktury z uwzględnieniem wszystkich parametrów statycznych i geometrycznych w czasie rzeczywistym ze względu na przesyt danych dlatego tak ważna jest redukcja i synteza zbieranych danych na przykład poprzez ich dyskretyzację. Zagadnienie lokalizacji czujników rozpatrywane było według różnych metod. Część opracowań korzystała z istniejących rozwiązań [105], inne natomiast proponowały własne rozwiązania jak iteracyjne zmniejszanie liczby czujników poprzez usuwanie zawsze najmniej istotnego [99]. Ponadto ważne jest wartościowanie znaczenia punktów konstrukcji w pomiarowaniu, aby w miejscach znaczących zwiększyć gęstość lokalizacji sensorów [99]. Zauważalna jest wzrostowa tendencja liczby badań w dziedzinie optymalizacji lokalizacji siłowników [89]. Rozwój gałęzi wiedzy pozwolił na potwierdzenie tez, że efektywność modelu responsywnego może występować wyłącznie przy optymalizacji liczby i lokalizacji siłowników, gdyż każda struktura wyposażona wyłącznie w elementy ruchome pozostaje nieefektywna względem modeli statycznych pod kątem nakładów materiałowych i energetycznych na jej realizację [65]. Inaczej jednak aktuatory lokalizowane powinny być dla modeli charakteryzujących się dużymi deformacjami oraz małymi ruchami prowadzącymi wyłącznie do redystrybucji naprężeń [95]. Ruch cięgien z kolei ograniczany do dostosowywania wartości stężenia głównie w strukturach tensegrity nie wymagał redukcji liczby elementów aktywnych. Każdorazowo zakładano, że wszystkie elementy struktury mogą pozostawać aktywne [106].

Kluczowe w wykorzystaniu systemów pośrednich i bezpośrednich wydaje się jednak nadal, aby zachować w wynikach odpowiednie proporcje wytężenia różnych miejsc konstrukcji, w celu umożliwienia określenia zgodności rozkładu sił symulacji i modelu fizycznego [68], [96]. Oznacza to, że ważna pozostaje proporcja wartości względem charakterystycznych punktów struktury. Wartości precyzyjne jako drugorzędne i proste do odniesienia w całej strukturze mogą podlegać badaniu w dalszej kolejności.

1.3.4 Bezpieczeństwo struktur ruchomych

Problem bezpieczeństwa konstrukcji przybiera złożoną postać ze względu na brak możliwości przewidzenia wszystkich układów konstrukcyjnych. Wyznaczanie współczynników należałoby realizować z wykorzystaniem analizy nieliniowej, która w większości opracowań jest upraszczana do zachowań liniowych [51], [63], [73], [99], a jedynie pojedyncze opracowania poruszają zagadnienie z uwzględnieniem problemu przemieszania struktury i elementów układu [64], [68], [84], [104], [107], podkreślając często konieczność dynamicznego uwzględnienia wpływu długości pręta na jego sztywność i wartość krytyczną wyboczenia. W pracy [84] ponadto wykorzystując obie metody porównano ich wyniki określając większą przydatność nieliniowej jako odpowiedniej przy uwzględnieniu jej znacznie większej zasobochłonności na cele symulacji. Niekiedy uproszczenia dotyczą przypadków spornych gdzie nawet struktury tensegrity analizowane są jako liniowe [90]. Podobnie do norm projektowych zabezpieczenie konstrukcji przedstawiono w opracowaniach dotyczących całkowitej energii wbudowanej [64], [71], proponując wykres potencjału wystąpienia danych sił, a następnie wyekstrahowanie górnego 5% centyla przypadków nie uwzględnianych w obliczeniach. Zgodność symulacji z reakcją konstrukcji jest kluczowa dla omawianych struktur,

a pełna sprawność elementów ruchomych ma umożliwiać pracę utrzymującą strukturę w zakresie granic użytkowania [64]. W tym celu trwałość elementów ruchomych określa się najczęściej na 50 lat [71], lecz stanowi to wartość estymowaną dotychczas nie poddawaną badaniom. W [87] wliczano konieczność wymiany i konserwacji do analizy efektywności. Zagadnienie bezpieczeństwa mimo uwzględnienia w kilku spośród omawiany opracowań nie zostało dotychczas zrealizowane na poziomie pozwalającym na wykorzystanie struktury jako budynku. Badania dotyczą wyłącznie kształtowania koncepcyjnego i fizycznych realizacji modeli znacznie odległych od konstrukcji użytkowych [87]. Bezpieczeństwo musi być uwzględnione we wszystkich elementach składowych struktur. W modelu zachowań nie uwzględniono dotychczas zagadnienia dodatkowych algorytmów i sposobów doboru awaryjnych geometrii. Struktura nośna uzyskiwała koncepcje podniesienia bezpieczeństwa przez nadmiarowość. Proponowana w dwóch formach pozwalała na równoległość układu siłowników oraz statycznych elementów strukturalnych, gdzie siłowniki odpowiadały wyłącznie za tworzenie stężeń w samonośnej strukturze [108] lub na nadmiarowość materiału we wszystkich elementach nośnych, aby w razie wystąpienia przeciążenia struktury umożliwić bezpieczną redystrybucję naprężeń między dostępne elementy nośne[109]. Zapewnienie bezpieczeństwa znacząco redukuje z kolei korzyści wynikające z oszczędności nakładów, dlatego też każdorazowo opłacalność modelowania i realizacji architektury responsywnej musi podlegać ewaluacji [69], [70], [87].

Skuteczność algorytmu liczona jest poprzez stopień redukcji materiału [69]. Ta ilościowa charakterystyka wymaga określenia jak duży zysk generowany jest danym algorytmem co wymusza zdefiniowanie minimalnych zysków dla najbardziej newralgicznych geometrii. Zmiana kształtu modelu jest zjawiskiem ciągłym. Jego dyskretyzacja wymaga ostrożnego szacowania dokładności kwantyfikacji przypadków obciążeniowych w celu zachowania jak największej ilości informacji o przebiegach funkcji zysku materiałowego dla wszystkich przypadków [85]. Dla struktur dwuwymiarowych zazwyczaj ilość przypadków potrzebna do racjonalnego oszacowania efektywności [67], [93] pozostaje w realnych granicach czasu obliczeniowego, lecz struktury trójwymiarowe bazują na rosnących przybliżeniach drastycznie zwiększających niepewność pomiarową [68], [80].

Skuteczność poszczególnych modeli zachowań struktur nie jest porównywalna. Efektywność wykorzystania responsywności zależy w sposób złożony od geometrii i skali struktur. Dla odmiennych obiektów inne techniki obliczeniowe w innym stopniu podnoszą efektywność [33].

Drugim zaraz po interdyscyplinarności problemem architektury responsywnej są koszty realizacji. Kwestia testów fizycznych struktur o zmiennej geometrii wymaga znalezienia rozwiązań ruchu w odpowiedniej skali. Zmiana długości prętów, czy przesunięcie podpór pozostając w zakresie symulacji nie dostarcza wystarczających informacji na temat możliwych problemów projektowych konstrukcji rzeczywistych rozmiarów. Często wykorzystywana skala makiet upraszcza wszystkie trudności wykonawcze determinując przeznaczenie takiego modelu jako pokazowego, zamiast doświadczalnego. Proste przybliżenia wymagań stawianych elementom ruchomym często sprowadzają się do skalowania ich wagi, wymiarów, czy ceny proporcjonalnie do masy układu w jakie są wbudowywane [89]. Cały wachlarz problemów objawia się dopiero w momencie wykonywania fizycznych struktur, gdzie symulowany ruch masami dochodzącymi do dziesiątek ton powoduje znaczne niedokładności w zarządzaniu, ruchu i jego zabezpieczeniu. Wizjami, które w czasie badań przeszły z futuryzmu do abstrakcji są rozwiązania biomimikrycznych konstrukcji, najgłośniej promowane badaniami ruchu łusek szyszek [110]. Przykład ten bardzo wyraźnie nakreśla problematykę responsywności architektury. Wraz ze wzrostem skali obiektu rośnie wymaganie precyzji ruchu, powtarzalności i niezawodności [87], [92], a jednocześnie maleje potencjał technologiczny spełnienia tych postulatów. Nominalna nośność siłowników determinowana jest nadal maksymalnymi wartościami obciążeń jakie mogą na nich wystąpić [111], a w całym zakresie ich pracy musimy zakładać równie dobrą pełną skuteczność i precyzję realizacji zadań zmian geometrii.

Większa efektywność systemów responsywnych dla większych gabarytowo i masowo struktur [64] również stoi w konflikcie z możliwościami realizacyjnymi. Większa oszczędność materiału przy większych strukturach wymusza użycie mocniejszych siłowników bardziej zabezpieczających konstrukcję, lecz ruch ten wymaga większej precyzji i niezawodności gdyż wraz ze skalą obiektu rośnie jego elastyczność, podnosi się znaczenie systemu responsywnego i zwiększa proporcja energii użytkowej do wbudowanej.

Niewiele istnieje obecnie podejść opisujących sytuacje awarii systemu ruchu ponad zaznaczenie możliwości wystąpienia takiej sytuacji. Brak rozwiązań w tym zakresie sygnalizuje możliwość istnienia ograniczenia technologicznego, które uniemożliwi dalszy rozwój dlatego pojedyncze próby analizy niezawodności systemów i ich komponentów [92] wymagają szczególnej uwagi i rozwinięcia. Sama analiza konstrukcji wymaga większej precyzji i szczegółowości danych użytkowania niż standardowe pasywne konstrukcje. Surowe wartości obciążeń klimatycznych należy zastępować analizą historii klimatycznej, a ze względu na zmianę rozkładu materiału i energii następują zmiany we wpływie zjawisk na nośność całkowitą konstrukcji. Systemy responsywne według przepisów projektowych nie są odpowiednio dobrze opisane, a zdefiniowanie niezawodności nie ma w przepisach odniesienia do ruchomych struktur dlatego też wraz z rozwojem dziedziny należy zaznaczać potrzebę uwzględnienia responsywności na siły zewnętrzne w prawie projektowym [92]. Z kolei na potrzeby określania bezpieczeństwa konstrukcji należy modelować schematy zniszczeń[10]. Obecne podejścia do projektowania bezpiecznego wykorzystują nadmiarowość jako główną formę zabezpieczenia, lecz jest to podejście tożsame w wynikach ze współczynnikami bezpieczeństwa – wzrost materiału na konstrukcję.

Dobór materiału odnosi się nie tylko do jego wartości ekologicznych, łatwości przygotowania i wytrzymałości ale również wpływu na pracę struktury. Zazwyczaj przyjmuje się materiały o wysokiej sztywności, aby zminimalizować odkształcenia na węzłach. Problem ten dotyczy szczególnie węzłów o największej liczbie połączonych w nich elementów [71].

Publikacje w nierównym stopniu opisują teoretyczne oraz fizyczne rozważania i pomiary konstrukcji. W modelach symulowanych dominowało dotychczas zorientowanie na aspekt programowania ruchu i jego obliczeń efektywności. Zazwyczaj za materiał konstrukcyjny określano jeden ze standardowych gatunków stali [2], [33], [84], [85], [91], choć niektóre realizacje również korzystają z tego materiału powołując się na użycie stali S235JR [68]. Część realizacji wykorzystywała w małoskalowych modelach aluminium [96]. Najbardziej abstrakcyjne podejścia definiujące stopnie swobody zamiast precyzyjnego ruchu nie określały materiałów, a co za tym idzie ciężaru struktury [112]. W badaniach takich najczęściej kluczowe pozostaje poszukiwanie geometrii, a nie sposobów jej osiągania. Założenie siły grawitacji jako równomiernie oddziałującej na całą strukturę pozwala na uzyskanie precyzji obliczeń przy daleko idących uproszczeniach symulacji co pozwala na pomijanie masy elementów w analizach koncepcyjnych.

Według badań wzrost efektywności użycia responsywnych systemów rośnie wraz ze zwiększaniem rozmiarów konstrukcji. Dłuższe mosty [90], wyższe wieże i dłuższe dźwigary kratowe [87] uzyskują niższe zużycie energii całkowitej w porównaniu do statycznych odpowiedników. Nakreśla to nowy problem skalowania samego ruchu tak w wymiarze długości jak i siły. Proste liniowe skalowanie siłowników w odniesieniu do wymaganej siły [66] wiąże się ze znaczną redukcją rzeczywistej problematyki zjawiska wielkoskalowego ruchu. Badania w tym zakresie są wymagane dla potwierdzenia lub zaprzeczenia słuszności tak daleko idących uproszczeń.

[10] Z eng. ***„failure trees”*** (FT) oraz ***„reliability block diagram”*** (RBD) [142].

1.3.5 Rodzaje obciążeń wywołujących reakcje w strukturach responsywnych

Konstrukcje powinny potrafić reagować na wszystkie układy sił zewnętrznych. Każde jednak badania przeprowadzano przy określeniu zakresów rodzajów analizowanych sił [73], [96] predestynując modele do niepełnej puli reakcji i czyniąc je tym samym cząstkowymi, niezdolnymi do samodzielnego reagowania przy pełnej gamie typów obciążeń. W zakres każdej analizy reakcji modeli wchodziły obciążenia długotrwałe, ciężar własny, choć jego udział mógł być eliminowany odpowiednim doborem wstępnej geometrii [64]. Duża część badań omawiała pracę konstrukcji podczas kompensacji drgań [33], [63], [79], [104], część rozszerzała zakres o obciążenia zmienne o niskiej zmienności w czasie jak śnieg [83]. Najbardziej generalne badania zakładały również porywy wiatru oraz ruch ludzi w kilku przypadkach trasowania ruchu [64], lecz wyłącznie dla struktur dyskretnych. Z kolei próby odwzorowania konkretnych sytuacji obciążeniowych jak tłumienie drgań jadącego pociągu wymagało licznych uproszczeń i założeń estymacyjnych realizowanych poprzez uproszczenie przykładanych sił [89] lub pominięcie mniej znaczących w analizie wpływów rozkładu sił i drgań w konstrukcji [79]. Brak jednak obecnie badań skupionych wyłącznie w tematyce definiowania przypadków obciążeniowych, zmienności reakcji modelu w zależności od zmienności obciążeń i typu struktur. Zauważalna jest znaczna nisza badawcza w zakresie analiz ruchów między dwiema kolejnymi geometriami docelowymi. Brak badań określających zachowania struktur w przypadku wystąpienia sytuacji obciążeń wyjątkowych oraz zmiennych o częstotliwości warunków atmosferycznych jak wiatr, czy losowe obciążenie użytkowe.

1.3.6 Symulacyjne metody badawcze

Konstrukcje korzystające z cięgien, czy elementów aktywnie stężanych często klasyfikuje się jako proste w realizacji responsywności konstrukcji [104]. Ich zdecydowaną zaletą jest jednokierunkowe sterowanie podczas rozciągania bez konieczności zapewnienia odpowiedniej sztywności [51]. Można dalej rozróżnić prostsze sterowanie i zarządzanie odkształceniami, które można bezpośrednio mierzyć opisywanymi osobno technikami, oraz bardziej złożone kontrolowanie sił wewnętrznych [74], [104]. Trudność przekłada się bezpośrednio na stopień wzajemnych oddziaływań wszystkich elementów na siebie. Ta z kolei w połączeniu z możliwością sterowania sztywnością predestynuje układy cięgnowe do pracy na oddziaływania sejsmiczne [51], [99], [113] jako układy proste w sterowaniu częstotliwościami własnymi całej konstrukcji, choć podejście to nie jest sztywną regułą [114]. Cięgna służyć mogą również jako sterowanie sztywnością układu na statyczne siły zewnętrzne [112]. Konstrukcje takie jednak muszą stosować pewne uproszczenia jak ciągłość cięgien przez kilka prętów, aby zmniejszyć złożoność ruchu konstrukcji.

Podobną cechą modyfikacji modalnej wyróżniają się elastyczne konstrukcje kinetyczne [63]. W każdej konstrukcji występują pewne niedokładności realizacji ruchu, pewne imperfekcje wynikające z niedokładności pracy systemu oraz nieliniowości jego zachowania skutkującego znacznie bardziej złożonym zachowaniem. W celu minimalizacji błędów stosuje się rozwiązania kompensacji niedokładności np. metodą Newtona-Rhapsona iteracyjnie podnoszącą dokładność realizacji ruchu do uzyskania satysfakcjonująco niskiej niedokładności [84]. Projektowanie konstrukcji wykorzystujących cięgna oraz pręty powinno być przeprowadzane w oparciu o nieliniowe badania [84] i uwzględnienie znacznego zróżnicowania zachowań materiałów. Poruszona kwestia rozkładu sił oraz znaczne przemieszczenia w takich konstrukcjach mogą skutkować dużymi odchyleniami układów przestrzennych od symulacji i obliczeń predykcyjnych [104]. Przejście od koncepcji i prostych analiz do rzeczywistego modelu i jego badań wymaga przewidzenia licznych problemów wykonawczych, często jednak pośrednie prace opisujące przygotowanie do realizacji uwzględniają zbyt wiele zmiennych, z których część w drodze weryfikacji ulega uproszczeniu. Niektóre opracowania jednak ze względu na stopień skomplikowania samego problemu przyjmują daleko idące przybliżenia [79]. W pracy dodatkowo określono odmiennie od innych badań liniową pracę cięgien. Z kolei zyskujące w ostatnim dziesięcioleciu popularność

rozwiązania responsywności struktur ciągłych nadal jeszcze wymagają sprecyzowania metod badawczych, celów oraz poprawy środków wykonawczych. Podczas weryfikacji często wymagają rewizji stopnia sztywności układu w celu racjonalnego kompromisu między wymaganymi siłami aktuatora i masą odkształcanego elementu [73], [74]. Walidacja uzyskiwanych wyników sprowadza się do porównania geometrii symulowanej z otrzymaną w fizycznym modelu. Należy wtedy uwzględnić również niedokładność pomiarów środowiska, geometrii fizycznej konstrukcji oraz dla skwantyfikowanych przypadków stopień zbieżności warunków obciążenia z danymi konkretnego przypadku z wykorzystywanej bazy odpowiedzi geometrycznych [80]. Stanowiące mniejszość konstrukcje niedyskretne jeszcze bardziej od dyskretnych elementów wymagają poprawnej oceny dokładności analizy i pomiarowania, wymuszając liczne przybliżenia.

Duża rozbieżność podejść i możliwości realizacji ruchu w strukturze, nieznaczna liczba dotychczasowych badań i realizacji oraz trudności w modelowaniu symulacji skutkują znaczną różnorodnością skali, użytej technologii oraz uszczegółowieniem modeli i ich systemów prowadzenia pomiarów. Najprostsze systemy uwzględniają jedynie badanie poprawności idei wprowadzania ruchu [51], podczas gdy inne walidują poprawność nowych metod matematycznego opisu ruchu poprzez zastosowanie podwójnych systemów [68], [92], lub bazując na sprawdzonych rozwiązaniach technicznych badają potencjał optymalizacji rynkowej w formie teoretycznych prac [87], oraz na fizycznych strukturach [71]. Nadal jednak najbardziej rozwinięte podejścia modelowe jeszcze nie uwzględniają zbieżności estymacji symulacyjnych energii całkowitej z wynikami rzeczywistymi.

1.3.7 Realizacja ruchu w strukturach responsywnych

Najszerzej stosowaną grupą są systemy cięgnowe. Wykorzystywane w strukturach tensegrity lub podwieszanych konstrukcjach. Należy tu jednak wyraźnie oddzielić architekturę responsywną korzystającą ze zmian geometrii [44] poprzez zmianę długości cięgien [90], od stężania struktury lub sterowania dynamiką stężenia w celu redukcji lub eliminacji skutków wstrząsów i wibracji [79], [115], [116], [117]. Oba systemy mogą dzielić między sobą układy ruchu oraz rozwiązania konstrukcyjne, jednak te drugie, bardzo powszechnie badane [66] nie wpływają na zmiany w geometrii, a starają się modyfikować jej sztywność w celu przeciwdziałania odkształceniom. Częstymi stają się szczególnie w ostatnich latach konstrukcje hybrydowe łączące siłowniki cięgnowe i prętowe. To z kolei prowadzi do rozdzielenia zadań kompensacji odkształceń w różnym charakterze na różne elementy [96].

Lokalizacja aktuatorów dzielona jest na dwa obszary. Najczęstszą metodą jest zastępowanie nimi pojedynczych wyselekcjonowanych prętów w konstrukcji i wprowadzanie ruchu do objętości struktury [54], [64], [71], bądź dla konstrukcji kablowych zastąpienie wszystkich prętów siłownikami [74], [84]. Podejście to opiera się często na dwuetapowym procesie doboru rozkładu siłowników, gdzie kolejno ustala się wydłużenie i przemieszczenie siłowników [64], [118]. Zgodnie z [118] istnieje optimum proporcji między czasem obliczeń optymalnej topologii ułożenia siłowników a zyskami z ich dokładności pracy, gdyż więcej siłowników zawsze skutkuje poprawą precyzji uzyskiwania docelowej geometrii korzystając z różnorodnych technik jak metoda Tanimoto [119]. Żaden jednak z obecnie stosowanych algorytmów nie jest dostosowany do wielkoskalowych struktur. Jedyny algorytm wysokiego stopnia pozwalający na znajdowanie wartości optimum ma składową kombinatoryczną co dyskwalifikuje go z obliczeń złożonych struktur [83] ze względu na iteracyjny charakter pracy uniemożliwiający uzyskanie informacji o czasie generowania odpowiedzi geometrycznej. Do analiz większych obiektów stosuje się hybrydyzację algorytmów [70], [120]. Niektóre opracowania określały odgórnie symetryczność układu siłowników jako rozwiązań najefektywniejszych [90], podczas gdy inne przyjmowały układ siłowników w pełni na podstawie analiz [64], [111]. Odmienne podejście coraz częściej obecnie eksplorowane zakłada sztywność i nieruchomość obiektu, a manipulacja odbywa się ruchem podpór, ich przesuwem i rotacją [53]. Obie metody dają odmienne efekty. Teleskopowe pręty pozwalają na precyzyjniejsze sterowanie kształtem struktury i operacją na lokalnych naprężeniach, lecz

wymaga bardziej złożonej konstrukcji i opracowywania sekwencji ruchów [64], natomiast operowanie podporami daje możliwość ruchu masywniejszych struktur, jednak kosztem mniejszej precyzji i bardziej złożonego układu statycznego wprowadzającego istotny w swej skali aspekt zginania i momentów wywracających. Zależnie od charakteru konstrukcji, podpory powinno cechować odmienne podejście projektowe. Dla konstrukcji o sztywnych elementach należy zapewnić możliwie dużą ruchomość podpory w kontrolowanym zakresie. Każdy dodatkowy wymiar swobody zwiększa swobodę operowania geometrią. W takich układach istnieje małe prawdopodobieństwo wystąpienia sił znacznie przekraczających możliwości podpory. Z kolei występowanie elementów cięgnowych, napinanych, sprężanych [73] wymusza poszukiwanie optimum kątów między kolejnymi elementami. Często dla cięgien wprowadzających dużą niepewność zachowań konstrukcji uproszczeniem jest zaimplementowanie sterowania cięgnem na podporze przy jednoczesnym swobodnym przeciągnięciu przez kilka kolejnych przęseł struktury [112]. Znacznie większe odkształcenia w takich układach mogą skutkować połączeniami na granicy kątów prostych zwiększając siły równoważące w trójkącie sił o nawet rząd wielkości. Dlatego też zapobieganie zjawiskom wyrywania podpór należy równoważyć mocowaniem i materiałami znacznie przewyższającymi projektowane obciążenia jak ma to miejsce w [51], [64].

Operowanie cięgnami ma miejsce również w strukturach powłokowych i płytowych gdzie sprowadzone są one do formy sprężeń [73]. Aktuatory nie biorą bezpośrednio udziału w tworzeniu konstrukcji, lecz mogą wpływać na stopień sprężenia konstrukcji zbrojonego betonu. Wzrasta znacząco stopień złożoności badania takich struktur, gdyż pod uwagę należy brać udział wielu czynników konstrukcji ciągłych. Należy je symulować w bardziej złożony sposób oraz klasteryzować przypadki obciążeń, reakcji i zachowań na cele racjonalizacji ilości przypadków do przebadania, aby zdefiniować algorytm odpowiedzi systemu na zewnętrzne bodźce. Mimo iż grupowanie zmniejsza spektrum badanych przypadków nadal wziąć pod uwagę należy możliwość wykorzystania sztucznej inteligencji i uczenia maszynowego w procesie uczenia systemu kontroli konstrukcji [33]. Odpowiedni stopień syntezy przypadków obciążeniowych i związanych z nimi odpowiedzi geometrycznych stanowi o efektywności struktury.

W opracowaniu [96] zwraca się uwagę na możliwość sytuowania siłowników równolegle lub wzdłuż elementów konstrukcyjnych. Pierwszy układ pozwala na sterowanie jedynie rozkładem sił wewnętrznych w konstrukcji, a siłownik nigdy nie musi przejmować całej siły z pręta. Z kolei w drugim przypadku zawsze pełna wartość siły obciąża siłownik, ale układ ten pozwala dopiero na zmianę geometrii według teorii dużych zmian geometrii [67], [68], [89]. Ponadto w [85] zwrócono uwagę na możliwość zastosowania równoległego połączenia elementów w celu przenoszenia naprężeń od sił dynamicznych pozostawiając obciążenia własne statycznej części konstrukcji.

Rozmieszczenie elementów sterujących często przyjmowane jest a priori [45], [67], [91], [118]. Analiza zagadnienia dowiodła, że topologia aktuatorów ma kluczowy wpływ na efektywność pracy konstrukcji [2], [90] oraz ekonomię i oszczędność energetyczną [92], a lokalizuje się je w miejscach, gdzie ruch wywoła największe reakcje najmniejszym nakładem długości wysuwu [67], [71] lub ogólniej pracy elementu ruchomego [91], [119]. Co więcej szybkość ich pracy ma również znaczenie, a najczęstszą reakcją powinna być praca z pierwszą częstotliwością modalną struktury[64], [73]. Mimo, że umiejscawianie siłowników na cięgnach jest najprostszym rozwiązaniem nie wymagającym obliczania wpływu nowego elementu na wyboczenie to odpowiednio zabezpieczone przed tym zjawiskiem ściskane pręty teleskopowane odznaczają się większą efektywnością [2].

1.3.8 Struktura nośna modeli responsywnych

Zmiana geometrii wymaga wprowadzenia elastyczności lub kontrolowanej zmiany kąta prętów, których ułożenie jest zmienne względem pozostałych komponentów. Dla małoskalowych konstrukcji problem może być rozwiązany mechatronicznie [10], natomiast konstrukcje architektoniczne wymagają rozwiązań mechanicznych charakteryzujących się większą wytrzymałością. Prace oraz serie publikacji często w pierwszej kolejności nakreślają problem postulując konieczność zachowania sztywności na siły zewnętrzne i elastyczności na własne odkształcenia jako odpowiedzi konstrukcji. [74] Postulat ten, przedstawiony ideowo jest realizowany dopiero w nowszych pracach [71].Jedną z metod fizycznego rozwiązania jest stosowanie przegubów Cardana w węzłach [64] znacznie zmniejszającego wpływ wyginania na pręty kratownic. W konstrukcjach prętowych i prętowo cięgnowych zaprojektowanie węzła o zachowaniu zbliżonym do symulacji komputerowej jest prostsze niż wprowadzanie do symulacji zachowań sztywnego węzła dlatego też projektuje się rozwiązania o swobodzie obrotu każdego elementu w każdym kierunku dla zachowania poprawnego rozkładu sił między elementami [107]. Z kolei w strukturach płytowych i powłokowych zbytnie usztywnienie utrudnia analizę ze względu na zmianę rozkładu sił wewnętrznych i zmianę wachlarza niekorzystnych przypadków obciążeniowych [74]. Zawsze dla struktur takich modyfikacja kształtu sprowadza się do małych odkształceń sterujących rozkładem naprężeń w bryle elementu, a nie dostosowaniu geometrii do swobodnego przepływu sił [73]. Częste na przełomie dekady 2010r. rozwiązania cięgnowe lub tensegrity skupiały się na określeniu docelowych stopni swobody węzłów bez rozważań konstrukcyjnych rozwiązań problemu. Cięgna same stanowiąc znaczne utrudnienie w precyzyjnym sterowaniu konstrukcją często podlegały uproszczeniu a w węzłach zamiast kotwienia cięgna decydowano się na ciągłe przeciąganie elementu stężającego nawet przez cały segment konstrukcji jednocześnie [112].

Żadna z omawianych prac w części teoretycznej nie pochylała się nad zjawiskiem złożoności zachowania węzła, a jedynie sporadyczne prace zaznaczały ten problem [12]. Zachowanie rozumiane tu jako ograniczenia obrotu pojedynczego elementu, przesuw lub obrót całego pręta zostały koncepcyjnie nakreślone w opracowaniu [64]. Niektóre prace zakładają mocowanie elementów powierzchniowych w formie podkonstrukcji. Wymaga to zamocowania na przesuwnych elementach montażowych przy zachowaniu sztywności układu dla poprawnego rozkładu obciążeń na węzły mocowania podkonstrukcji [64].

Podpory w omawianych strukturach mogą mieć dwie funkcje. Pierwszą jest tradycyjne przenoszenie obciążeń na grunt lub pośrednio fundamenty, drugą manipulacja ich umiejscowieniem w przestrzeni w celu osiągnięcia zamierzonego efekty w układzie statycznym [80]. W przypadku ruchomych węzłów podpory pozostają sztywne aby stopniem niewyznaczalności statycznej zabezpieczać zmiany geometrii w przewidywany sposób [68], [107]. Dla ruchomych prętów i sztywnej podpory każdorazowo podpory są projektowane jako nieproporcjonalnie sztywniejsze od reszty konstrukcji [64], [68], [107] tworząc dysproporcję między masywnością elementów i podpór czyniąc model nieskalowalnym. Generuje to dalej problem indukowania znacznych naprężeń w miejscach występowania podpór. Duże siły reakcji wywołują naprężenia, które dystrybuowane mogą być wyłącznie przez sztywne zamocowanie. To od sztywności podpór zależna jest efektywność zmiany geometrii konstrukcji, więc zbyt elastyczna metoda mocowania lub niedokładność w jednej płaszczyźnie swobody skutkować mogą trudnościami lub niewykonalnością docelowej geometrii. Z kolei przy sztywności konstrukcji należy zachować ruchomość elementów wsporczych [53].

1.3.9 Sposoby ewaluacji energetycznej efektywności responsywności strukturalnej

Idea możliwości porównywania wyników efektywności różnych konstrukcji między sobą jest naturalną konsekwencją prób walidacji kierunków dalszego rozwoju. Powszechną obecnie metodą jest LCA oraz LCIA [92]. Bazujący na nich trend efektywności pod względem energii użytkowej prowadził do nieproporcjonalnych wzrostów energii wbudowanej wśród struktur responsywnych [82]. Wraz z rozwojem opracowań konstrukcji usprawniających motorykę rozpoczęto wdrażanie kolejnych czynników do analizy struktury. Główną dominantą takich rozważań staje się optymalizacja energetyczna. Wpisuje się ona w nurt architektury zrównoważonej zamieniając część energii wbudowanej na mniejszy jej odpowiednik w formie energii użytkowej [69], [70], [71], [74], [84]. Wiele opracowań, szczególnie wprowadzających koncepcyjne techniczne rozwiązania posługuje się jednolitym wskaźnikiem energetycznej opłacalności MUT[11] informującym jaka część przekroju pracuje podczas statycznego spoczynku struktury[71], [87], [90]. Jest to jednocześnie wskaźnik jak aktywna lub pasywna jest dana struktura w swojej najefektywniejszej formie. Wszelkie obliczenia wykonywane są na podstawie metodologii iteracyjnego dostosowywania konstrukcji. Podobne rozwiązania zauważalne są w innych pracach, lecz wątek ten nie został zdefiniowany gdzie indziej w tak precyzyjny sposób [90]. Metody szacowania energetycznego polegają na określeniu zużycia energii na podstawie teoretycznych zachowań konstrukcji w odniesieniu do badań środowiska w jakim mają się znajdować. Znając więc środowisko w jakim struktura ma funkcjonować prowadzi się badania symulacyjne w ten sposób każdorazowo je indywidualizując. Na podstawie grupowanych reakcji i przypisanych im nakładów energetycznych oraz policzeniu średniego czasu sumarycznych reakcji w okresie całego życia liczy się wynik opłacalności realizacji responsywności w danej strukturze. Algorytmy te wykorzystują metodologię obliczeń ***„Whole-Life Energy”*** (WLE) [70], powiązanego bezpośrednio z (GWP) ***„Global Warming Potential”*** [64].

Odmiennym podejściem, bardziej wpisanym w standardowe metody obliczeniowe jest dostosowanie obliczeń LCA do struktur responsywnych [82]. Na przykładzie Research Centre 1244 grupa specjalistów dostosowała metodologię pomiaru efektywności środowiskowej do obiektów o zmiennej geometrii wdrażając również obliczenia rozwiązań niekonstrukcyjnych jak elewacje czy inteligentne systemy. Seria publikacji zorientowana na redukcję WLE operuje stałym dwuetapowym algorytmem działania konstrukcji. Pierwszy ogólny schemat pracy obejmuje zbieranie danych z sensorów, optymalizację na podstawie zebranych danych oraz minimalizację energii poprzez najefektywniejsze osiągnięcie symulowanych celów. Drugi skupiony jest na kompensacji niedokładności i eksploatacji struktury objawiającym się rosnącym zapotrzebowaniem na energię kinetyczną. Dla zmniejszenia konsumpcji energii dodatkowo dobierany jest stan optymalnego spoczynku struktury. Czasem jest on stanem wstępnego sprężenia elementów jeśli z obliczeń wynika, że przyniesie to korzyść w rozliczeniu energii [71]. Optymalizacja struktury powinna kłaść proporcjonalny nacisk na wszystkie aspekty jej projektu i wykonania. Odpowiedni rozkład siłowników w strukturze gwarantuje maksymalizację efektywności [2], [87], [90], choć częstą praktyką jest odgórne ustalenie topologii elementów responsywnych [84], [118].

Przy walidacji teoretycznych opracowań w formie rzeczywistych modeli implementacja elementów ruchomych wymusza wprowadzanie wielu dodatkowych, nieprojektowanych współczynników bezpieczeństwa odpowiadających za nieprzewidywalność zjawisk dynamicznych, czy nieprecyzyjne rozmieszczenie czujników skutkujące redukcją wartości pomiaru naprężeń [71]. Zagadnienia energetyczne i związana z nimi opłacalność dodają dodatkowy wymiar optymalizacji związany z kosztami wytworzenia energii co poruszane jest i wprowadzane do formuł obliczeń przy wyznaczaniu ekstremum funkcji optymalizacyjnej [66],

[11] Współczynnik MUT (eng. ***„Material Utilisation Target”***) jest pojęciem wprowadzonym przez Gennaro Senatore w szeregu prac na temat struktur responsywnych, wykorzystywanym w analizach potencjału opłacalności wprowadzania responsywności do danego indywidualnego modelu[69].

[71], [87]. Każdorazowo więc optimum musi być przeliczane w odniesieniu do lokalnych stawek cenowych. Zagadnienie to jednak nie leży w zakresie tematycznym pracy.

1.3.1 Systemy badania środowiska

Pierwszym zadaniem struktury responsywnej jest badanie środowiska. Odbywa się ono z użyciem systemu czujników. Badaniu zawsze podlegają siły zewnętrzne [34], [121], lecz dodatkowo badania można rozszerzyć o pomiary nasłonecznienia [122], czy wilgotności [123] zależnie od bodźców na jakie struktura ma reagować. W dotychczas stosowanych rozwiązaniach najbardziej rozbudowanym pozostawał system pomiaru sił. Pomiar wielkości na jakie system ma reagować dla każdego rodzaju struktury wymaga tej samej precyzji. Od dokładności badań parametrów zależy szybkość i efektywność opracowywania modelu zachowań. Im większe pozostają niepewności pomiarowe tym trudniej systemowi rozpoznać zasady doboru reakcji. W celu minimalizacji tego zjawiska należałoby określić maksymalny błąd pomiarowy jako mniejszy niż połowa różnicy wartości sąsiednich w matrycy zachowań.

Przy zachowaniu zależności przypisanie danego przypadku warunku środowiskowego do skwantyfikowanej matrycy warunków środowiskowych nie stanowi trudności i odbywa się automatycznie Przy niezachowaniu zależności dany pomiar można przydzielić do co najmniej dwóch stanów. Przypisanie niewłaściwe skutkuje dalej tak samo niewłaściwym przydzieleniem reakcji zachowania i wyniku uzyskanego wzrostu efektywności. Przy ponownym wystąpieniu danej wartości parametru środowiskowego system reaguje nieprawidłowo i nie uzyskuje spodziewanej efektywności.

2. Cel, zakres i tezy pracy

2.1 Cel pracy

Głównym celem implementacji responsywności w architekturze jest podnoszenie efektywności jej wykorzystania. Responsywność geometryczna efektywność tę osiąga poprzez maksymalizację funkcjonalności struktury przy minimalizacji nakładów na jej realizację i obsługę. Wyznacza to szereg zagadnień jakie mogą podlegać indywidualnym badaniom. Najważniejszym elementem responsywności jest system ruchu. Zalicza się do niego tak system pomiarowy środowiska, samej struktury, układ realizacji ruchu jak i jednostka centralna i przynależny jej program analizy danych i generowania odpowiedzi. Spośród wszystkich składowych elementów najważniejszą i ściśle architektoniczną funkcję pełni model zachowań określający sposób generowania geometrii. On z kolei podlega rozdzieleniu na obliczanie wyników oraz ich realizację. Praca ma na celu przedstawienie szeregu modeli zachowań struktur responsywnych i ewaluację ich działania, przedstawienie sposobu kształtowania modeli zachowań oraz nakreślenie związanych z nimi problematyki. Ze względu jednak na kompleksową zależność efektywności od szerszego zakresu czynników niż sama geometria ruchu zagadnienia poruszane w dysertacji rozszerzone zostały o kształtowanie systemów przestrzennych dla zmienności geometrycznej i topologicznej.

Wybór tematyki motywowany jest obecną znaczną indywidualizacją struktur responsywnych, która znacznie wpływa na efektywność ich realizacji i obsługi. Przedstawione w pracy sposoby tworzenia modeli zachowań oraz gotowe ich rozwiązania i tendencje w responsywności formy architektonicznej mają pozwolić na wzrost uniwersalizacji podejścia do kształtowania architektury responsywnej. Główne cele pracy zdefiniowano jako:

- *Systematyzacja pojęć i podejść do modelowania, kształtowania i realizacji architektury responsywnej wśród struktur reagujących na obciążenia zewnętrzne*
- *Przedstawienie i ewaluacja szeregu modeli zachowań opartych o zróżnicowane podejścia teoretyczne do kształtowania form przestrzennych dla różnych typów struktur*
- *Opracowanie i omówienie szeregu rozwiązań elementarnych dla fizycznych realizacji struktur responsywnych*
- *Przedstawienie wyników prac modelowych i koncepcyjnych w odniesieniu do aktualnych badań, tendencji badawczych i praktyk w realizacji struktur responsywnych*

2.2 Tezy pracy

Praca przekrojowo traktuje o problematyce tak teoretycznego kształtowania zachowań struktur jak i fizycznych ich realizacji przy użyciu dostępnych rozwiązań i formułowanych w pracy idei. Tezy pracy odnoszą się do kompleksowości zagadnień i sformułowane są następująco:

1. *Bazowanie modeli zachowań architektury responsywnej może opierać się o algorytm ewolucyjny pod warunkiem współwystępowania razem z modelami deterministycznymi sterowania ruchem*
2. *Algorytm ewolucyjny stosowany do doboru odpowiedzi na zmienne warunki obciążeń zewnętrznych pozwala na efektywne poszukiwanie tendencji i sposobów doboru geometrii, które następnie mogą zostać ujęte w predefiniowanych systemach sterowania strukturą*

Model ruchu stanowi jeden z podstawowych elementów każdej struktury. Odpowiada w największym stopniu za efektywność końcową struktury, szybkość działania i niezawodność wyników. Może opierać się o szereg zasad działania jak metody probabilistyczne, iteracyjne, czy sztywne schematy zachowań. W pracy najważniejszą część stanowią metody wykorzystujące algorytm ewolucyjny. Jest on oparty o losowy dobór wartości początkowych parametrów geometrycznych i stopniowe rozpoznawanie zależności wzrostu i redukcji efektywności między kolejnymi iteracjami przy zmianach wartości parametrów. Zależnie od wartości początkowych i tempa rozpoznania tendencji zmian szybciej lub wolniej algorytm jest w stanie dostosowywać wynikowe wartości parametrów. Duża niepewność pomiarowa jest podstawową cechą systemów poszukiwania form opartych o algorytm ewolucyjny. Może on na potrzeby poszukiwania efektywnych form geometrycznych sterować dowolnym modelem zachowań o dowolnym stopniu złożoności, lecz wymaga zróżnicowanego przedziału czasu. Jednocześnie w algorytmach takich występuje problem rozróżnienia przez program ekstremum lokalnego oraz globalnego. W momencie błędnej identyfikacji wartości skrajnej przez algorytm istnieje ryzyko zablokowania w otoczeniu lokalnie maksymalnej wartości bez możliwości uzyskania efektywności na spodziewanym poziomie.

Przez losowość algorytmów trudne w oszacowaniu jest zapotrzebowanie na czas obliczeniowy w celu uzyskania zadanej precyzji wartości wynikowej. Przez precyzję rozumiane jest zawężenie przedziału wokół ekstremum w jakim badane są wartości. Wraz z postępem badania zakres ten ulega zwężeniu. Gdy osiąga ścisłą okolicę pojedynczego ekstremum zakres ten definiować można jako precyzję. Im zakres jest mniejszy tym precyzja pozostaje większa. Nie istnieje jednak możliwość szacowania tempa uzyskiwania precyzji i jej podnoszenia przy liniowym wzroście iteracji. Każdy model w każdej próbie badawczej charakteryzować się będzie inną, często nieliniową charakterystyką zmian zakresów. Oznacza to brak możliwości uzyskania pewności określonych wartości dla żadnego modelu i przypadku.

Modele zachowań oparte o algorytmy ewolucyjne stosowane były od początków tworzenia współczesnych modeli architektury responsywnej, lecz nie uległy rozpowszechnieniu ze względu na opisanie powyżej niepewności wyników.

Brak jest jednak w obecnych badaniach analiz doboru geometrii do charakterystycznych ścisłych przypadków obciążeniowych w modelach o zmiennej geometrii. Naświetla to znaczną niszę naukową w postaci poszukiwania tendencji zmian geometrii tej samej struktury w zależności od zmian obciążeń zewnętrznych. Nisza ta musi być wypełniona, aby na podstawie znanych zależności zmian geometrii możliwe było dalsze formułowanie modeli zachowań. Ich opis i synteza stanowią osobną część badań, lecz dopiero one pozwalają na tworzenie efektywnych, szybkich systemów ruchu. Oznacza to, że modele zachowań badane w niniejszej pracy ze względu na sterowanie nimi przy pomocy algorytmu ewolucyjnego stanowią metamodele służące poszukiwaniu wyników pozwalających na opis modeli właściwych. Zauważalne jest tu działanie odwrotne od powszechnie przyjętego. W miejsce prostych modeli mniejszych ruchów struktur, które z czasem zostają rozbudowywane do kompleksowych modeli, analiza przebiega odwrotnie przez losowe poszukiwania geometrii dla konkretnych przypadków bez użycia jakichkolwiek modeli sztywnych zachowań, a następnie opracowanie sztywnego systemu na podstawie odpowiednio licznej grupy geometrii wynikowych. W wyniku takiego podejścia wraz z postępem badań tworzy się coraz bardziej rozbudowana baza wyników, której tendencje i zależności najprościej analizować z wykorzystaniem uczenia maszynowego co jednak nie leży w zakresie niniejszej pracy.

Ze sposobu podejścia do poszukiwania reakcji wynika konieczność stosowania algorytmu ewolucyjnego, lecz przy uwzględnieniu jego ograniczeń konieczne jest zastosowanie dodatkowych systemów zabezpieczających strukturę. Systemy te mają za zadanie podnosić stopień pewności działania modelu zachowań i bezpieczeństwa jego wyników do poziomu akceptowalnego. Jednocześnie umożliwiają ewaluację skuteczności modelu algorytmu ewolucyjnego. Stanowią poziom odniesienia dla właściwego modelu budowanego w oparciu o elementarne wyniki algorytmu ewolucyjnego. Dla badania stałości

generowania wyników model potrzebuje stałych algorytmów. Opracowując wszystkie modele dodatkowe poza głównym jako sztywne stwarza się możliwość badania w jakim kierunku należy kształtować model główny. Z kolei oparcie wszystkich modeli na probabilistycznych metodach wymusza stosowanie niewymiernie dużej liczby modeli jednocześnie pracujących, aby zwiększyć szansę uzyskania satysfakcjonującej odpowiedzi geometrycznej. Takie podejście jednak nigdy nie umożliwia uzyskania jakiejkolwiek pewności wyników.

Ważny pozostaje również aspekt czasu obliczania geometrii. Jest on ściśle związany z mocą obliczeniową jednostki z użyciem której jest obsługiwany. Realizacja modelu o odpowiednio szybkiej reakcji może być więc realizowana poprzez podniesienie mocy obliczeniowej jednostki sterującej, lub zmniejszenie wymagań kosztów obliczeniowych algorytmu przez syntezę przypadków obliczeniowych lub aparatu symulacji statycznych. W praktyce realizuje się zadanie obiema metodami jednocześnie, lecz nie niweluje to w przypadku użycia algorytmu ewolucyjnego problemu nierównego zapotrzebowania na czas obliczeniowy. Każdy model w każdym przypadku obciążeniowym, również dla dwóch następujących po sobie prób przy jednakowych warunkach brzegowych uzyska inny wynik w tym samym czasie. Przy użyciu probabilistyki w obliczeniach gwarantowany czas i powtarzalność wyników nie występują, a mimo to są konieczne dla zapewnienia stałości wyników. Wymusza to ponownie stosowanie modeli współistniejących sztywnych zmian wraz z modelami operowanymi z użyciem algorytmu ewolucyjnego. Oznacza to dalej, że model responsywny będzie minimalnie tak efektywny jak jego najmniej efektywny składowy model zachowań, lecz można spodziewać się po użytym w nich algorytmach, że wytężenie lub odkształcenia będą znacznie mniejsze zwiększając trwałość struktury.

Badane dotychczas modele w zdecydowanej większości podzielić można była ze względu na teorię ich pracy na dwie kategorie. Pierwszą stosowaną na przełomie XX i XXI wieku były metody probabilistyczne, które dla prostych modeli o minimalnej liczbie zmiennych i wartości pośrednich z wystarczająco dużym zapasem pewności generowały wyniki spełniające kryteria podniesienia efektywności modelu. Drugi typ modeli uwzględniał wszystkie algorytmy sztywne. Ich teoria ruchu bazowana była na wybranej koncepcji statycznej strukturalnej. W wyniku koncentracji zdecydowanej większości badań na drugim typie algorytmów, badane są obecnie arbitralnie wybrane teorie, których dostosowanie na potrzeby podniesienia efektywności podlega badaniom. Na podstawie tak opracowanych badań nie jest możliwe ocenienie możliwości istnienia większej efektywności przy wykorzystaniu innej metody. Sporadyczne opracowania poruszają tę kwestie proponując analizy porównawcze kilku modeli na jednakowo opracowanych przypadkach obciążeniowych. Nadal jednak badana jest pewna pula modeli bez możliwości wyznaczenia na podstawie wyników jak sformułować najodpowiedniejszą metodę ruchu modelu.

Widoczna jest więc wyraźna potrzeba opracowania sposobu doboru modelu na podstawie wyników metamodelu nie bazującego na znanych teoriach statycznych. Odpowiednim do tego narzędziem jest rachunek prawdopodobieństwa. Jego sposób działania jako niezwiązany z zagadnieniami fizycznymi struktur jest wystarczająco ogólny, aby móc na zasadzie jego działania opierać metamodel poszukiwania modeli zachowań. Jego zadaniem jest generowanie losowych a następnie coraz bardziej kierunkowych zmian wartości parametrów sterujących geometrią, aby uzyskiwać coraz wyższe wartości efektywności odpowiednio definiowanej dla każdego modelu badawczego. W wyniku pracy modelu mają powstawać biblioteki gotowych najefektywniejszych geometrii. Ich analiza pozwolić ma następnie na opracowanie najbardziej odpowiedniego modelu zachowań. Nie musi być ona związana z teoriami statycznymi. Może być arbitralna lub opracowana z wykorzystaniem uczenia maszynowego. Metodę tę można zaaplikować do bardzo szerokiej gamy rodzajów struktur, wielkości oraz form dlatego też przedstawiana w pracy metoda użycia metamodeli przyjmuje charakter holistyczny. Zakłada się możliwość jej schematycznego użycia w licznych przypadkach, lecz generować ma wyniki, których analiza jest zawsze ręczna lub nadzorowana. Tworzenie algorytmów na podstawie modeli musi opierać się na doświadczeniu i wyczuciu struktur oraz ich zachowań co wymusza odpowiednią kontrolę naukową. W tezie zawarto

stwierdzenie, że dowolnie złożony sposób zachowań może być ujęty w schematyczny układ zachowań i sterowany w sztywny sposób. Dłuższy lub krótszy jest jedynie czas opracowywania metody zachowań, który może wymagać różnej liczby prób badawczych do tworzenia modeli zmian geometrii.

2.3 Zakres pracy

W pracy skupiono się na opisie, badaniach i analizie struktur responsywnych, które odpowiadają na zmiany układów sił zewnętrznych poprzez zmiany geometrii. Zdefiniowano kluczowe pojęcia odnoszące się do modelowania i analizy modeli jak efektywność i responsywność. Przedstawiono tło historyczne nakreślając ewolucję od teoretycznych koncepcji, przez próby realizacji po wyniki nowoczesnych badań realizacji, omawiając idee, teorię, sposoby kształtowania responsywności i samych struktur, metody implementacji ruchu, kontroli struktur oraz nowe kierunki badań podnoszenia efektywności przez oryginalne formy zmienności. Omówiono rozwiązania technologiczne i materiałowe przy realizacji modeli fizycznych. Przedstawiono sposoby symulacji zachowań modeli i ich analiz. Omówiono najważniejsze problemy kształtowania responsywności, jej kontroli i zapewnienia bezpieczeństwa użytkowania. Przedstawiono sposoby budowania modeli zachowań i przeanalizowano je pod względem skuteczności i uniwersalności, oraz na podstawie wyników opracowano koncepcję pełnego wielomodułowego schematu modelu zachowań pozwalającego na uzyskanie szybkości i skuteczności działania na odpowiednim poziomie. Przedstawiono dalej proces schematycznej ewolucji złożonego modelu w syntetyczny pojedynczy moduł w wyniku przetwarzania wniosków z procesu kształtowania odpowiedzi geometrycznych.

W części badawczej podzielonej na wpisujące się w powtarzalny układ działań badawczych bloki tematyczne przedstawiono szereg rozwiązań zachowania struktur responsywnych oraz fizycznych elementów sterowania nimi. Układ opracowano tak, aby rozwiązania i koncepcje o podobnym przeznaczeniu i sposobie działania omówić w kolejności narastającego stopnia złożoności idei. Omówiono sposoby kształtowania zmian geometrii modeli kratownic przestrzennych z użyciem idei dynamicznych relaksacji. Omówiono teorię tworzenia modeli przy użyciu dostępnych technik, dobierając dalej jedną najodpowiedniejszą do zbudowania modelu badawczego, co również stanowiło element opisu stanowiska badawczego. Opisano dobór przypadków obciążeniowych, proces zbierania danych o wynikach i ich analizę oraz podsumowanie wniosków. Układ taki stosowano następnie w każdych kolejnych badaniach. Przeprowadzono badania wartości efektywnych parametrów sterowania symulacją, zakresów efektywności pojedynczych przypadków obciążeniowych na cele ich syntezy oraz efektywności ogólnej na tle struktur statycznych. Ze względu na konieczność rozbudowania pracy o najważniejsze typy struktur przedstawiono również sposoby operowania zmianą geometrii powłok przy użyciu podpór w zróżnicowanych układach stopni swobody. Przedstawiono dwa modele podpór, które opracowane zostały symulacyjnie, geometrycznie oraz częściowo w formie fizycznej na potrzeby ewaluacji możliwości realizacyjnych. Przeprowadzono badania efektywności energetycznej odwołując się do szeregu analogicznych prób w literaturze. Opracowano i przebadano sposoby modyfikacji naprężeń w strukturach powłokowych. Począwszy od opisu teorii i koncepcji sterowania modelami, przez przygotowania prób badawczych, badania i analizy opracowano wytyczne zachowań systemów modyfikatorów i przedstawiono kompletny model geometryczny modyfikatorów poddany analizom MES oraz przeprowadzono badania kompleksowego modelu uwzględniającego najważniejsze elementy opracowane geometrycznie. Ideę modyfikatorów przeniesiono następnie na struktury dyskretne, ramowe, gdzie badano efektywności ich użycia i zdolności kontroli geometrii modeli. Badania wykonano dla kilku reprezentatywnych struktur o różnym poziomie złożoności przestrzennej.

Opisywano preakcje stanowiące jeden z modułów zachowań uzupełniających pulę kompletnego systemu zachowań. Opisano ich wytyczne modelowe, przedstawiono kilka koncepcji doboru geometrii, opisano ich tło teoretyczne i sposób działania, a następnie na

szeregu prób badawczych wykazano skuteczność generowanych zachowań geometrycznych i efektywność działania systemów. Skupiono się następnie na poszukiwaniu tendencji kształtowania odpowiedzi geometrycznych. Przeprowadzono badania ruchów pośrednich dowodząc, że jest to zagadnienie nietrywialne. Następnie w osobnym podrozdziale pochylono się nad zagadnieniem ruchów pośrednich na podstawie dokładnych symulacji zmian położenia elementów geometrii. Przebadano możliwości uproszczenia transformacji miedzy geometriami i określono implikacje zmian trasowania ruchu w strukturach w celu podnoszenia bezpieczeństwa realizacji ruchu i efektywności sterowania strukturą.

Omówiono sposoby kształtowania fizycznych struktur, które mają następnie stanowić szkielet nośny dla elementów ruchomych. Ze względu na duże zapotrzebowanie na rozwiązania fizycznych elementów struktur responsywnych część pracy poświęcona została elementom opracowywanego systemu. Opisane zostały wytyczne dla systemu strukturalnego, który spełniałby wszystkie założenia responsywności, tworząc wzorzec dla dalszych badań. Przedstawione zostały koncepcje prętów oraz węzłów pozwalających na swobodny ruch w pewnym zakresie geometrii struktury. Każdy element podlegał opisowi kształtowania, analizie rozkładu naprężeń w szczegółowych badaniach MES oraz opisowi procesu jego ewolucji w kolejnych iteracjach. Przedstawione zostały elementarne rozwiązania jak i cały system ekspandujący wraz z metodami obsługi i ograniczeniami geometrycznymi modeli możliwych do uzyskania.

W pracy przedstawiono koncepcję responsywności topologicznej stanowiącej nowe podejście w kształtowaniu ruchu architektury responsywnej. Opisano w rozbudowany sposób teorię działania responsywności topologicznej, przedstawiono koncepcję ruchu i wytyczne kształtowania struktur, a następnie opracowano modele badawcze na cele symulacji i przebadano ich skuteczność. Prace rozbudowano o model i fizyczną realizację modułu struktury stanowiącego autonomiczny fragment struktury zachowujący pełną funkcjonalność responsywności.

Sumarycznie praca zawiera 6 idei zróżnicowanego wprowadzenia responsywności do struktur. Idee te zostały w różnym stopniu opracowane i przedstawione. Dla każdych badań modele zostały przygotowane i opisano ich sposób działania. Dane zbierano w formie tabelarycznej oraz w postaci wykresów natomiast koncepcje idei przedstawiano graficznie w formie perspektywicznej lub płaskich rysunków nie stanowiących na obecnym etapie dokumentacji wykonawczej. Podział pracy stanowi wskaźnik podziału treści na poszczególne grupy tematyczne wewnątrz których dalej wydzielano samodzielne tematy związane z responsywności. Każdy dział wiedzy zamknięto w uszeregowane według rosnącego stopnia złożoności zagadnienia i w każdym przypadku nakreślano dalsze kierunki badań zapewniając kompletność opracowania wstępnego jakim niniejsza praca jest.

W pracy stosowano modelowanie koncepcyjne, symulacyjne, zastosowano zróżnicowane techniki generowania wyników badań które każdorazowo podlegały ręcznej ocenie. Wykorzystywano metody wytwarzania fizycznych form części rozwiązań na potrzeby analizy zdolności realizacyjnych, uzyskując 4 zestawy elementów składających się na poszczególne rozwiązania responsywne jak podpory, pręty, węzły i moduły topologiczne.

2.4 Stanowisko badawcze

Praca ze względu na niszową tematykę poruszała zagadnienia o dotychczas niskim poziomie opracowania badawczego. Większość zagadnień poruszanych w pracy nie charakteryzowała się ugruntowanymi metodami badawczymi. Wiedza na temat dostępności narzędzi badawczych dla szeregu prac nie była w nich ujęta co skutkowało koniecznością przygotowania oryginalnych metod i zbudowania uniwersalnego stanowiska badawczego na cele pracy w obszarach architektury responsywnej.

Podstawową formą badań były symulacje i komputerowo budowane modele. Modele te nasycane były informacjami geometrycznymi, fizycznymi oraz charakterystyką zachowań

poszczególnych elementów jak teleskopowanie, czy obrót. Przeprowadzano dla nich statyczne i quasi-zmienne symulacje z użyciem rozwiązań MES. Oprogramowanie Grasshopper służyło badaniom ogólnym całych struktur. Żaden model analizowany w programie nie miał zdefiniowanej minimalnej oraz maksymalnej dokładności, dlatego też w sytuacjach gdy precyzja analiz nie była wystarczająca stosowano dodatkowe oprogramowanie Autodesk Inventor w którym przeprowadzano znacznie bardziej złożone symulacje pracy elementów. W programie modelowano również dokładne rozwiązania geometrii elementów i nadawano właściwości fizyczne. Program pozwalał na ograniczone warunkami brzegowymi analizy nieliniowej wybrane fragmenty pełnych struktur uszczegóławiając wyniki ogólnych analiz.

Oprogramowanie Autodesk Autocad służył do modelowania i opisu architektonicznego rozwiązań jak pręty, czy węzły. Z jego użyciem modelowano na wczesnym etapie wszystkie wymienione w pracy elementy przedstawione na perspektywach i grafikach płaskich. Z oprogramowania Autocad dane na temat elementów do wykonania w technologii druku 3D eksportowane były do oprogramowania Prusa Slicer gdzie przygotowywane były pliki poleceń dla drukarek. Po eksporcie każdy zestaw elementów podlegał ręcznemu przygotowaniu do druku na drukarce Prusa Slicer Mk4 w oryginalnej konfiguracji sprzętowej.

Ze względu na interdyscyplinarne zagadnienia poruszane w pracy konieczne było przygotowanie narzędzi nie związanych ściśle z architektoniczną domeną badań. Wszystkie programy obsługi dla mikrokontrolerów Arduino pisano w środowisku programistycznym Arduino IDE. Z jego pomocą program kompilowany był do wierszy poleceń, oraz wypalany był w pamięci EPROM mikrokontrolerów. Gdy model podlegający realizacji fizycznej wymagał realizacji bardziej złożonego układu elektronicznego był on modelowany w profesjonalnym oprogramowaniu do tworzenia układów elektronicznych „Eagle”.

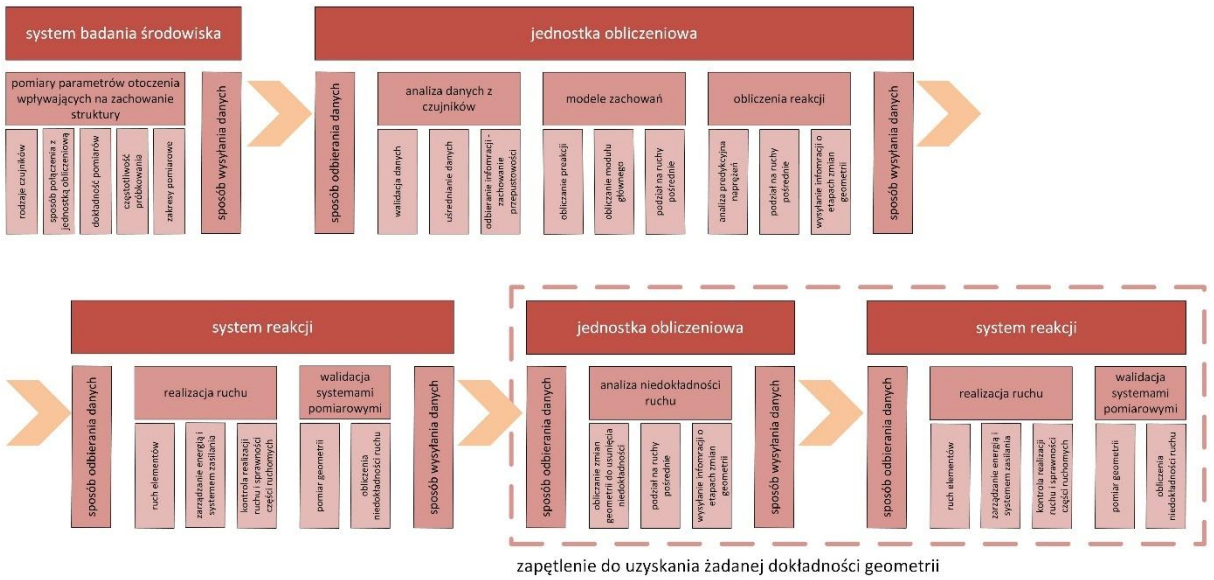
Dane wyników badań zbierane były bezpośrednio w oprogramowaniu Grasshopper, lecz w celu ich systematyzacji, zapisania i dalszej analizy zabezpieczano je w arkuszach kalkulacyjnych Excel, gdzie podlegały dalszej analizie. Wszystkie wyniki zbierano w tabele, zestawienia i wykresy generowane w oprogramowaniu Excel.

W wyniku wykorzystania wszystkich opisanych elementów uzyskano kompletne stanowisko badawcze architektury responsywnej, które umożliwia tworzenie koncepcyjnych rozwiązań, formułowania wytycznych do kształtowania zachowań responsywnych, programowanie zachowań na cele weryfikacji twierdzeń i ewaluację ich efektywności oraz zebranie wyników i ich analizę. Szczególnie rozbudowany pozostaje aspekt kształtowania zachowań i geometryczno-fizycznych rozwiązań. Stanowisko pozwala na przeprowadzenie prostych badań fizycznych modeli i ocenę stopnia zgodności symulacji z rzeczywistym schematem zachowań struktur co ma na celu podniesienie wartości badawczej poprzez weryfikację modeli symulacyjnych.

3. Logika kształtowania modeli zachowań struktur responsywnych

3.1 Analiza istniejących modeli zachowań

Każda struktura responsywna wymaga znacznego nakładu pracy na opracowanie indywidualnych rozwiązań. Indywidualizacja dotyczy tak form ruchu, bodźców ruchowych, systemów pomiarowych jak i elementów ruchomych. Indywidualne pozostają rozwiązania, lecz logika opracowania i wykonania fizycznych struktur może przyjąć cechy uniwersalizacji. Wszystkie struktury wpisać można w schemat twórczy bez względu na typ struktury i nie jest on ściśle związany ze sposobem działania struktury. Struktura pracuje w pętli powtarzalnych procesów. Zapętlenie znacząco upraszcza obsługę struktury i pozwala na natychmiastową reakcję systemu w przypadku wykrycia nieprawidłowości działania. Ponadto ze względu na kluczowe znaczenie procesu nasycania bazy gotowych geometrii struktury pętla pozostaje optymalnym rozwiązaniem działania do momentu nasycenia bazy. Tak pierwsze modele responsywne [44], jak i obecnie prowadzone badania[73], mimo kształtowania struktur odmiennego typu bazują na zapętlaniu procesu responsywności. Proces ten składa się z kilku kolejnych etapów co zaznaczono na diagramie *Grafika* 2.Kolejność działań w iteracyjnym



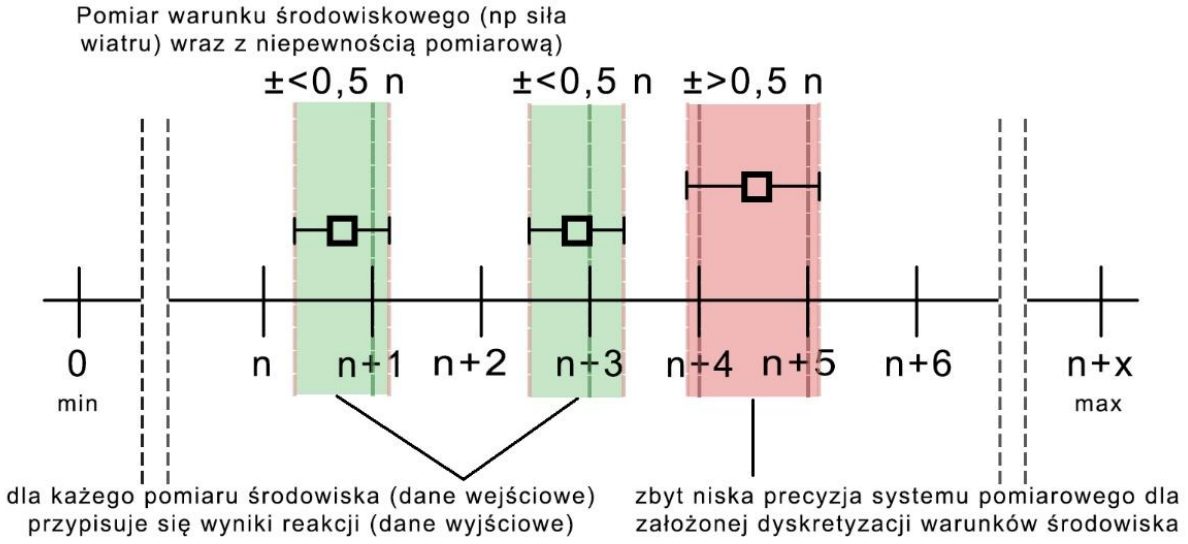
Grafika 2.Kolejność działań w iteracyjnym procesie badania środowiska i reakcji struktury responsywnej. Schemat przedstawia dwustopniowe zapętlenie.

procesie badania środowiska i reakcji struktury responsywnej. Schemat przedstawia dwustopniowe zapętlenie..

3.1.1 Systemy badania środowiska

Pierwszym procesem jest badanie środowiska. Odbywa się ono z użyciem systemu czujników. Badaniu zawsze podlegają siły zewnętrzne [34], [121], lecz dodatkowo badania można rozszerzyć o pomiary nasłonecznienia [122], czy wilgotności [123] zależnie od bodźców na jakie struktura ma reagować. W dotychczas stosowanych rozwiązaniach najbardziej rozbudowanym pozostawał system pomiaru sił. Pomiar wielkości na jakie system ma reagować dla każdego rodzaju struktury wymaga innej precyzji. Przyjmuje się, że większa dokładność jest wymagana w strukturach bardziej przesztywnionych. Od dokładności badań parametrów zależy szybkość i efektywność opracowywania modelu zachowań. Im większe pozostają niepewności pomiarowe tym trudniej systemowi rozpoznać zasady doboru reakcji. W celu minimalizacji tego zjawiska należałoby określić maksymalny błąd pomiarowy jako mniejszy niż połowa różnicy wartości sąsiednich w matrycy zachowań.

Przy zachowaniu zależności przypisanie danego przypadku warunku środowiskowego do skwantyfikowanej matrycy warunków środowiskowych nie stanowi trudności i odbywa się automatycznie Przy niezachowaniu zależności dany pomiar można przydzielić do co najmniej dwóch stanów. Przypisanie niewłaściwe skutkuje dalej tak samo niewłaściwym przydzieleniem reakcji zachowania i wyniku uzyskanego wzrostu efektywności. Przy ponownym wystąpieniu danej wartości parametru środowiskowego system reaguje nieprawidłowo i nie uzyskuje spodziewanej efektywności. Zależność tę prezentuje schemat Grafika 3.Schemat przedstawia



Grafika 3.Schemat przedstawia wpływ dokładności pomiarów na skuteczność reakcji systemu. Gdy pomiary nie zachowują odpowiedniej precyzji następuje błędne rozpoznanie przypadku obciążeniowego. W konsekwencji występuje możliwość przeciążenia struktury.

wpływ dokładności pomiarów na skuteczność reakcji systemu. Gdy pomiary nie zachowują odpowiedniej precyzji następuje błędne rozpoznanie przypadku obciążeniowego. W konsekwencji występuje możliwość przeciążenia struktury.

Badania siły prowadzone są punktowo w określonych miejscach struktury co znacznie utrudnia estymację rzeczywistego rozkładu obciążeń powierzchniowych. Pomiary odbywają się najczęściej z użyciem tensometrów [80] jako belek lub S-kształtnych czujników zależnie od potrzeby pomiaru obciążeń osiowych lub wywołujących moment zginający. Dla kratownic płaskich oraz przestrzennych najczęściej tensometry lokalizowane są na węzłach. Wszystkie obciążenia przykłada się do belek co daje pomiar bezpośredni, lecz wymusza mocowanie fizycznych interfejsów belka-obciążenie w celu przyłożenia obciążenia. Daje to możliwość badania bezpośrednio warunków środowiskowych. Podejście to wykorzystywane szczególnie w pracach koncepcyjnych jak [67], [83] zupełnie pomija niedokładności realizacyjne w przypadku struktur fizycznych i wymusza ich uwzględnienie dopiero w systemie kontroli struktury. Alternatywnym rozwiązaniem rzadziej stosowanym w architekturze responsywnej jest lokalizacja tensometrów na elementach nośnych- prętach lub podporach, czyli pośrednie pomiarowanie warunków środowiska. Pozwala to mierzyć rzeczywiste siły występujące na elementach strukturalnych uwzględniające niedokładności wykonawcze, a także zużycie struktury. Brak jednak w takiej strukturze oceny stanu struktury i jej zmienności w czasie. Podejście bezpośrednie upraszczało kontrolę stanu modelu poprzez widoczne zmiany naprężeń lub otrzymywanych geometrii dla tych samych przypadków obciążeniowych w czasie. Utrata tej informacji wymusza użycie dodatkowych systemów kontroli lub ręczny nadzór. Pośrednie rozwiązanie hybrydowe pozwala na znacznie pełniejszy zbiór informacji na temat stanu struktury, lecz również jej zachowania. Trudnością pozostają badania struktur ciągłych, które nie mają wyraźnie wyznaczonych torów przebiegu naprężeń, aby w łatwy sposób mierzyć ich wartości. Ograniczona liczba opracowań tego tematu sprawia, że

zagadnienie wymaga pogłębienia badań. Dotychczas struktury takie posiadały systemy pomiarowe jedynie na podporach [53], a wszystkie naprężenia na strukturze były symulowane w jednostce obliczeniowej. Estymowało to zachowania modelu, który w pierwszej kolejności wymagał przebadania pod kątem niedokładności wykonawczych wpływających na model zachowań. Z czasem stały się one częścią modelu symulacyjnego, który zyskał na precyzji obliczeń predykcji zachowań struktury. Obecnie nie wykorzystuje się alternatyw dla belek tensometrycznych, lecz z czasem szczególnie w strukturach ciągłych i masowych zakłada się, że możliwe będzie stosowanie czujników piezoelektrycznych [73], [124].

Systemy powinny zbierać informacje z odpowiednią częstotliwością, tak aby próbkowanie pozwalało na odtworzenie zmienności parametrów. Najczęściej struktury responsywne modelowane i wykonywane są, aby reagować na obciążenia zmienne o niskiej częstotliwości zmian [125], lecz wzrost zapotrzebowania na badania oddziaływań o wyższej częstotliwości wymagać będzie odpowiednio szybkiego systemu pomiarowego.

3.1.2 Złożoność obliczeniowa modeli wobec precyzji generowania odpowiedzi geometrycznych

Centralnym elementem struktury pozostaje zawsze jednostka obliczeniowa ujęta w pracy ogólną nazwą pod którą rozumiany jest układ odpowiadający za zbieranie danych ze wszystkich czujników, przetwarzanie danych i obliczanie reakcji. Opcjonalnie może także zarządzać sterowaniem ruchem, lecz niekiedy funkcja ta przypada na osobne systemy. Jednostka obliczeniowa fizycznie może stanowić pojedynczy komputer lub układ kilku równolegle wykonujących operacje urządzeń. Zależnie od skali i wymaganej dokładności obliczeń może przybierać bardziej rozbudowane formy. Zarządza sposobami zmian geometrii. W pierwszej kolejności zbiera dane z czujników w formie nieprzetworzonej lub minimalnie przetworzonej weryfikując ich poprawność i istotność. Na podstawie danych dalej przelicza modele zachowań. W zależności od ilości użytych modeli dobiera jedną lub wiele kolejnych efektywniejszych reakcji. Dalej oblicza trajektorie ruchu i przetwarza informacje o ruchu na polecenia zrozumiałe dla kolejnego systemu.. Poza obliczaniem reakcji zapisuje i przetwarza historię zmian. Mogąc korzystać z hybrydowego systemu czujników środowiska automatycznie może przeliczać zmiany zachodzące w strukturze fizycznej i reagować na nie wprowadzając zmiany w modelu zachowań. Ze względu na ilość funkcji pełnionych przez ten element należy zachować bezwzględnie minimalizację danych zbieranych ze środowiska i systemu pomiarowego samej struktury co podnoszone jest w licznych opracowaniach [2], [19], [70], [86], [126].

Jednostka obliczeniowa poza podstawowym ruchem odpowiada za ruchy korekcyjne, które opracowywane są na podstawie danych z odrębnego systemu pomiarowego. Wymagają one osobnego programu obsługi i mogą być tak iteracyjne jak i sztywno określone. Jednostka obliczeniowa pracuje podczas całego okresu funkcjonowania struktury do momentu uzupełnienia matrycy zachowań. Po uzupełnieniu matrycy i wyłączeniu modułu głównego może ulec redukcji lub zmianie priorytetów obliczeniowych z geometrii wynikowych na trajektorie ruchu.

Jednostki obliczeniowe przeważnie stanowią komputery osobiste w pracach badawczych tak wczesnego okresu badań modelowych [54], [127], jak i współczesnych rozbudowanych struktur [75], [128]. Mogą być oparte o systemy mikrokontrolerowe przeważnie w klastrach jak Raspberry Pi lub ESP32, lecz wielkość struktury determinuje możliwość ich użycia. Każdy moduł główny oraz modele preakcji wymagają innych mocy obliczeniowych, a szybkość obliczania reakcji jest jednym z podstawowych parametrów porównawczych jak w przykładach opracowań [65], [69], [87], [93].

3.1.3 Systemy realizacji i kontroli reakcji geometrycznych

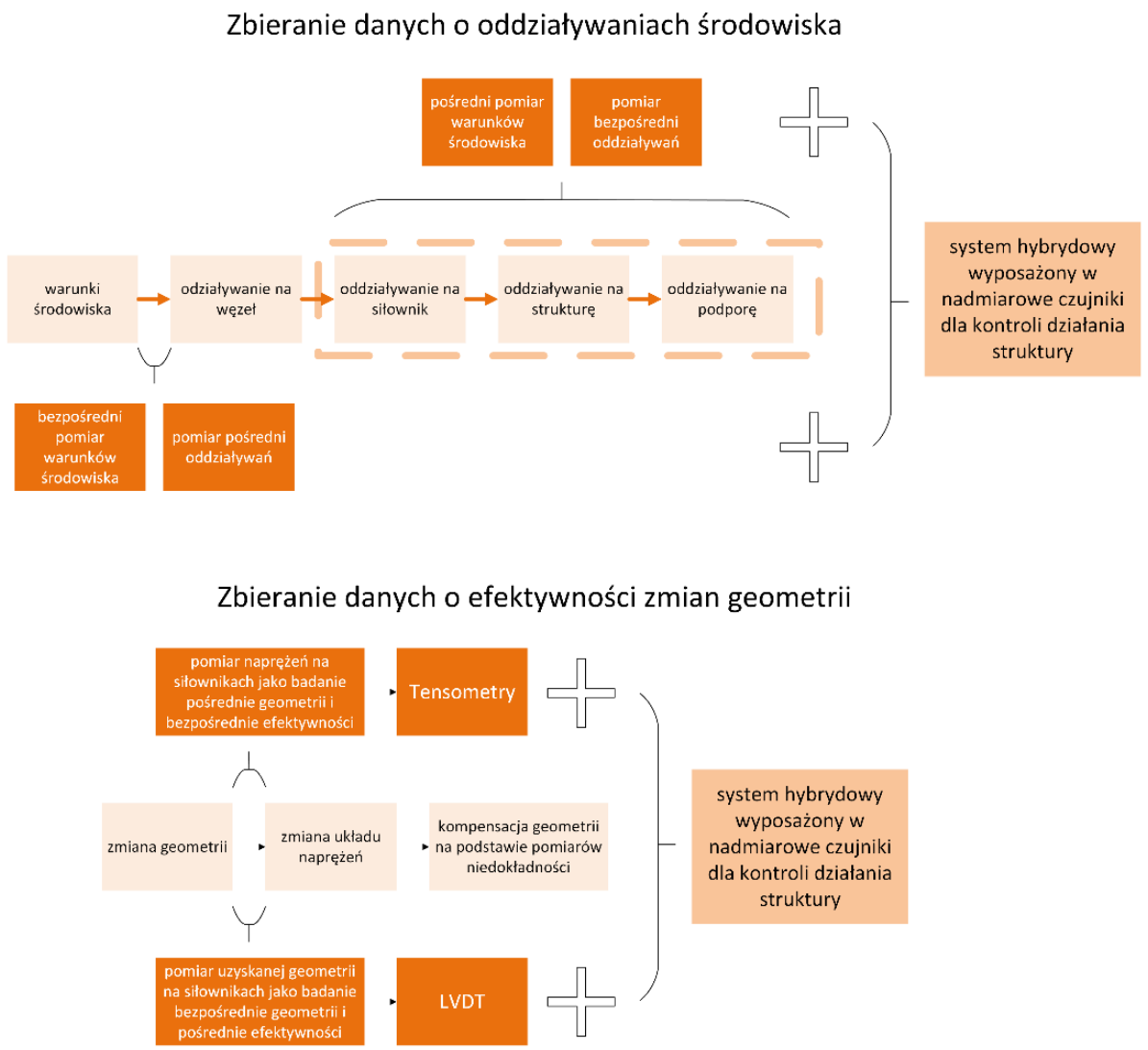
Systemy reakcji odpowiadają za realizację ruchu, którego trasowanie opracowane zostało przez jednostkę obliczeniową oraz za pomiarowanie geometrii podczas ruchu w celu

określania niedokładności motoryki. Niedokładności te mogą być wykonawcze lub wtórne wynikające z eksploatacji struktury. Pierwsze odnoszą się do niezachowania precyzji łączenia elementów i wstępnej podatności struktury. Drugie z kolei są wszystkimi zjawiskami jakie mają wpływ na zmianę uzyskanej geometrii w dwóch takich samych przypadkach obciążenia rozłożonych w czasie. Do zjawisk tych zalicza się zużycie elementów, głównie ruchomych, utrata osiowości, deformacje pod odpowiednio dużym obciążeniem, zmniejszenie zakresu ruchu pracy siłowników ze względu na utratę części nośności, czy najczęściej występujący również w przypadku w pełni poprawnych modeli wpływający na geometrię czynnik precyzji obliczeń. Najczęściej modele obliczeń MES stosowane w strukturach responsywnych nie uwzględniają złożonych zjawisk deformacji, rozkładu naprężeń. Możliwie daleko rozbudowane uproszczenia są konieczne, aby w określonym czasie uzyskać reakcję struktury [129]. Uproszczenia te powinny być implementowane w miejscach modelu zachowań gdzie wywołają najmniejsze rozbieżności między symulacją, a rzeczywistą pracą modelu, lecz pewnych niedokładności nie da się uniknąć. Znacznie prostszym rozwiązaniem od dokładnej symulacji jest ich kompensacja[71]. System reakcji powinien być więc wyposażony nie tylko w elementy ruchome, lecz również czujniki służące badaniu geometrii struktury. Znów ich podział można określić na podstawie sposobu pomiaru jako bezpośrednie i pośrednie. Pośrednie to pomiary naprężeń realizowane często tym samym systemem pomiarowym, który bada wpływ środowiska. Jest to system tensometrów, który precyzyjnie określa siły osiowe w prętach bez informacji na temat geometrii. W takim przypadku trudnością realizacyjną jest oddzielić wynikowe naprężenia w strukturze od wpływu środowiska, aby móc obliczyć wymaganą korektę ruchu elementów. Bezpośrednie pomiary z kolei stanowią zawsze osobny system. Najczęściej jest on realizowany z użyciem kamer np. w systemie DIC [71] pozwalając na dokładne określanie pozycji elementów lub punktów referencyjnych. Jest to uniwersalne narzędzie służące kontroli struktur dyskretnych jak i powłokowych, gdyż systemy te predestynowane do pracy z powierzchniami ciągłymi pozwalają w oparciu o zdefiniowane punkty pomiarowe określać rozkłady naprężeń dowolnych struktur w dwóch oraz trzech wymiarach.

Każda struktura wymaga jednak innej precyzji pomiaru. Największy zakres niepewności pomiarowych może być stosowany w strukturach kratownicowych, gdzie zmiana geometrii wpływa na zmiany rozkładu naprężeń [67]. Przyjmuje się, że modele te mogą być efektywnie sterowane przy niedokładnościach pomiarowych rzędu 1% [95]. Bardziej precyzyjne muszą być systemy dla struktur kratownicowych, lecz opartych o małe zmiany geometrii, czyli sterowane zmianami naprężeń w miejsce sterowania zmianami geometrii. Najbardziej precyzyjnych systemów pomiaru geometrii wymagają struktury ciągłe [53] oraz masowe [73]. W miejsce systemów obrazowej analizy i nadzoru zmian geometrii należy badać pracę materiału z użyciem bardziej inwazyjnych metod jak LVDT [130]. Systemy te oparte o pomiar siły pola magnetycznego czułego na zmiany odległości czujnika od pola zapewniają znacznie dokładniejsze pomiary o rozdzielczości rzędu 0,1μm oraz wyższe próbkowanie pomiarów dochodzące do 300Hz. Muszą jednak być stosowane w systemach które swoją masą minimalizują wpływ czujników na wyniki. Wraz ze wzrostem wielkości struktury czujniki stanowią coraz mniejszą składową masy i wymiarów modelu, gdyż nie dotyczy ich problem skalowania. Nie mierzą rosnących naprężeń, a odkształcenia, które dla wszystkich struktur responsywnych są w znacznie większym stopniu determinowane niedokładnościami wykonawczymi niż wielkością struktury pozostają na względnie stałym poziomie dla rozpatrywanych skal modeli.

Cały proces obliczania efektywnych geometrii a dalej skuteczności ich wprowadzania waliduje się poprzez realizację ruchu. Jest to najważniejszy element pracy struktury, który od początków formułowania zasad ruchu w latach 70.tych do obecnych czasów przeszedł drogę rozbudowanej konceptualizacji i zaawansowania projektów teoretycznych [19], przez skrajne uproszczenia wykonawcze [127], [131] po obecny stopniowy powrót do bardziej złożonych modeli [75], [114]. Liczne próby modelowania zachowań i ich fizycznych implementacji w strukturach ruchomych przedstawiają wyraźną tendencję użycia siłowników śrubowych lub hydraulicznych zależnie od skali. Wybór konkretnych rozwiązań oparty jest o wymagany

zakres ruchu, nośność oraz szybkość teleskopowania. Niezależnie od rodzaju struktury, jej ciągłości lub wyraźnego podziału na elementy odcinkowe siłowniki stosowane są najczęściej,



Grafika 4. Schemat blokowy dwóch systemów koniecznych do wprowadzenia w strukturze responsywnej. Systemy te podlegają coraz częściej unifikacji w jeden kompleksowy system..

lecz ich sposób użycia ulega zmianie. Kratownice pozwalają na jeden z dwóch sposobów osadzania siłowników. Zasady działania obu układów zostały przedstawione w pracy [65]. Pełny proces detekcji obciążeń zewnętrznych i reakcji został przedstawiony na Grafika 4. Schemat blokowy dwóch systemów koniecznych do wprowadzenia w strukturze responsywnej. Systemy te podlegają coraz częściej unifikacji w jeden kompleksowy system..

Bardzo rzadko siłowniki są zastępowane innymi elementami wykonawczymi dla ruchu. Najczęściej tylko one potrafią zapewnić odpowiednie siły ruchu oraz posiadają atesty bezpieczeństwa oraz deklaracje producentów. W realizacjach istnieją przypadki innych elementów ruchomych. Są to na przykład nitynolowe sprężyny reagujące na zmiany temperatury wykorzystane w realizacji jednego z obiektów koncepcyjnie opracowanego przez Negroponte, a wykonanego 4 dekady później i opisanego w pracy [132], [133]. Wykorzystano je na zasadzie mięśni przyczepami mocowanych wokół punktów węzłowych kratownicy umożliwiając zginanie struktury. Poważnym ograniczeniem pozostaje jednak skala założenia. Nitynolowe sprężynowe ściągacze oparte o technologię stopów z pamięcią kształtu[12] ze

[12] Z eng. ***"shape-memory alloys"*** [200]

względu na cenę oraz rozmiary obecnie umożliwiają implementację jedynie w strukturach membranowych, ażurowych kratownicach przykryć o rozpiętości maksymalnej liczonej w pojedynczych metrach. Jednokrotnie nitynolu użyto w odmienny sposób w opracowaniu [113], jako cięgna sprężające belkę dla sterowania naprężeniami elementu masowego, lecz problem skali został tym bardziej uwydatniony potwierdzając niską skuteczność rozwiązania.

Odmienną formą wprowadzania ruchu jest sterowanie cięgnami. Oparcie ruchu struktury jedynie o możliwość operowania długością i stopniem wytężenia cięgien było pierwszym etapem realizacji struktur responsywnych w przestrzeni badawczej co poddane zostało wyczerpującym badaniom [54], [107], [127]. Zauważa się obecnie powrót do takich rozwiązań i użycie cięgien w połączeniu z bardziej rozbudowanymi systemami pomiarowymi i wykonawczymi ruchu [128], [134]. Są to głównie struktury tensegrity opisane po raz pierwszy przez Kenneth'a Snellson'a pod koniec lat 40. XX wieku i rozpromowanych przez inżyniera Richard'a Buckminster'a Fuller'a. Struktury te jednak ze względu na stopień złożoności wzajemnych oddziaływań elementów cięgnowych i prętowych do dziś charakteryzują się kompleksowością uniemożliwiającą precyzyjne i szybkie przeliczanie sterowania zachowaniem modeli. Druga forma użycia cięgien jest jednak dalece bardziej opracowana i prostsza. Przyjmuje formę zbrojenia sprężającego o modyfikowalnym naciągu [73], [84]. Jest to forma ruchu wywołująca najmniejsze zmiany geometrii i wymagająca największej dokładności pomiarowej.

3.1.4 Problematyka niezawodności oraz skalowania elementów wykonawczych w strukturach responsywnych

Jednym z podstawowych zagadnień w obsłudze struktur responsywnych jest zapewnienie bezpieczeństwa ich użytkowania. Statyczna struktura nie mogąc dostosowywać się w czasie do różnych wymagań bezpieczeństwa przy różnych przypadkach obciążeniowych musi zapewniać bezpieczeństwo w każdej sytuacji. Responsywność ma umożliwiać stałe dostosowywanie się struktury, aby utrzymywać w całym okresie użytkowania stały bufor bezpieczeństwa. Oznacza to, że w momencie awarii systemu ruchu struktura pozostaje w geometrii ostatniego ruchu, a obciążenie pozostaje zmienne. Jeśli struktura zatrzymała się w geometrii wrażliwej na konkretne przypadki obciążeniowe jej bezpieczeństwo nie zostanie zachowane. Wymusza to dwa kolejne działania. Pierwszym jest zapewnienie zestawu geometrii bezpiecznych. Drugim z kolei są zabezpieczenia sprzętowe. Konserwacja elementów ruchomych podnosi koszty operacyjne w czasie funkcjonowania struktury, lecz nadal nie zapewnia bezpieczeństwa w wypadku wystąpienia awarii. Należy w architekturze responsywnej zapewnić systemową nadmiarowość. Może być ona realizowana poprzez dodatkowe siłowniki w liczbie minimalnej aby uzyskać stan geometrii bezpiecznej samym systemem zapasowym przy założeniu sprawnego przeniesienia realizacji zadania dostosowywania struktury z głównego systemu ruchu na zapasowy w momencie wykrycia niesprawności systemu głównego. Nieliczne badania przedstawiają metody zabezpieczania struktur na sytuacje wyjątkowe poprzez nadmiarową wytrzymałość pojedynczego systemu ruchu jednocześnie przedstawiając estymacje kosztów modeli jak opracowanie [71], [87], [107], lecz nie odnoszą się do aspektów realizacji takich systemów w rzeczywistości. Bezpieczeństwo struktury responsywnej jest zagadnieniem znacznie bardziej kompleksowym niż dla struktur statycznych.

Opracowania skupiające się na szacowaniach kosztów i zagadnieniach bezpieczeństwa nie operują na rzeczywistych fizycznie dostępnych na rynku elementach ruchomych. Tak jak statyczne elementy konstrukcyjne są powszechnie dostępne i mogą być w prosty sposób wliczone do kosztów, użytkowania i konserwacji struktury, tak wszystkie elementy ruchome w obiektach skali rzeczywistej są obecnie specjalistycznym sprzętem lub teoretycznymi modelami o arbitralnie określonej motoryce, nośności, kosztach, sposobie montażu oraz konserwacji. Najbardziej rozbudowane opracowanie traktujące o poruszanym temacie [70] obliczenia skuteczności i oszczędności wynikających z użycia responsywnych struktur w miejsce statycznych bazuje na prostym skalowaniu. Wszystkie siłowniki stosowane

w małych modelach lub makietach skalowane są w opracowaniu w pewnej proporcji ciężaru do nośności z pominięciem problemu skali, opisanego w pozycjach literaturowych [135], [136]. Wnioski pracy skupionej na obliczeniach efektywności responsywności pozostają czysto teoretyczne. Zagadnienie w znacznie bardziej rozbudowany sposób opisywane jest w pracy [75], której wyniki oparte są o projekt obiektu rzeczywistej skali. Wszystkie mechanizmy, elementy ruchome, systemy pomocnicze stanowią część opracowania wykonywanego na dalszym etapie prac obiektu. Problem skali wymusza zmianę systemu tłumienia jeśli obiekt wymaga użycia takiego rozwiązania. Ponadto zapotrzebowanie na energię, czy przestrzeń na lokalizację systemów rośnie wykładniczo co pokazano w pracy [137]. Szybkość zmian geometrii w proporcji do całej struktury spada dla rzeczywistego obiektu uniemożliwiając zastosowanie samej zmiany geometrii. Musi być ona wspomagana lub zastąpiona zmianą długości elementów nośnych w celu redystrybucji naprężeń w strukturach przesztywnionych. Dla większych obiektów zachowanie bezpieczeństwa może więc być spełnione poprzez minimalizację ruchu dającą wymierne zyski wpływu na naprężenia.

Opracowane dwa kolejne sposoby ruchu strukturą przez Gennaro Senatore stanowi obrazowe przedstawienie rozwiązania problemu [125]. Rozróżnia on dwa sposoby ruchu struktury co zostało wcześniej przedstawione i opisane. Małe deformacje oraz duże deformacje. Najważniejsze w obu przypadkach pozostają wtórne naprężenia mające dwa komplementarne zadania. Pierwszym jest minimalizacja naprężeń najbardziej wytężonych prętów struktur dyskretnych. Drugim jest homogenizacja naprężeń całej struktury. Uzyskując zmniejszenie naprężeń na najbardziej wytężonych prętach naprężenia rosną w ich najbliższym otoczeniu. To wymusza w kolejnych iteracjach minimalizację naprężeń nowych najbardziej wytężonych prętów. Finalnie w celu uniknięcia zapętlenia działania struktury modele małych zmian geometrycznych orientowane są na homogenizację naprężeń na całej strukturze [138]. Zaletą modeli małych deformacji jest średnio kilkunastokrotnie mniejsze wymaganie co do zakresu pracy elementów ruchomych oraz znacznie niższa wymagana szybkość pracy. Jedynym czynnikiem mającym realny wpływ na dobór elementów wykonawczych poza nośnością pozostaje częstotliwość pracy elementów, która tak dla struktur ciągłych jak i dyskretnych musi pozostać w granicach częstotliwości modalnej [70].

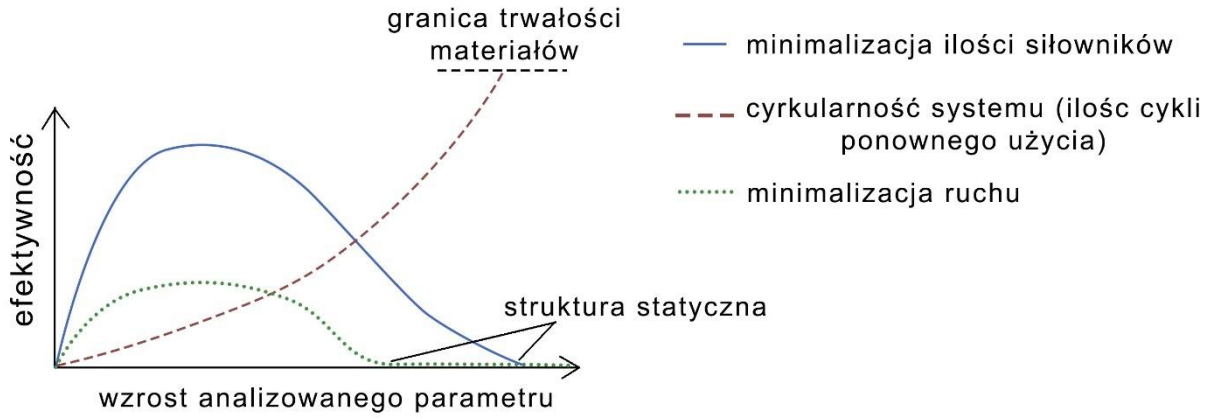
3.1.5 Sposoby ewaluacji efektywności i szacowanie nakładów dla struktur responsywnych

Wszystkie struktury responsywne obecnie poddawane badaniom mają służyć obniżeniu nakładu energetycznego tak w procesie realizacji jak i dalszej obsługi struktury [87]. Głównym czynnikiem wskazującym na efektywność jest więc zapotrzebowanie energetyczne. Najaktualniejsze badania podchodzą dodatkowo do zagadnienia poprzez włączenie analizy LCA do obliczeń [82]. Opisany już problem szacowania nakładów nie ma pokrycia w realizacjach fizycznych modeli. Konieczność uzyskania wysokiej precyzji wykonania i ruchu elementów jak i całej struktury znacząco podnosi koszty o wartości ukryte, trudne do oszacowania oraz policzenia. Powstały nieliczne modele obliczeniowe estymujące oszczędności wynikające ze stosowania struktur responsywnych [69], lecz podlegają opisanym już uogólnieniom i szacunkom. Problemem jest jednak stale zmienny zakres obliczeniowy. Rozliczenie LCA w zakresie ***„cradle to grave”*** lub ***„cradle to cradle”*** stanowią pewien schemat obliczeniowy, który może być uzupełniany ze zróżnicowaną szczegółowością. Brak jednoznacznej standaryzacji oraz znaczna indywidualizacja każdej struktury responsywnej czyni zagadnienie efektywności energetycznej złożonym o metodologii obliczeniowej zależnej od przeznaczenia struktury.

Nie istnieje obecnie jeden uniwersalny sposób liczenia efektywności struktur, lecz pewne parametry pozostają uniwersalnymi wskaźnikami pozwalającymi na szacowanie zysków. Pierwszym jest minimalizacja liczby elementów responsywnych. Brak konieczności implementacji siłowników lub alternatywnych elementów ruchomych we wszystkich miejscach struktury w każdym przypadku pozostaje twardym parametrem efektywności. Opracowania dotyczące minimalizacji nakładów energetycznych wyraźnie podnoszą fakt istnienia pewnego

optimum między motoryką, a statyką struktury [65] tak dla małych zmian geometrii jak i dużych [95]. Zauważenie tego faktu wymusiło z czasem rozbudowę modeli obliczeniowych o modele przedmiarowe dla danej geometrii obliczające minimalną liczbę siłowników oraz ich orientację w przestrzeni. Oparte zostały o zróżnicowane metody obliczeniowe [105], często bazując na matrycach wpływów [89]. Prace porównujące algorytmy również nie podają jednoznacznie najlepszych modeli obliczeniowych, a jedynie pokazują możliwości i sposób działania [65]. Każde zmniejszenie liczby siłowników ogranicza możliwości ruchu struktury.

Drugim podejściem do wzrostu efektywności struktur jest ich cyrkularność. Jego implementacja jest decyzją mającą wpływ na opisywany wcześniej sposób obliczania LCA, nakładu energetycznego, lecz pozostaje prostym do policzenia zysków energetycznych podejściem w kształtowaniu struktur. Ze względu na niski poziom zaawansowania badań w dziedzinie efektywności nie jest jeszcze przebadana. W celu jej implementacji wymagane jest w pierwszej kolejności opracowanie możliwie uniwersalnego systemu konstrukcyjnego pozwalającego na realizację różnych struktur responsywnych. Na dalszym etapie należałoby zaproponować metody montażu i demontażu pozwalającego na zachowanie krytycznych parametrów fizycznych przez określona liczbę cykli wraz z podaniem metod analizy oraz dopuszczalnych wartości badanych parametrów. Może to skutkować wzrostem efektywności całej struktury jak przedstawiono na schemacie ideowym Grafika 5.



Grafika 5.Schemat opłacalności podnoszenia efektywności poprzez wprowadzanie ruchu i cyrkularności do struktur statycznych.

3.2 Kształtowanie koncepcji modelu zachowań

Struktury responsywne powinny reagować możliwie szybko w możliwie najefektywniejszy sposób. Każdy model zachowań złożony jest z minimum 3 osobnych, lecz współpracujących podsystemów. Pierwszym jest układ zbierania danych z otoczenia odpowiadający za kompletność uzyskiwanych danych oraz odpowiednią częstotliwość ich zbierania na potrzeby dalszej analizy. Temat ten szerzej opisany jest w opracowaniu [75]. Drugi system odpowiada za przetwarzanie informacji oraz generowanie wyników dla ruchu struktury. Jest to najczęściej jednostka centralna sterowana programem zmian geometrii. Stanowi on najważniejszy moduł struktury, który wymaga największej indywidualizacji. W jego ramach zawiera się również sam system wykonawczy ruchu. Trzeci system bada poprawność zmian geometrii. Pełni formę walidacji i zabezpieczenia dla struktury, która potrafi rozpoznać swoją pozycję w przestrzeni i korygować motorykę.

3.2.1 Koncepcja modułu głównego

Najważniejszy system sterujący nazywany dalej modułem głównym powinien dążyć do osiągnięcia jak najwyższych parametrów we wszystkich poniższych kategoriach:

-szybkość reakcji – im szybciej struktura uzyskuje dany wynik w postaci zmian swojej formy, geometrii, tym częściej zmiany te może wprowadzać w strukturze i funkcjonuje ona

efektywniej w bardziej aktualnych geometriach . Większość modeli badawczych architektury responsywnej bazuje na modelach zachowań zbyt wolnych, aby móc operować w zakresie obciążeń zmiennych. Wśród nich dominują struktury predestynowane do reagowania bez określenia czasu w jakim obliczenie wyniku nastąpi jak [69], [93]. Minimalna nawet dynamika obciążeń wprowadza konieczność uzyskiwania wyników w czasie rzeczywistym oraz dodatkowych zabezpieczeń kontrolujących strukturę podczas zmian geometrii jednoczesnych ze zmianami układów obciążenia. Dla obciążeń statycznych lub quasi statycznych zjawisko to jest minimalne i często pomijalne, lecz wraz ze wzrostem częstotliwości zmian obciążeń coraz istotniejsze stają się etapy ruchu ***„sub-moves”*** w miejsce samych jego wyników.

-efektywność reakcji – bazując na fundamentalnych założeniach architektury responsywnej skupiona powinna być wyłącznie na efektywności uzyskiwanej na drodze odciążenia struktury lub wydłużenia okresu jej użytkowania. Zawsze warunek ten wykluczać się będzie ze wcześniej zdefiniowanym czasem reakcji. Najczęstszym sposobem generowania reakcji struktury są sztywne matryce zachowań, które wymagały wcześniejszego zbudowania na przykład na bazie doświadczalnych parametrów zachowań. Oznacza to, że każda forma pierwszej generacji wyniku wymaga nieliniowego poszukiwania docelowej geometrii. Najczęściej silnikiem obliczeniowym pozostaje algorytm ewolucyjny [139], poszukiwanie form[140], [141], lub autorska metoda pozostająca w domenie iteracyjnych metod badawczych.

-bezpieczeństwo uwzględniające niedokładności – Każda struktura statyczna charakteryzuje się imperfekcjami wykonawczymi wpływającymi na zmianę układu naprężeń. Zgodnie z normami istnieją granice w jakich niedokładności mogą się zawierać, aby nie wywierać istotnego wpływu na strukturę i w konsekwencji nie obniżać bezpieczeństwa struktury. W kontekście architektury responsywnej wszelkie imperfekcje stają się pomijalnie nieistotne jeśli nie zawężają zakresu motoryki całej struktury mogą być kompensowane motoryką korekcyjną i nie obniżają nośności pojedynczych jej elementów. Szczególnie ważnym staje się zagadnienie podatności połączeń i osiowości pracy modelu. System w momencie analizy przypadku obciążeniowego nie jest w stanie uwzględniać niedokładności, które powstaną po przeprowadzeniu sekwencji ruchów do nowej geometrii. Dopiero w momencie zakończenia ruchu korzystając z trzeciego opisanego systemu możliwa jest weryfikacja zgodności uzyskanej formy ze wzorcem, a sam model może dokonać korekt ruchu pod warunkiem zaimplementowania opcji w kodzie modelu zachowań. Każdy ruch i każda poprawa dokładności ruchu wymaga nakładu czasowego. Oznacza to, że dla dowolnie szybkiego modelu obliczeniowego należy poszukiwać geometrii, które są dostosowane do szeregu następnych geometrii w miejsce powszechnego obecnie rozwiązania doboru formy do danego jednego przypadku obciążenia. Oznacza to dalej, że każda geometria uzyskana przez model musi być w pewnym stopniu uniwersalna. Pozwala to uniknąć wystąpienia niespodziewanych ekstremów naprężeń na elementach struktury podczas ruchu lub obliczeń, jednocześnie pozostając w konflikcie z wymaganiem maksymalizacji efektywności. Każda generalizacja geometrii wpływa na obniżenie efektywności.

- bezpieczeństwo pod względem awaryjności- bezpieczeństwo struktury responsywnej pozostaje w obecnych badaniach zagadnieniem czysto teoretycznym. Realizowane jako obliczenia przewymiarowania elementów oraz nakładów energetycznych i kosztowych na konserwację prezentowane w opracowaniach [87], [142] prezentują odmienną logikę niż responsywność wprowadzając pewien stopień statyczności. Nadal dominuje podnoszenie masy i zwiększanie nośności elementów. Proponowaną przez autora metodą jest opracowywanie „geometrii bezpiecznych”-„safe-shapes”. Bezpieczeństwo na wypadek awaryjności w strukturach responsywnych ma szersze znaczenie niż w standardowych obiektach. Samo przeciążenie elementu może nastąpić w znacznie większej gamie przypadków. Utrzymanie osiowości przy jednoczesnej zmianie kątów obrotu generuje trudności wykonawcze, które są pomijalne w symulacjach, lecz muszą zostać uwzględnione na etapie wykonania fizycznego modelu. Same siłowniki powszechnie w modelach stosowane mogą ulec uszkodzeniu uniemożliwiając ich użytkowanie. Ponadto możliwość wystąpienia

czasowych lub trwałych braków zasilania jako problem przynależny jedynie responsywności nie spotkał się dotychczas z wystarczającym omówieniem. W wypadku utraty zasilania struktura pozostaje w ostatniej geometrii obliczonej dla najnowszego przypadku obciążeniowego co oznacza, że będzie ona nieefektywna dla szeregu przypadków obciążeniowych jakie wystąpią w czasie awarii. Dalsze badania wykazują nawet 4-krotny wzrost naprężeń w strukturze w przypadku zastosowania niewłaściwej reakcji do danego przypadku. Opracowania naukowe jako rozwiązanie podają zastosowanie alternatywnych źródeł zasilania [64], lecz jest to rozwiązanie niewystarczające. Należy systemowo zadbać o u zyskanie geometrii spełniającej warunki wytrzymałości w każdym przypadku obciążeniowym. Może spotkać się to z koniecznością trwałego obniżenia nośności elementów lub całego modelu, lecz zapewnia użytkowalność struktury przez okres awarii zasilania. Dla danej struktury tworzona jest baza geometrii, które struktura jest w stanie uzyskać, aby trwale spełniać minimalne warunki nośności. Baza ta powinna zawierać przypadki geometryczne dla podstawowych sytuacji lokalnej utraty nośności, przypadki awarii każdego pojedynczego siłownika z osobna, gdzie dany pręt teleskopowany zamieniany jest na pręt zerowy oraz minimum kilka geometrii dla całkowitego wyłączenia zasilania. Minimalizuje to rozmiar systemów zapasowych energii jednocześnie zapewniając bezpieczeństwo w sytuacjach wyjątkowych.

-**minimalizacja zużycia elementów** – ostateczną efektywnością struktury jest oszczędność jaką użytkownik jest w stanie uzyskać stosując rozwiązanie responsywne w miejsce statycznego. Najczęstszym celem obecnie modelowanych systemów zarządzania strukturą jest minimalizacja energii całkowitej liczonej jako suma energii wbudowanej oraz użytkowej [69]. Podejście to ze względu na dynamikę zmian metodologii obliczeń energetycznych dla architektury może wymagać stałej adaptacji do zmiennych metod obliczeń. Bardziej trwałym rozwiązaniem jest wydłużenie okresu użytkowania struktury oraz obniżenie kosztów. W celu jego obliczenia i możliwości porównania z układami statycznymi należy odgórnie określić nośność struktury statycznej oraz dynamicznej. Różnica nakładów po czasie liczonym jako wymierny okres użytkowania obiektu powinna być nie tylko dodatnia, lecz pozwalać na przewyższenie zyskami kosztów pierwotnej implementacji ruchu w strukturze responsywnej.

3 z 4 wymienionych celów architektury responsywnej wzajemnie się wykluczają stanowiąc wyzwanie optymalizacyjne rozwiązywane indywidualnie dla każdej struktury. Ujęcie wszystkich wymagań w uniwersalnej formule zachowań zmniejsza wpływ każdego z parametrów, lecz argumentuje ekonomicznie słuszność stosowania struktur ruchomych. Można dokonać jednak pewnej hierarchii wagi wszystkich czynników i na jej podstawie określić logikę pracy aparatu obliczeniowego. Najważniejsza jest jak najszybsza reakcja struktury umożliwiająca jej operowanie w zakresie bezpiecznych naprężeń. Wymagane więc są opisane wcześniej preakcje. Potrzebna moc obliczeniowa do uzyskania wyniku jest znana wcześniej dlatego też wyznaczając czas w jakim struktura musi zareagować można w prosty sposób określić przepustowość obliczeniową systemu. Równolegle z poszukiwaniem wyniku przez preakcje należy korzystać z bazy matrycy zachowań, czyli spisu wszystkich już przebadanych rozwiązań. Definiując granicę różnicy między aktualnie występującym stanem obciążeń, a już uprzednio zdefiniowanym w bazie przypadków możliwe jest dobranie najbardziej podobnej reakcji jako efektywniejszej alternatywy preakcji. Zawsze stanowić będzie ona lepsze rozwiązanie, gdy przyjęte zostanie założenie budowania bazy jedynie na wynikach działania iteracyjnego systemu głównych ruchów. Dla takiej matrycy należy określić granice identyczności przypadków obciążeniowych, czyli ram w których dane dwa przypadki określone zostaną jako tożsame i nastąpi taka sama reakcja. Matryca stanowić może alternatywę dla preakcji, lecz zastąpić je może dopiero w momencie uzupełnienia bazy przy stanie zapełnienia rejestrów reakcji na poziomie umożliwiającym interpolację wszystkich pozostałych wyników. Budowa i zarządzanie matrycą wymaga osobnej mocy obliczeniowej. Matryca pozostaje stale zmienną bazą, nasycaną wynikami głównego modułu. Oznacza to, że im starsza pozostaje matryca tym wyższe mogą być granice nośności.

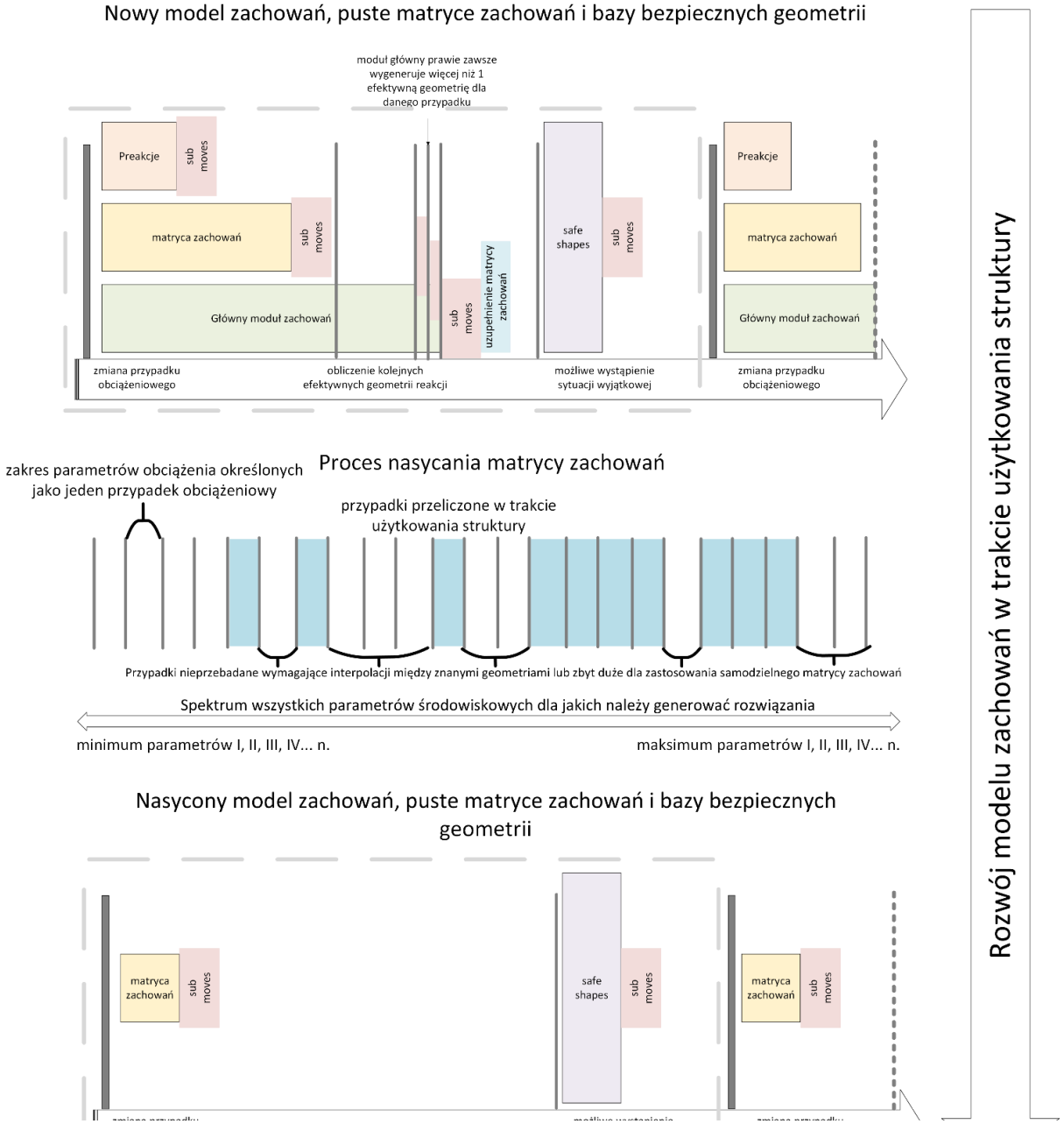
Główny moduł zachowań struktury stanowiący trzon badań architektury responsywnej w literaturze, w pracy pozostaje jedynie generatorem wyników rozbudowującym znaną już pulę geometrii wyjściowych. Ze względu na nieliniowość prowadzonych obliczeń i nieprzewidywalność wyników należy zakładać, że główny moduł zachowań nigdy nie stanowi jedynego modelu ruchu, lecz bez niego struktura nie umożliwia uzyskania satysfakcjonujących oszczędności energii i pracy. Model każdorazowo należy dobierać do danej struktury ze względu na zróżnicowanie reakcji i rozkładu naprężeń. Musi on posiadać własną moc obliczeniową wykorzystywaną w czasie działania pozostałych modeli generacji geometrii. Zależnie od formy głównego modułu może być on iteracyjny zbieżny czego przykładem jest dynamiczna relaksacja, iteracyjny półlosowy. Do grupy tej zaliczają się wszystkie modele zachowań bazujące na sztucznej inteligencji, predykcji i algorytmie ewolucyjnym. Każda inna forma zmienności, której czas obliczeniowy jest ściśle określony jest jedynie pośrednim rozwiązaniem stosowanym przed opracowaniem matrycy zachowań. Niektóre metody obliczeniowe zależnie od celowości mogą zaliczać się tak do jednej jak i drugiej grupy gdzie szereg kolejnych iteracji “do uzyskania granicznej wartości” stanowi algorytm główny, lecz szereg takich samych iteracji “określony liczbą kolejnych cykli powtórzeń” stanowi formę preakcji.

3.2.2 Bezpieczne geometrie

Bezpieczne geometrie stanowią kolejny, ostatni rodzaj reakcji wykorzystywany w sytuacjach wyjątkowych awarii lub uszkodzeń struktury. Funkcjonują jedynie w czasie wystąpienia jednego z czynników. Krótka lista geometrii bezpiecznych musi zostać wygenerowana przed przystąpieniem do realizacji struktury lub przed rozpoczęciem jej użytkowania. Jej budowa może być zmienna w czasie użytkowania modelu. Modele responsywne nie muszą stale wykorzystywać wszystkich swoich mocy obliczeniowych podczas całego czasu użytkowania. Podczas bezczynności moduł preakcji lub safe shapes może badać uniwersalność geometrii z matrycy zachowań. W momencie wystąpienia awarii jednak w pierwszej kolejności powinna być zlustrowana baza bezpiecznych geometrii w poszukiwaniu rozwiązań geometrycznych do natychmiastowego wprowadzenia w strukturze.

3.2.3 Forma pełnego modelu zachowań struktury responsywnej

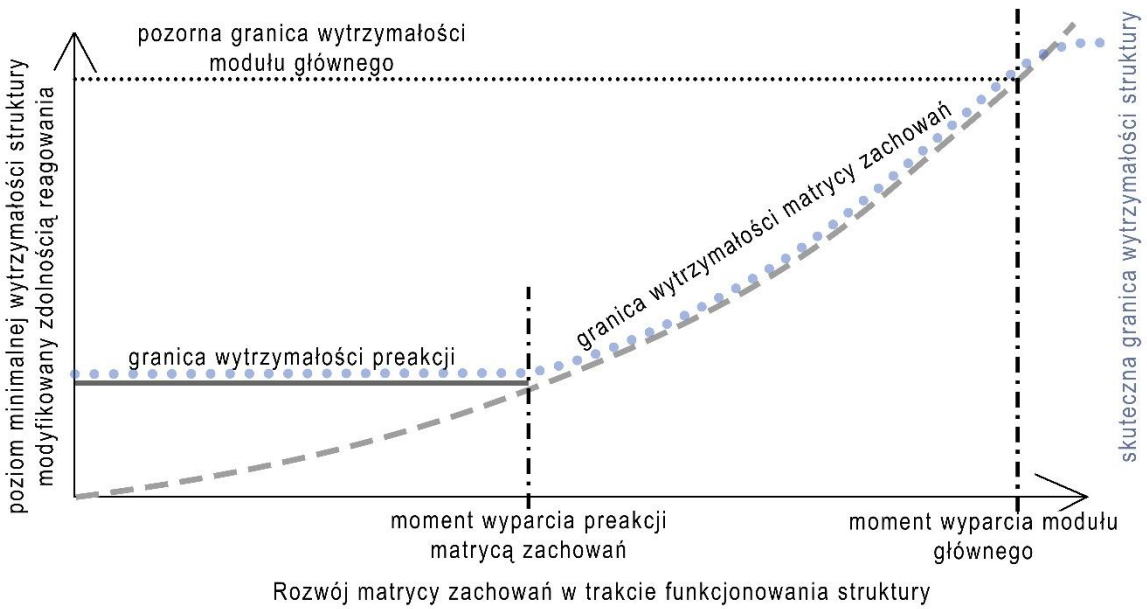
Finalnie struktura wymaga zaimplementowania od 3 do 4 modeli obliczeniowych pracujących jednocześnie w hierarchii zgodnej z opisaną metodą. Nadal jednak wymagany jest dodatkowy moduł obliczeniowy generujący przebieg transformacji między dwoma kolejnymi geometriami poszukując efektywnych geometrii pośrednich „sub-moves”. Każda aktualnie najlepsza geometria przed wprowadzeniem w strukturze musi zostać przeanalizowana i zoptymalizowana pod kątem ścieżki ruchu. W tym celu należy użyć dodatkowego modułu obliczeniowego analizującego stany pośrednie i zmiany naprężeń w strukturze podczas transformacji. W jej wyniku dana geometria może zostać oceniona jako niebezpieczna i nie wprowadzona w strukturze lub wprowadzona przy zastosowaniu indywidualnej ścieżki ruchu. Należy zróżnicować ocenianie zachowań przez moduł „sub-moves” ze względu na źródło geometrii wynikowych. Wszystkie geometrie wysłane przez matrycę zachowań lub preakcje muszą zostać zaakceptowane, nawet gdy w wyniku ich implementacji dojdzie do chwilowego przekroczenia naprężeń. Z kolei wszystkie geometrie generowane przez moduł główny zachowań podlegają walidacji i mogą nie zostać wprowadzone pod warunkiem wykrycia zagrożenia dla struktury. Wraz z postępem nasycania matrycy zachowań dochodzi do stopniowego wypierania preakcji z modelu zachowań. W wyniku całkowitego zastąpienia preakcji i dalej modułu głównego może dojść do uproszczenia modelu zachowań struktury co zostało pokazane na grafice Grafika 6.



Grafika 6.Schemat ewolucji modeli zachowań. Wprowadzenie uczenia maszynowego lub stworzenie pełnej matrycy reakcji pozwala na znaczącą redukcję stopnia złożoności pełnego modelu zachowań. Proces redukcji dla każdej struktury ma indywidualne tempo.

3.2.4 Zależność bezpieczeństwa pracy struktur responsywnych w zależności od stopnia nasycenia modeli zachowań

Wraz ze zmianami modelu zachowań w trakcie użytkowania obiektu zmienia się jego maksymalna nośność. Jest to proces nierówny wymagający zróżnicowanej porcji czasu dla każdego etapu każdej struktury indywidualnie. Modelowy wykres zmienności granicy nośności zaprezentowany na Grafika 7 prezentuje zmienność wartości wraz z nasycaniem matrycy zachowań. W pierwszej kolejności matryca zastępuje preakcje jako najmniej efektywne spośród zachowań. Następuje to w momencie uzyskania stopnia wypełnienia matrycy umożliwiającego interpolację wszystkich jeszcze nie uzyskanych wyników modyfikacji geometrii. W momencie tym możliwe jest uproszczenie modelu zachowań o usunięcie preakcji. Dalej następuje proces stopniowego podnoszenia nośności struktury. Nośność ta jest określona przez najniższą wartość nośności spośród wszystkich przebadanych przypadków obciążenia. Oznacza to, że matryca zachowań poza informacjami o obciążeniach i wynikowej geometrii każdego przypadku powinna zawierać dane o uzyskanej efektywności. Matryca pozostaje stale uzupełniana na podstawie wyników głównego modelu dlatego też stale zwiększają się minimalne wartości nośności. Finalnie matryca po wypełnieniu minimum jednokrotnym przez moduł główny charakteryzuje się taką samą lub wyższą bazową efektywnością mogąc zastąpić moduł główny modelu obliczeniowego. Określona na grafie pozorna granica wytrzymałości minimalnej nie może nigdy stanowić wyznacznika bezpieczeństwa ze względu na brak możliwości określenia w sztywnym zakresie czasu potrzebnego na wygenerowanie wyniku geometrycznego. Parametr ten przypisywany jest jedynie modułom uzyskującym wynik w jasno zdefiniowanych ramach mocy obliczeniowej.



Grafika 7. Wpływ stopnia nasycenia modelu zachowań na poziom bezpieczeństwa generowania reakcji struktury responsywnej.

4. Podnoszenie efektywności modeli struktur dyskretnych w oparciu o sposób uzyskiwania stabilnych geometrii w wyniku analizy dynamicznych relaksacji

4.1 Wstęp

Jak już opisywano kształtowanie zachowań struktur responsywnych wymaga pewności uzyskania konkretnego poziomu efektywności w konkretnej jednostce czasu. Ponadto wymagane jest określenie zakresu maksymalnej zmienności jaką operować będzie struktura, aby na podstawie tego kryterium móc dostosować elementy konstrukcyjne i ich stopnie swobody ruchu. Wszystkie te cechy najłatwiej połączyć w systemie obsługiwanym jedną podstawową zasadą ruchu.

Cechy te mogą być spełnione przez zastosowanie metody poszukiwania formy w kształtowaniu zmienności geometrycznej. Należy jednak określić, czy występuje dla niej minimalny próg efektywności lub czy istnieje zakres parametrów symulacji które spełniają wymagania minimalnej efektywności w każdym przypadku. W pierwszej kolejności określone zostaną parametry poddane badaniu, następnie z użyciem algorytmu ewolucyjnego oraz ręcznej analizy szeregów wyników określone zostaną wartości efektywne parametrów sterujących symulacją. Sprawdzona zostanie efektywność w czasie podczas zmian stanów obciążeń, a także wpływ ograniczenia ruchu na redukcję efektywności.

Poszukiwanie form jako jedna z najstarszych metod kształtowania geometrii struktur wykorzystywana jeszcze w XVII wieku choć wystarczająco opisana dopiero przez Frei Otto we wczesnych latach 50tych XX wieku stawiała przed projektantami wyzwania dobrania nie pojedynczego przypadku obciążeniowego dla którego struktura będzie przyjmować optymalny kształt, lecz geometrii uśrednionej w efektywny sposób dla wszystkich przypadków jednocześnie. Metoda rozwinęła się wraz z przyspieszeniem rozwoju elektroniki i metrologii elektronicznej przypadając na pierwszą połowę XX wieku. Mimo licznych podejść pomijających użycie specjalistycznych układów pomiarowych to właśnie podejście Frei Otto pozwalało na najprecyzyjniejsze i najszybsze kształtowanie i projektowanie form. Kluczowe jak się okazało, było wierne odtwarzanie w dokumentacji projektowej form uzyskanych fizycznie. Odwzorowania analogowe sięgające 0,001mm wykorzystywane przez Heinza Islera spotykały się z powszechnym uznaniem, lecz dopiero komputeryzacja i automatyzacja tego procesu pozwoliły na zadowalające tempo i dokładność badań.

4.1.1 Podstawy teoretyczne metod poszukiwania form struktur membranowych

Metoda poszukiwania form stanowi ogólne określenie na trzy kolejne sposoby uzyskiwania geometrii. W każdej głównym wynikiem jest homogenizacja naprężeń co w każdym przypadku prowadzi do zmniejszenia naprężeń maksymalnych i zwiększenia nośności struktury. Każda jednak wykorzystuje inne zjawiska fizyczne pozwalające na uzyskanie form.

4.1.1.1 Struktury oparte o krzywą łańcuchową

Struktury zawieszane jako najwcześniejsza forma kształtowania spośród rozwiązań poszukiwania form oparta o zdefiniowanie punktów zawieszenia w dowolnej liczbie i układzie pozwala na tworzenie tak ciągłych kształtów jak i pozornie dyskretnych. Dyskretnych rozwiązań można doszukiwać się w kształtowaniu np. Sagrada Familia, której forma jest wynikową krzywych łańcuchowych reprezentujących dalej w uproszczeniu konstrukcje monolityczne. Z kolei podejście Heinza Islera w XX wieku pokazuje wyniki kształtowania struktur powłokowych z użyciem modeli ciągłych. W kształtowaniu trzy kluczowe czynniki definiują stopień poprawności zastosowania metody. Pierwszym z nich jest układ sił i podpór.

Dla każdego układu punktów mocowania modelu podczas zwisu swobodnego pod wpływem siły grawitacji istnieje nieskończoność geometrii o minimalnych gradiencie naprężeń, lecz użycie materiału o konkretnych właściwościach fizycznych do stworzenia modelu warunkuje wybór dokładnie jednej geometrii najrównomierniejszej pod względem sił wewnętrznych. Przytoczony zbiór cech jako drugi czynnik wpływający na poprawność generowanych form określany jest sztywnością, uziarnieniem materiału, jednorodnością oraz w minimalnym stopniu wszystkimi czynnikami mającymi wpływ na uzyskiwaną formę. Problem doboru materiału o odpowiedniej charakterystyce tak jak w twórczości Islera dotyczy skalowania wyników i zachowań materiału. Nieekonomicznym było i nadal jest stosowanie poszukiwania form na modelach w skali rzeczywistej, z kolei skalowanie modeli wymaga skalowania również cech fizycznych których odniesienie skali wymiarów na wartości fizyczne nie jest trywialne i nie przebiega według funkcji jednej zmiennej. Zachowanie odpowiednich proporcji sztywności materiału modelu do materiału rzeczywistego odpowiada w największym stopniu za poprawność otrzymywanych wyników.

Niemniej ostatni czynnik jakim jest dokładność dokumentacji wyników wymusza zastosowanie możliwie nowoczesnych technik w celu uzyskania jak największej dokładności. Formy otrzymywane w opisywany sposób są niezwykle czułe na minimalne odkształcenia dlatego też skala wymaganej dokładności rośnie o co najmniej rząd wielkości względem jakichkolwiek innych struktur. Konieczność utrzymania dokładności wymuszała w czasach formułowania metody wykorzystania autorskich narzędzi, a obecnie stanowi dziedzinę badań zbieżności zrealizowanych struktur do geometrii idealnych uzyskiwanych obliczeniowo.

Niedokładności modelowe i wykonawcze w metodzie odgrywają kluczową i jedyną rolę efektywności. Nadal jednak możliwość ich wyeliminowania nie zapewnia znaczącego wzrostu użyteczności stosowania metody ze względu na indywidualność wszystkich uzyskiwanych form. Każda geometria jest odpowiednia dla tylko jednego układu sił, lecz jednocześnie dla każdej wypadkowej sił powierzchniowych oraz dla każdego układu sił punktowych powstaje inne rozwiązanie geometryczne. Umiejętność zdefiniowania dominujących sił w projektowanym obiekcie i przebadanie jej wpływu na model z odniesieniem w skali jest istotna i trudna do osiągnięcia. Najczęściej na model ciągły oddziaływać będą siły powierzchniowe na części lub całości struktury. W modelach Islera były one symulowane poprzez dyskretyzację ciągłych sił na regularnie rozmieszczone punkty. Systemami kaskadowo zawieszanych obciążników udawało się uzyskać bardzo dokładne przeniesienie obciążeń ciągłych. Problemem pozostawał kierunek przykładanej siły, który mógł być jedynie pionowy[143].

4.1.1.2 Struktury o minimalnej powierzchni

Drugą metodą w poszukiwaniu form było rozciąganie struktur między punktami podporowymi. Najczęściej lokalizowanymi na palach na znacznej wysokości. Siła naciągu membranowych przykryć dla dowolnego układu podpór pozwalała uzyskać kształty zadaszeń o minimalnej powierzchni. W metodzie tej dwa czynniki miały kluczowy wpływ na skuteczność. Pierwszym było wyeliminowanie wpływu grawitacji. Odbywało się to częściowo poprzez wykorzystanie bardzo lekkich wiotkich i elastycznych materiałów, dla których wpływ grawitacji był pomijalnie mały szczególnie w skali modelowej, co z różną skutecznością udawało się zaimplementować w obiektach budowanych. Drugim czynnikiem była odpowiednia geometria obwiedni membrany. Teoretycznie zasada kształtowania membranowych przykryć wywołuje w miejscach podporowych akumulację naprężeń wewnętrznych o skończonej wartości na nieskończenie małej powierzchni. Każde mocowanie do podpory wymuszało zastosowanie stalowych płatowych łączników rozkładających naprężenia z podpory na pewną skończoną długość obwiedni membrany. Im większa była projektowana siła naciągu tym większa płyta stalowa musiała zostać zaprojektowana. Drugą podnoszoną przez Frei Otto kwestią było zachowanie pewnych nieprzekraczalnych długości krawędzi bocznych bez podparć pośrednich. Doświadczenie wykonawcze niemieckiego projektanta pokazywało, że dwukrotne zwiększenie długości krawędzi luźno zawieszonej wymusza ośmiokrotne zwiększenie naciągu dla utrzymania stateczności. Oznacza to, że praktyczne wymogi wykonawcze ograniczają

teoretycznie nieskończoną ilość układów membran. Częstym zabiegiem było wzmacnianie obrzeży linami co miało zapewniać ich stały naciąg.

Dla fizycznych realizacji da się zauważyć trudności spełnienia wszystkich omówionych wymagań. Membrany dla największych realizacji jak Mannheim Museum zostały zamienione na dyskretne poliwęglanowe panele, a ich praca miała znamiona membranowej jedynie na cięgnowych obrzeżach.

4.1.1.3 Struktury pneumatyczne

Ostatnią formą realizacji poszukiwania formy są struktury pneumatyczne. Ich sposób przygotowania jest najbardziej techniczny i wymaga stosowania pomp lub ich alternatyw. Polega na szczelnym zamocowaniu elastycznej powłoki na sztywnym podłożu i wywołanie nadciśnienia wewnątrz generując równomierne obciążenia powierzchniowe na całą strukturę. Pionierem w tej metodzie był Heinz Isler, który opisał problem linii krawędziowej i podpór. Nie jest możliwe dowolne kształtowanie obwiedni takiej struktury ze względu na występujące w okolicach narożnych krawędzi naprężenia ściskające, całkowicie zaburzające pracę struktury i prowadzące do zaburzeń statyki całych obiektów. Problem przedstawił na powszechnie znanym modelu ***„pillow shape”***. Z tych samych powodów również wcześniejsza metoda membran rozciąganych wymaga stosowania płyt mocujących materiał do podpory. Ważne, aby podczas tworzenia modelu zachowywać ciągłość podpór pracujących wyłącznie na rozciąganie oraz korzystać z materiałów o odpowiednio zróżnicowanej sztywności jak membrana kauczukowa i beton. Membrana stanowi materiał poddawany naporowi ciśnienia i pod nim deformowalny, natomiast beton służyć ma jako podłoże nie poddające się deformacji w wyniku działania ciśnienia. W efekcie, struktury tak uzyskiwane charakteryzują się niespotykaną w innych strukturach płytką formą. Zauważalne było to już w pierwszych realizacjach jak pawilon amerykański na wystawie expo 67’ w Montrealu, czy bardziej nowoczesne zadaszenie stadionu narodowego w Pekinie.

Wśród istniejących opracowań wyróżnia się zastosowanie metody poszukiwania form w kształtowaniu kratownic przestrzennych [140]. Większe wymagania ograniczające ruch w znacznie większym stopniu prezentowane zostały w [141]. Podobne, lecz nietożsame podejście charakteryzowały wcześniejsze metody wykorzystujące dynamiczną relaksację [144]. Ta metoda obecnie stosowana w niektórych rozwiązaniach inżynierskich stanowi atrakcyjną alternatywę dla poszukiwania form ze względu na łatwość użycia w iteracyjnych metodach obliczeniowych. Wynik badań metody uzyskuje znacznie większą skuteczność wykorzystania i charakteryzuje się równiejszą wytrzymałością, gdy stanowi interpolację wyników skrajnych. Trudność jednak polega na braku prostych metod interpolacji, które nie mogą ograniczać się do średniej geometrycznej z kilku kolejnych geometrii. W metodzie struktury efektywne można dobierać matematycznymi metodami z użyciem algorytmów poprzez określenie puli przypadków możliwie różnorodnych, gdzie każdy przypadek po przeliczeniu uzyskuje wartość parametru penalizacji prezentujący jak każda badana geometria jest do niego niedostosowana poprzez wartość maksymalnych naprężeń. Oznacza to, iż badanie powinno zostać przeprowadzone dla kilku kolejnych geometrii, a wynikiem jest uśredniona geometria dostosowana w pewnym stopniu do wszystkich przypadków badanych.

Im mniejsza uniwersalność uzyskanej geometrii, tym jednokrotny zysk obniżenia maksymalnych naprężeń uzyskuje wyższy wskaźnik jednak maleje zakres błędu wykonawczego danej struktury i maleje efektywność modelu dla wszystkich innych przypadków obciążeniowych. Jednocześnie wzrasta częstotliwość zmian geometrii czemu w sukurs idą wyższe nakłady energii kinetycznej na ruch modelu.

Kształtowanie więc geometrii dla statycznych struktur z użyciem rozwiązań poszukiwania form jest znacznie mniej efektywne niż zastosowanie metody w strukturach responsywnych o zmiennej geometrii. W zależności od częstotliwości zmian możliwe jest dobieranie bardziej zindywidualizowanych geometrii. Nadal koniecznie jest jednak zachowanie pewnego stopnia uogólnienia geometrycznego ze względu na skwantyfikowany charakter pomiaru warunków zewnętrznych i reakcji systemu.

Głównym problemem użycia metody w strukturach kratownicowych jest sposób generowania wyników na który znaczący wpływ ma stopień ciągłości struktury. Poszukiwanie form generuje krzywe sznurowe tak dla obciążeń ciągłych jak i punktowych uwzględniając masę własną struktury. W modelach prętowych następuje pewne przybliżenie krzywoliniowej geometrii prostymi prętami. Upraszcza to dalsze odwzorowanie uzyskanej struktury poprzez konieczność zapamiętania jedynie pozycji punktów węzłowych, lecz generuje różnice między symulacją a wynikami rzeczywistymi pomiarów naprężeń. Główną zaletą metody poszukiwania formy dla struktur responsywnych jest ujednolicanie naprężeń. Struktura uzyskuje geometrie, które mają najmniejszy gradient sił. Oznacza to, że maksymalne naprężenia nie wystąpią punktowo, a w pewnych strefach, sekcjach struktury.

W celu przeprowadzenia badań wszystkich opisanych zagadnień wykorzystano oprogramowanie Rhinoceros Grasshopper pozwalające na modelowanie geometrii struktur oraz dalsze zarządzanie nimi w czasie rzeczywistym. Środowisko wyposażone jest w moduł obliczeniowy dla membran poddawanych oddziaływaniom zewnętrznym punktowym oraz powierzchniowym. W pierwszej kolejności badaniu podlegać będzie porównawcza efektywność i jej wzrost w modelu ruchomym oraz statycznym w indywidualnych przypadkach obciążeniowych. Następnie określona zostanie efektywność dla bardziej uniwersalnych przypadków tworząc dla każdej reakcji przedziały warunków zewnętrznych w miejsce pojedynczych precyzyjnych wartości. Określone zostaną parametry symulacji wpływające na efektywność uzyskiwanych geometrii. Zbadana zostanie statyka rozkładu naprężeń w czasie ruchu struktury stale obciążanej tak w pionie jak i poziomie.

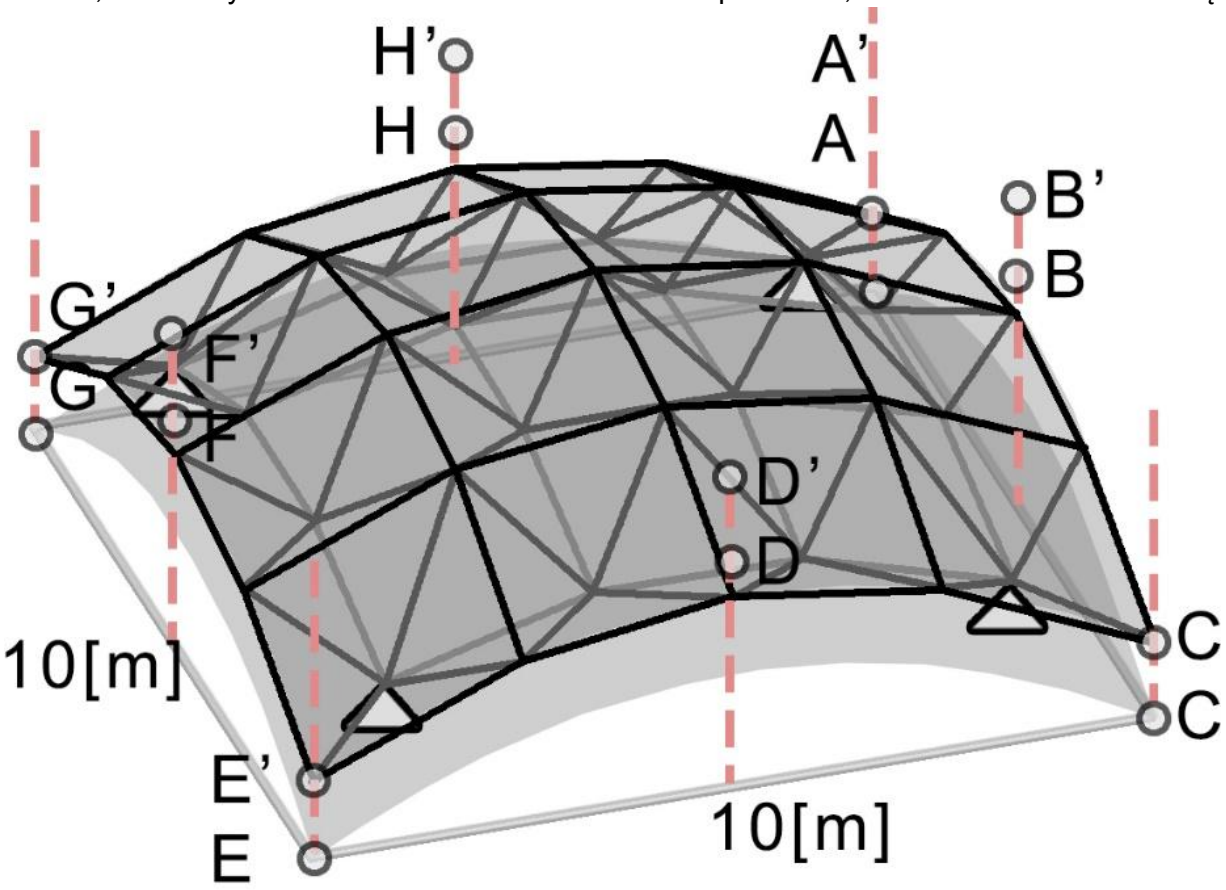
4.2 Badania uzyskiwania efektywności poprzez budowę modeli sterowanych zachowaniami membranowymi

4.2.1 Budowa stanowiska badawczego wraz z modelem zmian geometrii

Model badawczy wykonano w oprogramowaniu Rhinoceros Grasshopper wykorzystując nakładkę Karamba 3D oraz LunchBox. Oprogramowanie daje możliwość tak modelowania geometrii jak i zarządzania strukturą co jest kluczowe w badaniach architektury responsywnej.

Za najodpowiedniejszą strukturę wybrano kratownicę przestrzenną kreśloną na planie kwadratu. Zamodelowano powierzchnię określoną 10 punktami, następnie podzielono ją na 6 segmentów w każdym kierunku uzyskując 100 jednakowych w rzucie powierzchni kwadratowych. Następnie powłoce nadano parametry membrany. Na 4 krawędziach metodą ***„Edge Surface”*** rozciągnięta jest powłoka zakrzywiona jednokierunkowo. Analogicznie budowana jest druga powłoka, lecz jest bazowo opisana 4 krzywymi NURBS oddalonymi w każdym punkcie o 1m zgodnie ze zwrotem wektora „Z”. Między obiema płaszczyznami metodą ***„Truss Space 2”*** rozciągnięta jest przestrzenna struktura prętowa o siatce kwadratowej i 6 węzłach w każdym kierunku u góry i 5 węzłach na dole, gdzie dolna warstwa jest przesunięta o pół ogniwa względem górnej i każdy nieskrajny węzeł wolnej warstwy połączony jest 4 prętami z węzłami górnej warstwy. Określono sztywność, elastyczność, skurcz materiałowy struktury deformując wszystkie powierzchnie tym mocniej im bliżej naroży dużego kwadratu się znajdowały.

Każda symulacja formfinding polega na iteracyjnym wyrównywaniu naprężeń w strukturze z wykorzystaniem rozwiązań dynamicznej relaksacji. Należy określić próg skoku gradientu naprężeń sąsiednich pól powłoki. Parametr ten definiuje jak homogeniczne powinny być naprężenia sąsiednich pól płaszczyzny, aby system zakończył obliczenia pojedynczego przypadku. Symulacja iteruje geometrię struktury do momentu, gdy różnica naprężeń między wszystkimi sąsiednimi polami nie zostanie zredukowana poniżej wartości ***„treshold”*** granicznej. Zdefiniowano 4 punkty zaczepienia ***„anchors”*** stanowiące punkty o teoretycznie zerowej powierzchni. W realizacjach struktur membranowych punkty zaczepienia stanowią nietrywialny problem projektowy wymuszając zwiększenie szerokości struktury w miejscu oparcia oraz każdorazowej zmiany materiału wiotkiego na sztywne łączniki stalowe ze względu na akumulację naprężeń w tych miejscach. Często również w miejscach podporowych, gdzie dochodzi do wytężonej pracy struktury następuje redystrybucja sił wewnętrznych i struktura podlega ściskaniu na prawie całej powierzchni, lecz w miejscach podporowych dominujące staje się rozciąganie Jest to zauważalne bez przeprowadzania badań sił wewnętrznych – struktura posiada charakterystyczne przegięcie krzywizny odciążając materiał bliżej centrum powłoki, a zwiększając wytężenie krawędzi bocznych. W miejscach granicznych naprężeń zerowych między dwoma kolejnymi charakterami pracy struktury kształtuje się łączniki. Ich alternatywą w symulacji ze względu na konieczność uproszczenia warstwy obliczeniowej jest teoretyczne zwiększenie powierzchni oparcia. Na 4 punkty podporowe wybrano 4 kolejne naroża, dla których zawsze blokowano możliwość przesuwu, lecz nadawano całkowitą



Grafika 8. Schemat budowy modelu komputerowego kratownicy przestrzennej wraz z punktami kontrolnymi umożliwiającymi sterowanie modelem

swobodę obrotu w każdej płaszczyźnie. Następnie nadano symulacji maksymalne wartości zmiany długości liniom łączącym kolejne punkty kontrole w siatce czworokątów. Schemat budowy modelu przedstawiono na grafice Grafika 8.

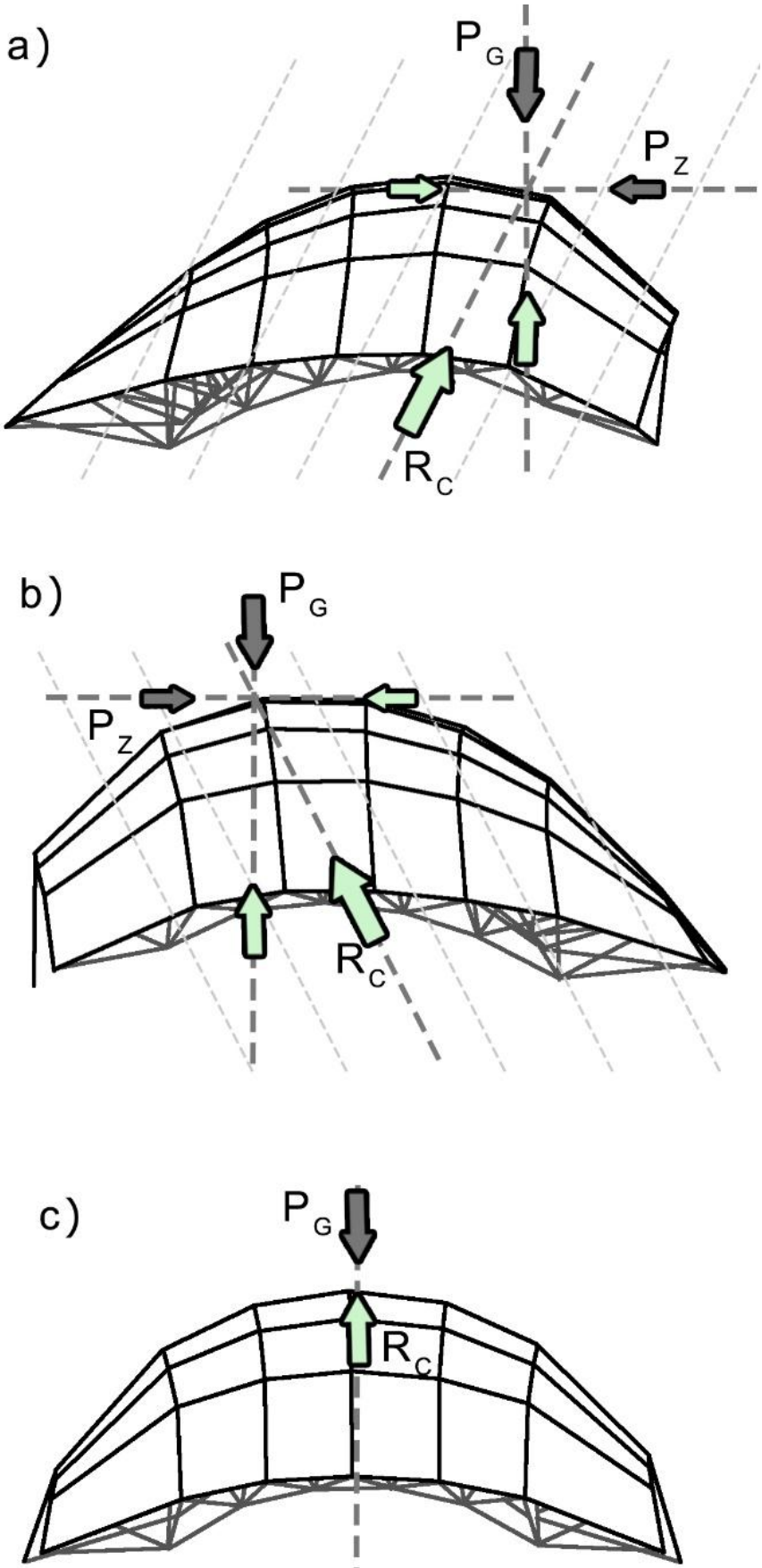
Tak przygotowana struktura została poddana działaniu naporu powierzchniowego równomiernego o dowolnym kierunku i zwrocie. Membrana symulowana jest w Grasshopper funkcją ***„ZombieSolver”*** pozwalającą natychmiastowo uzyskiwać geometrie wynikowe. Struktura przeprowadza szereg iteracji, które obrazowane są dopiero po zakończeniu procesu obliczeń. Znacząco zmniejsza to koszty obliczeniowe i pozwala na szybsze uzyskiwanie rezultatów. W Tabela 1 zebrano wszystkie parametry wejściowe kluczowe dla odtworzenia zachowań membrany

Tabela 1. Zestawienie parametrów pracy dla algorytmu ewolucyjnego.

Ilość podziałów wzdłuż jednej krawędzi	10
Siła sztywności krawędzi	1.0
Współczynnik zachowania długości linii	0.85
Ilość iteracji	10
Granica symulacji	$1{,}442 * 10^{-7}$
Współczynnik tłumienia	0.962
Siła usztywnienia punktów kotwienia	10 000

Średni czas symulacji na podstawie dalszych badań gotowego modelu wynosi 0,6 sekundy. Po tym czasie membrana uzyskuje wynikową geometrię tworząc zdeformowaną powłokę o złożonej krzywiźnie. Ta dalej stanowi podstawę, na której rozliczona jest kratownica przestrzenna dostosowana do uzyskanej krzywizny dynamicznych relaksacji. Kratownica rozliczana jest metodą ***„Space Truss 2”*** z dodatku LunchBox do Grasshopper. Funkcja rozciąga przestrzenną kratownicę na dowolnej ciągłej powłoce z określoną jednakową w każdym miejscu głębokością. Struktura przyjmuje formę dwóch siatek kwadratowych przesuniętych o pół ogniwa w obu kierunkach połączonych w narożach ukośnymi prętami. Przy zmianach krzywizny powłoki definiującej następuje przemieszczenie węzłów, lecz ilość elementów tworzących daną kratownicę pozostaje stała zdefiniowana w formule, w badaniu określona na 6 segmentów. Taki sposób operowania kratownicą pozwala na ograniczenie swobody sterowania strukturą jedynie do wydłużania i skracania prętów co stanowi typowe rozwiązanie w architekturze responsywnej, powielane w szeregu prac badawczych jak [71]. Arbitralnie określono przekroje elementów wchodzących w skład modelu. Wszystkie pręty wykonane są ze stali S235 i jednakowej wytrzymałości na ściskanie oraz rozciąganie. Pręty przyjmują przekroje rurowe cienkościenne o średnicy 12cm i grubości ścianki 5mm. Kratownica złożona z prętów oraz węzłów podlega dalej obliczeniom statycznym. Z użyciem nakładki Karamba 3D wszystkie elementy wchodzą w skład obliczeń statycznych. Każda podpora jest usztywniona na przemieszczenia, lecz pozostaje swobodnie obrotowa we wszystkich płaszczyznach determinując prace struktury jako duże deformacje zgodnie z warunkami postawionymi w [67], [89] wywołując zmiany naprężeń, zmianą geometrii przy założeniu zerowych sił wewnętrznych zginających. Na model obliczeniowy oddziałuje siła grawitacji oraz obciążenie poziome wprost proporcjonalne do sił przyłożonych na membranie odkształcalnej. Zmienny pozostaje jednak współczynnik skali reakcji struktury na zadane siły. Wartość parametru ma zostać dobrana eksperymentalnie w trakcie badań.

Zasada poszukiwania form opiera się o dobór geometrii na podstawie sił przeciwnie deformujących strukturę niż siła której model ma efektywnie przeciwdziałać. W tym celu odwrotnie podłączono kierunki sił działających na membranę oraz kratownicę tak aby każde obciążenie z jednej strony generowało kontrintuicyjny kształt modelu wyginający się w kierunku, z którego naciera siła powierzchniowa. Zasadę działania modelu przedstawiono na grafice Grafika 9.



Grafika 9.Sposób działania modelu sterowanego ruchami analogicznej membrany. Jeśli model zarejestruje obciążenie z prawej strony przeprowadzi symulację ciśnienia napierającego na membranę ze strony przeciwnej

4.2.2 Sposób działania modelu podczas symulacji

Standardowy moduł obciążeń modelu pozwala na definiowanie wartości na każdy segment powłoki indywidualnie, lecz nie pozwala na automatyczne rozkładanie sił w zależności od kąta nachylenia powierzchni względem siły. Dlatego też opracowano autorski sposób rozkładu sił na strukturze. Dokładność i odwzorowanie realistycznych zachowań jest ważne ze względu na konieczność badania nie tylko wynikowych geometrii, lecz również ruchów pośrednich określanych jako „sub-moves" [139], które generować mogą największe maksymalne naprężenia nie uwzględniane podczas obliczeń gotowych geometrii. W celu zasymulowania realistycznych obciążeń podzielono górne pasmo kratownicy na 36 segmentów. Każde zostało określone jako w pełni szczelne pokryte panelem wykończenia o pomijalnie wysokiej wytrzymałości. Podczas obciążania danej powierzchni siły rozkładają się równomiernie na wszystkie 4 naroża. Każdy panel nachylony jest pod innym kątem, dlatego też wywiera inne siły na węzłach. Struktura w założeniu obciążona jest jedynie węzłowo z zastosowaniem opisanego systemu co pozwala na zastosowanie metody dużych deformacji w zarządzaniu ruchu strukturą. Każdy węzeł stanowi wierzchołek 4,3 lub 2 paneli. Na każdym węźle dochodzi więc do sumowania obciążeń wszystkich sąsiednich paneli. Oznacza to, że wpływ na układ sił na strukturze ma tak kierunek i siła obciążenia jak i chwilowa geometria struktury. Dodatkowo analogicznie do badań obciążenia wiatrem zaprogramowano moduł badania strony zawietrznej i nawietrznej poprzez określanie wysokości i kątów nachylenia panelu względem siły. Gdy panel znajduje się niżej niż bardziej skrajne panele lub gdy jest pod kątem większym niż 180 stopni względem kierunku obciążenia staje się panelem wyłączonym z analizy obciążeń pozostając jedynie usztywnieniem struktury lub wywoływane są na nim siły przeciwne w efekcie zjawiska podciągania charakterystycznego dla analogicznych modeli obliczeniowych sił obciążenia wiatrem. Analiza nie uwzględnia modeli wiatru opływowego, turbulentnego czy chaotycznego co dla modelowanej skali obiektu nie będzie mieć kluczowego wpływu na strukturę.

Rozciągnięcie dyskretnej struktury na ciągłej powłoce generuje niedokładności odwzorowania krzywizny co może mieć wpływ na efektywność uzyskiwaną podczas badań. W celu określenia spadku efektywności zaprogramowano model obliczeniowy dla powłoki rozciągniętej na tej samej powierzchni, na której rozliczana jest kratownica. Oczekiwanym wynikiem jest spadek naprężeń maksymalnych i ujednolicenie ich na całej powłoce przy zwiększaniu liczby podziałów kratownicy. To oznacza, że powłoka o teoretycznie nieskończonej liczbie podziałów jest poprawnym modelem referencyjnym względem którego rozliczana będzie efektywność kratownicy. W czasie przeprowadzania obliczeń statycznych dla kratownicy równolegle model oblicza naprężenia powłoki. Następnie modułami matematycznymi oba zestawy wyników są porównywane. Każdy z prętów jest osobno analizowany pod kątem zmian naprężeń na nim występujących w czasie. Wartości są zbierane w formie wykresów i interpolowane przy próbkowaniu z częstotliwością około 2-6 Hz. Logika programowania modelu miała również pozwalać na proste podłączenie zewnętrznych czujników i modeli elementów ruchomych w celu częściowej weryfikacji poprawności symulacji i wyników analiz w dalszej części opracowania.

Wyniki pomiarów przedstawiane są w formie graficznej jako wynikowa geometria tak dla kratownicy jak i powłoki jako wartości liczbowe stopnia wytężenia poszczególnych prętów. Dodatkowo zbierane są dane na temat położenia poszczególnych węzłów pozwalając na precyzyjne odtwarzanie geometrii przy zastosowaniu kształtowania równoległego ***„parallel forming"***.

4.2.3 Przygotowanie przypadków obciążeniowych na potrzeby badań

W celu określenia proporcjonalności zmian naprężeń na obu ustrojach symulowanych przygotowano generator 20 przypadków obciążeń powierzchniowych. W grupie badawczej przypadków znalazły się obciążenia wyłącznie pionowe, wyłącznie poziome, przypadki kombinowane łączące kilka sił. Przygotowano 6 kolejnych obciążeń o podobnym zwrocie wektora lecz rosnącej wartości siły oddziałującej na model w celu określenia skali wzrostu reakcji. Dla kolejnych 3 wartości sił przypadków obciążeń opisanych w tabeli nr 1 określone zostaną współczynniki proporcji naprężeń na obu modelach.

Dla każdego przypadku obciążeniowego badana jest w pierwszej serii testów bazowa wartość naprężeń maksymalnych co pozwoli na określenie tendencji jak dla danych kierunków sił zmienia się stopień użycia przekrojów. W drugiej serii następuje badanie efektywnych parametrów skali reakcji z użyciem algorytmu ewolucyjnego. Poszukuje on układu współczynników, dla których parametr efektywności jakim w badaniu jest naprężenie maksymalne osiąga najniższą wartość. Do poszukiwania efektywnych wartości wykorzystuje on metody stochastyczne wspierane uczeniem maszynowym, aby rozpoznawać i wykorzystywać tendencje zmian wyników w zależności od zmian wartości parametrów składowych. W trzeciej serii to samo badanie przeprowadzone zostanie dla efektywności definiowanej jako średnia wszystkich naprężeń.

Badanie rozpoczyna się od zresetowania struktury tak aby zawsze wyjściowa geometria była jednakowa. Następnie aplikowanych na strukturze jest kolejno 20 przypadków obciążeniowych złożonych z trzech kierunków sił – X, Y oraz Z. Wartości dobierane są w zakresie od -5kN do 5kN. Dla każdego kolejnego przypadku wykonywane są obliczenia statyczne uzyskanej struktury. Analizie podlegają maksymalne naprężenia na powłoce. Dodatkowo zbierane są dane o parametrach wejściowych symulacji, w szczególności współczynniki skalowania sił. Osobno dobierane dla każdego kierunku na podstawie 20 przypadków obliczeniowych mają pozwolić na opracowanie funkcji doboru wartości parametrów na podstawie siły w zadanym kierunku.

4.2.4 Badania doboru wartości parametrów wejściowych symulacji

4.2.4.1 Przebieg badania

Na podstawie tych samych 20 przypadków obciążeniowych dobrane zostały wartości skalowania reakcji we wszystkich kierunkach X, Y oraz Z. W trakcie badań poszukiwano wartości możliwie uniwersalnej w celu zaimplementowania jej do ostatecznego modelu zachowań. Zresetowano kształt początkowy struktury w celu wyeliminowania wpływu wcześniejszych geometrii na formę wynikową. Następnie przeprowadzono symulację poszukiwania parametrów z wykorzystaniem algorytmu ewolucyjnego. Badanie przeprowadzono dla standardowych w programie Grasshopper parametrów obliczeniowych – populacja badanych wersji modelu – 25, początkowy współczynnik przypadków do badania - x2, współczynnik zmienności ***„inbreeding”*** – 75%, współczynnik powtarzalności ***„maintain”*** – 5%. Dla każdego przypadku obciążeniowego przeprowadzono min 7 etapów ***„stages”*** analizy algorytmem ewolucyjnym. Każde kolejne badanie przeprowadzano z wykorzystaniem danych wyjściowych badania poprzedniego. Stworzyło to historię zmian zależnych w całym ciągu badań.

Badanie dla każdego przypadku trwało średnio 17minut. Wartość ta wahała się zależnie od wymaganej liczby iteracji przed uzyskaniem żądanej wartości współczynnika zbieżności w każdym analizowanym przypadku. Na pojedyncze badanie więc przypadało dokładnie 175 zestawów przeanalizowanych parametrów. Wyniki zebrano i przedstawiono w Tabela 2. W pierwszym badaniu określono dla domyślnych wartości programowych parametrów wstępnych symulacji wyniki uzyskane w formie maksymalnych naprężeń.

Następnie wykorzystując algorytm ewolucyjny poszukiwano efektywnych wartości współczynników X, Y oraz Z, ***„strength -vertex load”***, ***„length factor”*** oraz ***„strength – Edge length”***.

4.2.4.2 Wyniki

Algorytm na różnych etapach badania znajdował ostateczne efektywne wartości wszystkich parametrów. Dla ***„length factor”*** oraz obu parametrów ***„strength”*** wartość tę wyznaczył na pierwszym badaniu. Następne badania powielały ich wartości uzyskując możliwie najniższe wartości naprężeń. Z kolei do 13 badania definiowane były kluczowe współczynniki skali reakcji „X”, „Y” oraz „Z” przyjmując kolejno wartości 986, 45 oraz 755. Jest to współczynnik bez jednostki pokazujący jedynie różnicę skal reakcji. Wyniki pokazują, że geometria uzyskana poprzez parametry wejściowe symulacji charakteryzuje się bardzo dobrą sztywnością we wszystkich kierunkach, a zmiana parametru w osi X wpływa bezpośrednio na sztywność układu i rozkład naprężeń w osi Y. Bazowa krzywizna struktury jest efektywna na obciążenia pionowe, dlatego też dowolna zmiana wartości obciążenia grawitacją ma minimalny wpływ na jednorodność i dalej efektywność rozkładu obciążeń.

Po ustaleniu ostatecznego zestawu parametrów symulacji wszystkie otrzymywane geometrie charakteryzowały się minimum 4% wzrostem efektywności dochodząc do maksymalnie 26% wzrostu wytrzymałości. Dla ostatecznego układu parametrów przebadano ponownie wszystkie wcześniejsze przypadki i uzyskano wzrost efektywności we wszystkich przypadkach poza nr 3.

Efektywność zależna była również od kierunku obciążenia poziomego. Odnotowywalne różnice wartości naprężeń zauważa się między takimi samymi lub podobnymi wartościami obciążeń, lecz o różnych kierunkach. Przykładem są badania nr 5 oraz 11 gdzie zmiana kierunku przy podobnych wartościach sił skutkuje znaczącą zmianą efektywności. Największy wzrost naprężeń nie występował z kolei w przypadkach największych obciążeń, lecz przy wystąpieniu konkretnych kierunków działania sił jak w przypadku nr 14. Duże naprężenia występowały w obu wariantach geometrii struktury. Uwzględniając podobne przypadki (nr 3 oraz 19) należy zauważyć, że siła pionowa w górę pozostaje dla struktury wyzwaniem generującym przeciwne naprężenia. Stanowią one względnie bezpieczny przypadek jako układy sił wywołujące głównie rozciąganie na wszystkich prętach, lecz nadal stanowią potencjalnie najczęstszy powód przekroczenia dopuszczalnych naprężeń. Jednym z ważnych wniosków pozostaje brak związku między wartościami wektorów sił całkowitych poszczególnych przypadków obciążeń, a maksymalnymi naprężeniami. Wskaźnik korelacji Pearsona dla tych parametrów wyniósł 0,38. Tłumaczone jest to uzyskaniem geometrii, w której siły przykładane w jednym kierunku znacząco znoszą siły w pozostałych poprzez odpowiednie odkształcenie struktury.

Bardziej jednak miarowym wskaźnikiem pozostaje bezwzględna wartość naprężenia liczona w procencie wykorzystania przekroju prętów. Waha się ona od 0,203 do 0,326. Wartości te porównano z uniwersalną geometrią statyczną dobieraną dla wszystkich przypadków obciążeniowych jednocześnie. Uzyskana geometria różniła się głównie parametrami siły napięcia powłoki ***„strength”*** oraz współczynnikiem zmian długości linii krawędziowych. Uzyskiwane wartości wykorzystania przekrojów zawierały się w przedziale 0,249 do 0,416 uwypuklając zalety stosowania responsywności. Średnio wzrost efektywności struktury ruchomej wynosił 17%. Największe wzrosty efektywności odnotowano dla przypadków obciążenia powierzchniowego równomiernie nacierającego w dwóch osiach jednocześnie. Wzrost ten wynosił dla opisanych przypadków średnio 9% z 17% do 26%. Zauważa się również tendencję wprost proporcjonalnego wzrostu efektywności dla coraz wyższych wartości wektora siły powierzchniowej.

Tabela 2.Wybrane wyniki badania doboru uniwersalnych parametrów symulacji dla ruchów struktury responsywnej naśladujące zmiany geometrii membrany. Pełne wyniki badań stanowią załącznik nr 1.A

Przypadek obciążeniowy	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
X [kN]	-3,34	-3,91	-2,75	-4,89	-4,71	-4,92	-2,65	-4,11	-4,17	-4,01	-3,99	-4,61	-4,07
Y [kN]	2,71	-1,93	2,65	0,10	2,03	-1,70	3,13	4,27	3,50	1,87	2,44	1,86	0,00
Z [kN]	-0,96	4,85	3,02	-0,54	-1,18	-2,21	2,31	-1,61	2,31	3,96	1,54	1,92	4,25
maksymalne naprężenia powłoki [% max]	0,31	0,26	0,18	0,29	0,27	0,39	0,21	0,35	0,24	0,20	0,22	0,19	0,22
maksymalne naprężenia na powłoce [% max]	0,04	0,05	0,03	0,06	0,05	0,05	0,03	0,04	0,04	0,04	0,04	0,05	0,05
length factor - edge length	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
strength - edge length	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
współczynnik X	56	56	56	56	56	56	56	56	56	56	56	56	56
współczynnik Y	115	115	115	115	115	115	115	115	115	115	115	115	115
współczynnik Z	238	238	238	238	238	238	238	238	238	238	238	238	238
strength - vertex load	0,012	0,012	0,012	0,012	0,012	0,012	0,012	0,012	0,012	0,012	0,012	0,012	0,012

4.2.5 Badanie wpływu liczby iteracji obliczeń dynamicznej relaksacji na efektywność wynikową struktury

4.2.5.1 Przebieg badania

Forma obliczania zachowań struktury jak zostało to uprzednio określone może być tak dowolnie iteracyjna jak i sztywno określona w czasie. Oprogramowanie Grasshopper pozwala na ustalenie maksymalnej ilości iteracji. Badanie ma na celu określenie granicy efektywnej ilości iteracji przed zakończeniem obliczeń geometrii. W przypadku wykrycia ekstremum liczby zapętleń potrzebnych do uzyskania satysfakcjonującego wyniku możliwe jest zastosowanie metody obliczeniowej jako preakcji. W celu określenia wartości parametru zdefiniowano ponownie 20 przypadków obciążeniowych dla których wykonano kolejne badania. Wynikiem było maksymalne i średnie naprężenie prętów w strukturze. Badania przeprowadzono dla kolejnych znaczących liczb iteracji. Wszelkie pośrednie wartości dawały wyniki identyczne z sąsiednimi. Ustalono 7 kolejnych progów ilości iteracji. Po kolei z użyciem ***„zombie solver”*** uzyskiwano gotowe geometrie na podstawie parametrów wejściowych opracowanych uprzednio w badaniu.

4.2.5.2 Wyniki

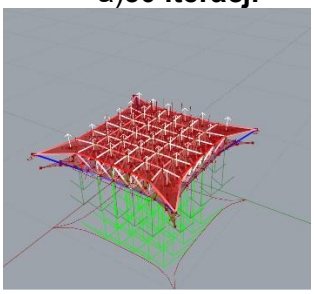
Dla wszystkich badań uzyskiwano bardzo podobny rozkład wzrostów oraz spadków wartości. Zauważa się wyraźne tendencje każdego badania do określenia najmniej efektywnej ilości iteracji. Na podstawie danych najbardziej niekorzystna wartość iteracji znajduje się w przedziale 40-100 zapętleń. Średnia wartość wzrostu naprężeń wynosi dla tego przedziału od 33% do 57%. Wiąże się to z wystąpieniem charakterystycznych zakrzywień geometrii w centralnej części powłoki. Stawiając znaczący opór dla powietrza opływającego powłokę przewyższenie to wywołuje zauważalne zginanie w miejscu najbardziej oddalonym od wszystkich podpór. W wyniku takiej nieekonomicznej formy wykluczeniu ulegają wszystkie przebadane w tym zakresie geometrie. Najefektywniejszy pozostaje przedział od 200 do 400 iteracji. Uwzględniając zapotrzebowanie na moc obliczeniową dla takiej ilości przypadków nawet 5% wzrost efektywności zauważalny między opisanym przedziałem, a przedziałem 1-10 iteracji predestynuje zakres 200-400 pętli jako najbardziej efektywny. Sama inicjacja obliczeń wymaga nakładu porównywalnego z 2000 zapętleń. Oznacza to, że podany przedział wydłuża czas obliczeniowy w nieznaczącym stopniu, a pozwala podnieść próg efektywności z 85% do 95% co odpowiada poprawie wartości naprężeń maksymalnych w 19 na 20 przypadków.

Zauważa się dodatkowo tendencję do wypłaszczania struktury dla przypadków silnie obciążonych poziomo. Oddziaływania wszystkich obciążeń przeliczane są z uwzględnieniem

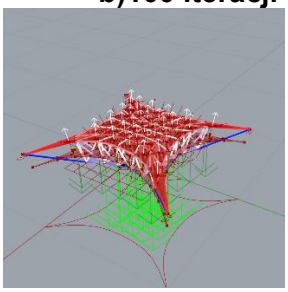
kąta natarcia, dlatego też całkowite lub znaczące wypłaszczenie struktury stanowi naturalnie wygenerowane zachowanie struktury. Dla teoretycznego przypadku zwiększa to znacząco efektywność nawet do 78%, lecz w rzeczywistej strukturze mógłby generować problemy użytkowania dlatego też należałoby skonfrontować wyniki uzyskane tym zjawiskiem z maksymalnymi określonymi granicami zmienności geometrii.

Tabela 3.Kolejne progi zmian geometrii dla rosnącej liczby iteracji obliczeń dynamicznej relaksacji.

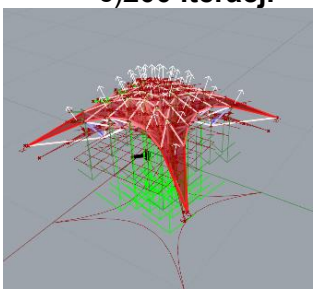
a)**50 iteracji**



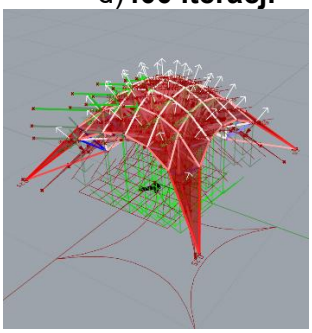
b)100 iteracji



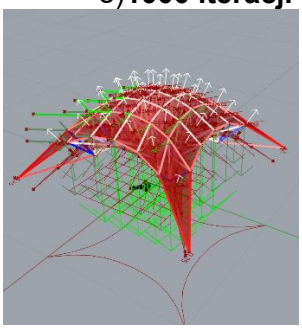
c)**200 iteracji**



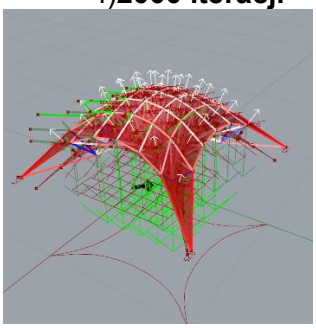
d)**400 iteracji**



e)**1000 iteracji**



f)**2000 iteracji**

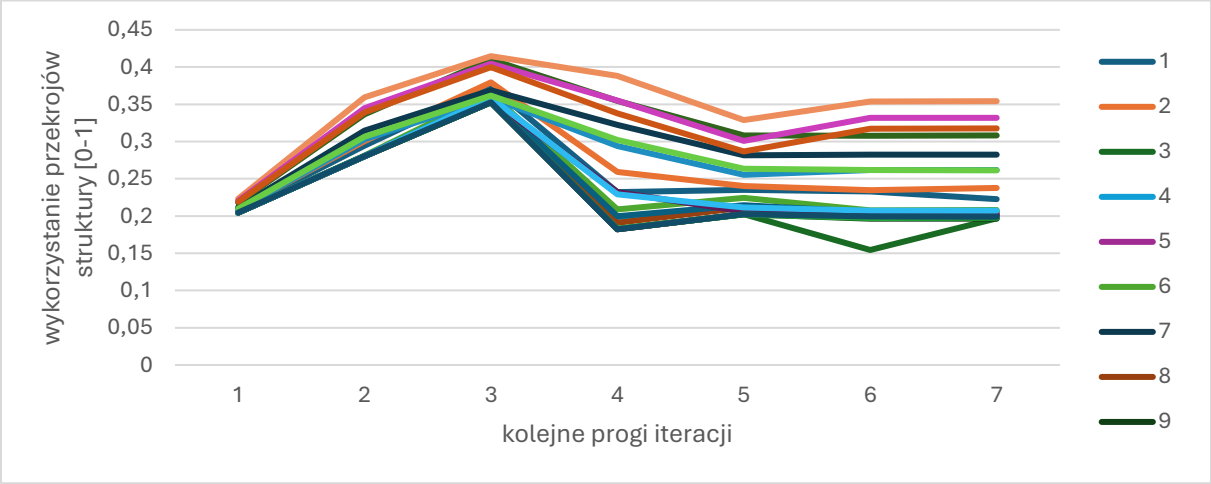


Wraz ze zwiększeniem liczby iteracji przeprowadzanych w pojedynczym badaniu następuje zjawisko stopniowej relaksacji struktury. Przed tą fazą geometria modelu ulegała wykrzywieniu, wyobleniu a najwyższy wierzchołek przemieszczał się w górę. Przy przejściu w fazę relaksacji struktura ulegała spłaszczeniu, a wszystkie wierzchołki wraz z najwyższym ulegały obniżeniu. W każdym przypadku relaksacji dochodziło do podniesienia naprężeń. Jego wpływ na ostateczną efektywność był nieznaczny, lecz punkt relaksacji pozostaje miarowym wskaźnikiem granicy poszukiwania geometrii. Badanie wykazuje jednoznacznie istnienie przedziału efektywnego dokładności badań geometrii i zawiera się on w przedziale 200-400 iteracji.

Po przeprowadzeniu doświadczenia dla każdego przypadku obciążenia ponownie określono indywidualne parametry najefektywniejszych parametrów wejściowych symulacji. Dla struktur na które oddziaływało znaczne obciążenie zauważono istotny wzrost efektywności od 15% do 72% zmniejszenia naprężeń maksymalnych. Dla krótszych sumarycznych wektorów sił zmiany naprężeń zawierały się w przedziale 8% do 26%. Z kolei w bardzo podobnym stopniu obniżeniu uległy średnie wartości naprężeń. Dla wszystkich sił redukcja wynosiła od 12% do 31%.

Na podstawie otrzymanych wyników wnioskować można, że dynamiczne relaksacje powinny stanowić jedynie moduł główny zachowań struktury. Istnieją potencjalne niebezpieczne przypadki obciążenia dla których efektywność dynamicznych relaksacji spada do niezadowalających wartości, lecz w opisywanej formie modułu głównego spełniają kryteria modelu zachowań.

Tabela 4.Zależność efektywności struktury opartej na geometrii uzyskanej przez membranę od liczby iteracji symulacji dynamicznych relaksacji. Pełne zestawienie wyników badań znajduje się w załączniku nr 2 – „Rozdział 3 - badania wpływu liczby iteracji na efektywność wyników”



4.2.5.3 Problematyka wpływu geometrii wejściowej na wynik badania w metodzie symulacyjnej

Jednym z głównych problemów obiektywnego badania efektywności co jednocześnie wpływa na nieprzewidywalność wyników jest zjawisko geometrii wejściowej. Zgodnie z opisem zasady obliczania dynamicznych relaksacji iteracje geometryczne powielane są do momentu uzyskania ujednolicenia sił o satysfakcjonującym gradiencie. Algorytm zaczyna dostosowywać wejściową geometrię do wymagań i każdorazowo uzyskuje wyniki w innym czasie, różniące się od siebie o skalę dokładności określaną arbitralnie. To oznacza, że każdorazowo takie same zachowania generować będą różne wyniki, gdy będą generowane na podstawie innej formy początkowej. Oznacza to dalej konieczność wyraźnego wydzielenia dwóch osobnych ścieżek obliczeniowych. Pierwsza stanowi ścieżkę eksperymentalną, gdzie dla każdej zmiany układu obciążeń w strukturze następuje nowy proces iteracyjnego dostosowywania geometrii w wyniku którego uzyskiwany jest oryginalny wynik zapisywany w postaci układu współrzędnych węzłowych. Druga stanowi ciągły nieprzerywany proces iteracyjny nakładających się kolejnych geometrii jaki przedstawiono podczas zrealizowanego badania.

4.2.6 Badanie potencjału unifikacji przypadków obciążeniowych na cele realizacji matryc zachowań

Jak zostało wcześniej opisane każda struktura opracowana w wyniku użycia metody poszukiwania form, aby była efektywna musi stanowić kompromis między geometriami dostosowanymi do bardzo specyficznych przypadków obciążeniowych. Im precyzyjniej określony przypadek tym efektywniejszą geometrię da się dla niego dobrać. Oznacza to, że struktura responsywna geometrycznie powinna reagować możliwie szybko w celu minimalizacji naprężeń. Ze względu na ograniczenia obliczeniowe jednak należy szukać oszczędności w zmniejszeniu częstotliwości zmian geometrii. Oznacza to w pierwszej kolejności zamianę konkretnych przypadków obciążeń łączonych w matrycy zachowań z konkretnymi reakcjami na zakresy warunków środowiska definiujące zakres przypadku obciążeniowego przypisany w tej samej matrycy pojedynczej reakcji. Następnie badanie może zostać pogłębione o określenie wpływu szerokości zakresu pojedynczego przypadku obciążeniowego na efektywność reagowania. W wyniku tej czynności zakres warunków środowiskowych podzielony jest na dyskretne zakresy wyznaczające skończoną liczbę przypadków potrzebną do przebadania całej struktury. Gęstość siatki przypadków może być modyfikowana w celu doboru odpowiedniej proporcji między czasem potrzebnym na nasycenie matrycy reakcji struktury, a efektywnością jej pracy.

4.2.6.1 Przygotowanie i przebieg badań

Badanie ma na celu określenie tendencji spadku efektywności form w zależności od szerokości definiowania pojedynczego przypadku obciążeniowego. W wyniku badania określony zostanie zakres pojedynczego przypadku obciążenia lub kilka zakresów w zależności od warunków dodatkowych jak lokalizacja obciążeń lub stopień złożoności przypadku. Na potrzeby badania określono 20 przypadków obciążeniowych określonych wartościami w osiach X, Y, oraz Z. Każdy kolejny przypadek formułowany był jako minimalnie bardziej różnych pod względem zwrotu i wartości od pierwszego przypadku referencyjnego tak, aby z każdym kolejnym pomiarem pula przypadków rozszerzała zakres dla pojedynczej geometrii reakcji. Wszystkie przykładane obciążenia były powierzchniowe. Dla pierwszego zestawu wartości określono mniejszy zakres od -5kN do -4,5kN. Zakres miał pozwolić na przebadanie sytuacji niebezpiecznej poziomej siły zewnętrznej oddziałującej na dolne oraz górne pasmo elementów strukturalnych modelu. Dobrany zakres wymusza badania wyłącznie wartości znaczących obciążenia, dlatego też struktura poddawana badaniu pozostaje podatniejsza na zmiany przypadków obciążeniowych. W pierwszej kolejności dla każdego przypadku z osobna indywidualnie algorytmem ewolucyjnym według tych samych ustawień początkowych poszukiwano indywidualnych najmniejszych naprężeń wynikowych. Następnie dla wszystkich przypadków jednocześnie obliczono sumaryczne naprężenia. Minimalizacja tej wartości podlegała algorytmowi ewolucyjnemu. Opierając badanie o wartości algorytmu dobrane w poprzednich pomiarach badano najmniejsze osiągane przez model wartości. Sumaryczne naprężenia liczone były dla kilku zestawów obciążeń. Najpierw obliczeniu podlegała pełna pula 20 przypadków, następnie 10 oraz 5. Dla każdego badania wykonano 1200 prób doboru wartości algorytmem ewolucyjnym co kolejno wyznacza 24 000, 12 000 oraz 6 000 przebadanych przypadków obciążenia. Wyniki zebrano w Tabela 5.

4.2.6.2 Wyniki

Wyniki wyraźnie wskazują na zależność między uniwersalnością geometrii, a spadkiem jej efektywności elementarnej. Dla wszystkich przypadków badanych w każdym z dobranych układów uzyskano najlepszą efektywność przy indywidualizacji doboru geometrii. Oznacza to, że optymalna wartość zakresów pojedynczych przypadków określona jest mocą obliczeniową algorytmu. To oznacza dalej, że dla każdej struktury zakresy przypadków obciążeniowych należy definiować indywidualnie. Należy jednak określić skalę utraty precyzji geometrii wraz ze wzrostem jej uniwersalności. Różnica między indywidualnymi pomiarami, a połączonymi podwójnymi przypadkami stanowi 8%. Oznacza to, że dwukrotne zmniejszenie wymagań w obrębie 10% rozkładu wartości sił obciążenia pozostaje na wysokim poziomie efektywności. Kolejny badany próg dla 5 przypadków jednocześnie podwaja niedopasowanie do geometrii liczone jako różnica naprężeń referencyjnych przypadków i rozpatrywanego. Dla 5 przypadków uzasadnione jest określanie stopnia unifikacji naprężeń dla wszystkich kolejnych obliczanych przypadków. Indywidualne odpowiedniki w tym przedziale różnią się o maksymalnie 11,9% podczas gdy uniwersalne przypadki o 9,3%. Odmiennie sytuacja prezentuje się w badaniu „1z10” gdzie referencyjna grupa zawiera się nadal w przedziale 11,9%, a uniwersalna w zakresie 13,3%. Dla małych ilości unifikowanych przypadków algorytm łatwo dobiera bardzo równo efektywne wartości co pozwala z większym zapasem bezpieczeństwa określić zdolności systemu do podnoszenia efektywności. Jest ona znacznie ograniczona, lecz dla większej liczby przypadków może stanowić wykładnik skuteczności. Dla dużej liczby przypadków każdy pojedynczy wynik jest coraz mniej istotny w sumie, dlatego też algorytm wymaga dłuższej pracy na minimalizację najwyższej wartości. Największą rozbieżność między wartościami skrajnymi spośród badanych układów przypadającą na uniformizację 20 przypadków tłumaczy się wykładniczo większym nakładem obliczeniowym dla unifikacji wartości.

Tabela 5. Wyniki badań efektywności unifikacji przypadków obciążeniowych. Pełne zestawienie wyników znajduje się w załączniku nr 3 - "Rozdział 3 - badania wpływu liczby iteracji na efektywność wyników"

przypadek	X [kN]	Y [kN]	Z [kN]									
1	-4,52	-4,83	-4,59	0,301	0,383	127,5%	0,374	124,3%	0,353	117,5%	0,332	110,3%
2	-4,62	-4,86	-4,50	0,301	0,383	127,4%	0,374	124,4%	0,354	117,7%	0,332	110,5%
3	-4,62	-4,87	-4,72	0,307	0,390	127,2%	0,381	124,2%	0,359	117,3%		
4	-4,65	-4,69	-4,79	0,306	0,386	126,0%	0,379	124,0%	0,357	116,6%		
5	-4,64	-4,77	-4,99	0,313	0,394	126,2%	0,387	123,9%	0,364	116,3%		
6	-4,85	-4,54	-4,97	0,312	0,389	124,6%	0,386	123,6%				
7	-4,81	-4,93	-4,65	0,310	0,393	126,8%	0,385	124,3%				
8	-4,77	-4,52	-4,78	0,305	0,381	125,0%	0,377	123,8%				
9	-4,89	-4,70	-4,76	0,310	0,389	125,4%	0,385	124,0%				
10	-4,52	-4,94	-4,63	0,304	0,389	128,1%	0,379	124,7%				
11	-4,67	-4,51	-4,88	0,306	0,382	124,9%						
12	-4,86	-4,81	-4,70	0,310	0,391	126,0%						
13	-4,75	-4,97	-4,81	0,313	0,398	127,1%						
14	-4,66	-4,96	-4,72	0,309	0,394	127,5%						
15	-4,51	-4,76	-4,61	0,299	0,381	127,2%						
16	-4,86	-4,92	-4,74	0,313	0,396	126,5%						
17	-4,97	-4,52	-4,73	0,308	0,385	125,2%						
18	-4,90	-4,95	-4,76	0,315	0,398	126,5%						
19	-4,53	-4,59	-4,61	0,297	0,375	126,3%						
20	-4,91	-4,87	-4,57	0,309	0,390	126,3%						
wartości średnie				0,307	0,388	126,4%	0,381	123,9%	0,357	116,3%	0,332	108,0%

4.2.6.3 Wnioski

Obecnie w algorytmach ewolucyjnych stosowanych w oprogramowaniu Grasshopper nie istnieje możliwość rozbudowy pracy modelu, lecz realizacja fizycznych struktur wymagałaby zaprogramowania poszukiwania najwyższych wartości składowych naprężeń przypadków unifikowanych po pewnym czasie od ustabilizowania wartości ogólnej wyniku i dobierania parametrów wejściowych kierunkowanych w największym stopniu wzrostowi efektywności dla najwyższej aktualnie składowej. Pozwoliłoby to na redukcję zawsze pojedynczych największych wartości naprężeń w danym przypadku obciążeniowym.

W celu określenia możliwości unifikacji wartości przeprowadzono dodatkowe badanie. Uwzględniono te same 20 przypadków obciążeniowych, lecz ich wartości orientowano na uzyskanie możliwie jednolitego rozkładu naprężeń maksymalnych. Proporcja w momencie rozpoczęcia badania wynosiła 1,0703. Po 15 minutach i 725 przebadanych wartościach parametrów wejściowych wartość uległa zmniejszeniu do 1,0591, lecz wartości naprężeń wzrosły średnio o 21%. Pokazuje to jak gwałtownym zmianom podlega rozkład naprężeń gdy struktura ma zachować bezpiecznie jednolite wartości parametrów. Uzyskaną geometrię przeanalizowano również pod kątem formy i proporcji. Struktura może być zaliczona do struktur prętowych sprężonych. Cięgna jedynie przyjmują formę prętów o wtórnie wywołanym naprężeniu rozciągającym. Przyjmuje ona średnio przewidywalną wartość proporcji grubości kratownicy do rozpiętości wynoszącą 1:6,35. Wartość ta dla analogicznych przypadków stanowi otoczenie wartości optymalnej równej 1:5,9 [145].

4.2.7 Badanie symulacyjne nakładów energetycznych na cele realizacji ruchu struktury

4.2.7.1 Wcześniejsze badania

Większość obecnie realizowanych badań architektury responsywnej orientuje modele na minimalizację energetyczną [146], lub adaptuje już istniejące modele na potrzeby minimalizacji energii [87], w celu uzyskania efektywności dla parametru energii całkowitej. Holistyczne podejście jednak przyjmuje złożony charakter ze względu na brak jednoznacznych ram obliczania nakładu energetycznego w cyklu życia struktury ruchomej [82]. Ilość energii przeznaczonej na pokrycie potrzeb obiektu responsywnego może różnić się w czasie. Z kolei odmienne metody obliczania oparte między innymi o stopień cyrkularności określany ilością użyć elementów przed utratą kluczowych parametrów nośnych lub użytkowych nie dają tak wyraźnego i prostego wskaźnika efektywności[147].

Energetyczność liczona jako sumaryczna wartość jednostek energii użytkowej oraz wbudowanej dla struktur responsywnych wymaga znacznie precyzyjniejszego określenia i obliczania niż dla struktur statycznych [69]. Trajektorie ruchu w połączeniu z obciążeniami powinny być uwzględniane co najmniej jako szacunki zużycia energii, lecz wymagają stworzenia fizycznego modelu ruchu [64]. Szacowano, że w celu zmniejszania kosztów należy maksymalizować wielkość struktur. Ich wysokość dla wieżowców, lub rozpiętość dla zadaszeń wielkoskalowych wpływa pozytywnie na wszelkie wyliczenia obniżając koszty [70], [87]. Problemem pozostaje jednak wykonalność elementów. Dla dużych struktur skala sił rośne w sześcianie w proporcji do wysokości, do przedziałów predestynujących żelbetowe wytrzymałe elementy konstrukcyjne. W tej skali nie operują żadne konwencjonalne elementy ruchome. Określenie kosztu siłownika podnoszącego znaczne obciążenia jako cena na każdy kN nośności [69]stanowi rozmywające stan sytuacji uogólnienie. Niestety brak realizacji struktur responsywnych dopuszcza stosowanie takich uproszczeń. Elementem wymagającym jednak zmian jest szacowanie energii użytkowej potrzebnej na ruch struktur w czasie. W celu określenia reakcji systemu należy znać masę struktury, siłę obciążenia oraz zmianę długości każdego pojedynczego pręta. Taki zestaw danych pozostaje kompletny również w kwestii obliczania energetyki struktury. Znacznie dokładniejsze od obecnie stosowanych przybliżeń nakładów energetycznych mogą być symulacje ruchu uwzględniające precyzyjne obliczenia teleskopowania.

4.2.7.2 Sformułowanie metody ewaluacji

Dla opisywanego modelu autor opracował dokładny model analizy energetycznej energii użytkowej potrzebnej na ruch struktury. Wartości nie bazują na szacunkach i gęstości energetycznej co pozostaje w kontraście do powszechnych modeli obliczeniowych, lecz na obliczeniach przestrzennych przemieszczeń na podstawie precyzyjnych danych z symulacji. Pozwala to na dokładne określenie zużytej energii na podstawie prostej charakterystyki pracy konkretnego rodzaju siłownika w zależności od chwilowego obciążenia. Tworzy to formułę ogólną prostego wzoru obliczania energetycznego nakładu dla obsługi struktury

$$\mathrm{E} = \sum_{\mathrm{n}=0}^{284} \mathrm{F} * \mathrm{x} * \mathrm{t} \qquad (4.1)$$

Gdzie:

F - siła osiowa rozciągająca lub ściskająca oddziałująca na dany pręt/siłownik

x - długość przemieszczenia, zmiana długości pręta.

t - czas wymagany na przemieszczenie

możliwe jest alternatywne formułowanie wzoru, gdzie czas zastąpić można długością przemieszczenia i szybkością teleskopowania. W obecnej postaci wzoru czas przeliczany jest automatycznie z symulacji modelu która posiada zaimplementowaną szybkość wysuwu

siłowników. Należy zauważyć, że siła oddziałująca na pręt zmienia się nieliniowo w czasie transformacji między kolejnymi geometriami. Należy ją skwantyfikować i ruch podzielić na możliwie krótkie odcinki czasu. Dla każdego odcinka siła powinna być możliwie precyzyjnie obliczana. Całkowanie energii z nieliniowej pracy siłowników powinno uwzględniać niedokładności kwantyfikacji. Jest to możliwe do zaimplementowania z użyciem odpowiednich współczynników, lecz nie stanowią one zakresu opracowania.

Wzór należy dalej rozszerzyć o współczynnik efektywności pracy. Otwiera to zagadnienie skuteczności wykorzystania energii, a w szerszym kontekście analizy energetycznej. Należy określić jak pierwotna forma energii będzie sumowana. W pracy badana jest jedynie energia użytkowa. Autor nie uwzględnia w obliczeniach gęstości energetycznej materiałów, gdyż nie stanowią one elementów symulowanych w strukturze. Wraz z realizacją modeli fizycznych możliwe byłoby dalsze obliczenie energii wbudowanej w formie automatycznej analizy modelu BIM jak w opracowaniu [148].

Obliczenia prowadzone są dla arbitralnie określonej jednostki czasu jaką jest milisekunda dlatego też w celu uzyskania w funkcji wyniku podanego w watogodzinach (Wh) cały ruch dzieli się przez odpowiedni współczynnik 3,6 *10^6. Struktura nie jest wyposażona w żaden system rekuperacji energii przy skracaniu siłowników. Oznacza to, że wszelkie porcje energii przeliczane wzorem są dodatnie i powiększają sumaryczne zużycie energii. Ostateczna forma wzoru przyjmuje postać:

$$E\ [kWh] = V * eff * \frac{0{,}000825 * sig * A * 0{,}0001 + 0{,}45}{s * 3{,}6 * 10^6} \tag{4.2}$$

Gdzie:

V- woltaż siłowników określony na standardową wartość 24V

eff- skuteczność wykorzystania energii do napędu siłowników. Podana w nocie katalogowej producenta. Parametr przyjmuje wartość 90%

sig – wartość bezwzględna sił podłużnych powstających w wyniku zewnętrznego obciążania powłoki. Tak dla wydłużania jak skracania przyjmuje wartość dodatnią

A-pole powierzchni przekroju siłownika/pręta

s-szybkość teleskopowania siłowników według noty katalogowej

We wzorze dodatkowo pojawiają się współczynniki odpowiadające kolejno za wprowadzenie zależności między siłą osiową a energią wymaganą do zmiany długości pręta, oraz za zmianę jednostek na przystępniejsze w analizie kilowatogodziny. Podczas badania każdy ruch dzielony jest na odcinki o maksymalnej różnicy długości pręta $\Delta = 0{,}5mm$. Wartość energii zużytej na ruch liczony jest jako zmiana liniowa całkowitej energii przy stałej wartości siły osiowej wyznaczonej na początku odcinka pomiarowego. Po wyznaczeniu wszystkich cząstkowych składowych zapotrzebowania na energię następuje zsumowanie zapotrzebowania, które następnie zapisywane jest w bazie danych ruchu struktury na potrzeby dalszych analiz.

4.2.7.3 Budowa stanowiska badawczego

Badania mają na celu oszacowanie wydatków energetycznych struktury podczas jej standardowego użytkowania. Badane będą przypadki obciążenia siłami poziomymi przykładanymi w dwóch osiach poziomych. W badaniu użyte będą dwa systemy. Pierwszym będzie system czujników siły wiatru opracowany jako autorska aparatura, wyposażona we własny mikrokontroler zbierający i przetwarzający dane. Drugi system stanowi komputer osobisty podłączony do mikrokontrolera. Dane z czujników wiatru bezpośrednio przesyłane są do programu Grasshopper, gdzie obsługiwany model responsywny dynamicznych relaksacji odpowiada za ruch całej struktury w zależności od kierunku i siły wiatru. Dla każdej osi wykonano osobny system pomiarowy odpowiadający za zbieranie danych o chwilowych

obciążeniach. Systemy te oparte są o belki tensometryczne podłużne zginane o oporności 400 Ohm. Podłączone do wzmacniaczy HX711. Każda belka zamocowana jest do płyty sztywnego materiału, który pod wpływem ciśnienia wiatru wywołuje zginanie proporcjonalne do jego szybkości. Zginanie dalej odczytywane jest współczynnikami siły wiatru przez mikrokontroler i przesyłane do programu obsługi symulacji struktury membranowej w Rhinoceross Grasshopper. Każdy pośredni ruch przeliczany jest ze względu na zmianę długości prętów. Sumaryczna wartość przemieszczenia pręta jest kolejnym parametrem o szacowanej wartości niemożliwej do policzenia bez znajomości niedokładności ruchu. Dla dalszego uproszczenia obliczeń każdy ruch między kolejnymi geometriami jest kwantyfikowany do kilku kolejnych pozycji. Taka dokładność pozostaje zupełnie wystarczająca dla realizowanych obliczeń. Model badawczy przedstawiono na Grafika 10.

Problemem pozostaje jednak kwantyfikacja zbierania danych. Obciążenie wiatrem jako bardzo dynamiczne wymaga określenia minimalnych wartości próbkowania pomiarów nacisku w celu interpolacji ciągłych w czasie obciążeń. Według opracowania[149] dla opisywanego przypadku częstotliwość powinna wynosić min 3Hz co pozostaje wartością trudną do bezpośredniego uzyskania. Zaprogramowano częstotliwość próbkowania jako 60Hz, lecz każde 20 próbek jest uśrednianych, a szybkość zmian stanowi współczynnik mnożenia kolejnej średniej z sekcji 20 pomiarów. Ostatecznie dla środkowej z 3 wartości przeliczana jest energia zużyta w 2 tercji pojedynczego ruchu, natomiast dwie wartości skrajne są mnożone zależnie od różnicy między nimi a wartością środkową w celu określenia krzywej trzypunktowej prostej do całkowania w celu obliczenia precyzyjnych wartości energii. W celu uśrednienia wartości siły wiatru zaproponowano następujący układ wzorów:

$$\mu_1, \mu_2, \mu_3 \begin{cases} \mu_1 = \frac{1}{20}\sum_{i=1}^{20} V_i \\ \mu_2 = \frac{1}{20}\sum_{i=21}^{40} V_i \\ \mu_3 = \frac{1}{20}\sum_{i=41}^{60} V_i \end{cases} \tag{4.3}$$

Wzór opisujący sumowanie cząstkowych składowych wiatru

$$k_1 = 1 + \alpha \cdot |\mu_1 - \mu_2| \tag{4.4}$$

$$k_3 = 1 + \alpha \cdot |\mu_3 - \mu_2| \tag{4.5}$$

Współczynniki mnożenia dla pierwszej i ostatniej składowej

$$F = \frac{1}{3}(k_1 \cdot \mu_1 + \mu_2 + k_3 \cdot \mu_3) \tag{4.6}$$

Gdzie:

μ_x- wartość prędkości wiatru w danej tercji jego pomiaru [m/s]

V_i- wartość prędkości wiatru zmierzona czujnikami z częstotliwością 60Hz [m/s]

k_1- współczynnik zmienności wiatru w danej tercji

F- wartość końcowa prędkości wiatru uwzględniana w symulacji z częstotliwością 1Hz [m/s]

Sumowanie siły wiatru daje w wyniku wartość w danej sekundzie. Taki stopień dyskretyzacji wiatru pozwala na wydłużony czas reakcji systemowi. Standardowy czas pracy algorytmu ewolucyjnego to min 4-6 sekund, lecz preakcje uruchamiane są w czasie $< 1s$.

W celu przeprowadzenia badań efektywności energetycznej nie zmieniano nic w budowie i działaniu modelu. Oparta na zasadzie ruchu membrany z parametrami dobranymi na podstawie wyników opisanych badań skuteczności. Badania w całości przeprowadzono w środowisku Grasshopper. W celu skalibrowania aparatury pomiarowej przeprowadzono testy początkowe. Dwa prostopadłe czujniki rozstawiono w odległości 1,5m od siebie. Zachowana

odległość zapobiega wzajemnym wpływom czujników na pomiary. W celu kalibracji użyto anemometru ustawionego kolejno w dwóch pozycjach równoległych do aparatury. W każdej pozycji przez 2 minuty anemometr oraz autorski czujnik badały siły wiatru. Na podstawie wyników zauważa się korelację proporcji sił w czasie całego badania. Oznacza to, że wyznaczona doświadczalnie wartość współczynnika obciążenia pozwalająca nacisk wyrażać w newtonach wystarczy do uzyskiwania danych o sile wiatru na wystarczającym poziomie błędu pomiarowego 2%. Skalibrowanie obu czujników pomiarowych pozwoliło na symultaniczną agregację danych w czasie symulacji zachowań modelu. Podczas pomiarów zbierano dane na temat wartości zarejestrowanych przez czujniki, wartości siły wiatru wyliczonej na podstawie czujników oraz energii zużytej w jednostce czasu między dwoma kolejnymi pomiarami. Wyznaczono, że pomiary siły wiatru wykonywane będą co 5 sekund. Jednocześnie mierzona będzie siła w obu prostopadłych kierunkach. Po zebraniu danych i przetworzeniu na wartości odczytywane przez Grasshopper następuje wysłanie danych do komputera, gdzie stają się danymi wejściowymi analizy zachowania modelu membranowego na zasadach analogicznych do dotychczasowych badań zmian geometrii. Ze względu na ustalenie częstotliwości próbkowania równej 0,2Hz ustalono górny limit iteracji obliczeniowych modelu powłoki jako równych 400.

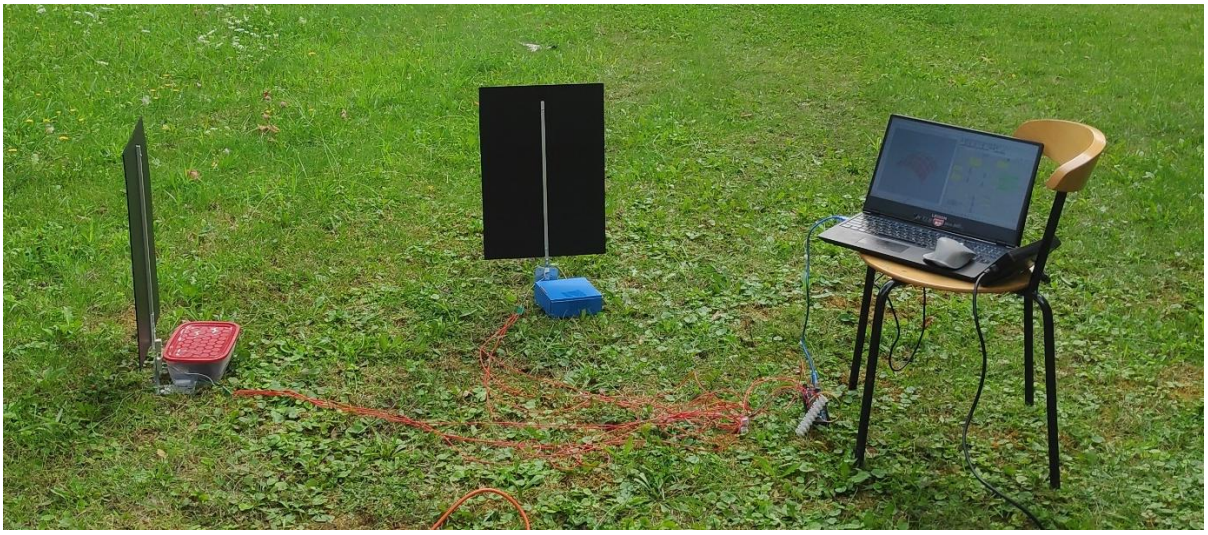
4.2.7.1 Wyniki

Tabela 6. Bilans obliczeń symulacji zapotrzebowania energetycznego na ruch modelu. Pełne zestawienie wyników stanowi załącznik nr 4.A.

Wartość odczytu wzmacniacza dla belek tensometrycznych	Zsumowana wartość ruchu struktury pod wpływem zmiany obciążeń [GWh]	Wartość ciśnienie wiatru w osi X [N]	Wartość ciśnienia wiatru w osi Y [N]	Godzina pomiaru
30688;-6116	8.731e-11	0.15342	1.95904	10:05:03
31622;-5653	1.6759e-10	0.15984	1.96228	10:05:08
31996;-3783	6.7512e-11	0.16342	1.95754	10:05:13
32338;-2296	1.9423e-10	0.1615	1.95126	10:05:18
34096;-674	1.9775e-10	0.16026	1.94928	10:05:23
28788;-1609	2.1382e-11	0.146	1.95798	10:05:28
29274;-6059	1.8532e-10	0.15984	1.96172	10:05:33
31099;-7494	1.1342e-10	0.12896	1.96138	10:05:38
31287;-6941	1.3765e-10	0.0665	3.61338	10:05:43
31688;-6678	1.677e-10	0.06932	3.61436	10:05:48
31944;-6653	1.7937e-11	-0.30564	3.61354	10:05:53
31757;-4799	2.1183e-10	-0.32744	3.61354	10:05:58
31739;-4907	2.1183e-10	-0.32672	0.01354	10:06:03
33082;-3999	4.5939e-11	0.00534	0.01616	10:06:08
32205;-4751	4.3706e-11	0.03394	0.01564	10:06:13
32160;-299	2.9102e-11	0.24592	0.01444	10:06:18
33020;3312	1.9848e-10	0.20786	0.01276	10:06:23
33046;3170	2.0296e-11	0.26024	0.01252	10:06:28
32016;515	1.5281e-10	0.14522	0.01588	10:06:33

Przez kolejne 20 minut badano zachowanie modelu oraz zużycie energii na potrzeby zarządzania strukturą. Reprezentacyjne wartości rejestru zebrano w Tabela 6. W kolejnych kolumnach zebrano cząstkowe wartości odnoszące się do ruchu struktury.

Przez okres badania zebrano 1300 pomiarów. Przez cały okres badania wiatr wywoływał nieregularne obciążenia powierzchniowe w granicach wartości od -0,01 N do 3,61 N w osi Y oraz od -1,38 N do 0,87 N w osi X. Średnia wartość wiatru wynosiła w obu kierunkach kolejno 0,078 N dla osi Y oraz -0,07 N dla osi X co pozwala na wnioskowanie równomiernego obciążenia wiatrem i wymierny rozkład porywów wiatru w czasie badania. Oznacza to, że wyniki badania stanowić będą wartości reprezentatywne dla większego zakresu pomiarów. Maksymalne obciążenia liczone jako górne 5% wartości siły nacisku trwały w obu kierunkach 0,7% czasu badania. Sumaryczne składowe siły wiatru w obu kierunkach w postaci wektorów kierunkowych wiatru w dwuwymiarowej płaszczyźnie odpowiadają wartościami proporcjom zużytej energii. Oznacza to, że w uśrednieniu dla badania trwającego 20 minut możliwe było mniej precyzyjne pomiarowanie ruchów i sił na strukturze. W trakcie badania wartości siły wiatru mierzone były dodatkowo anemometrem dla porównania dokładności odczytu danych przez autorski system. Różnice cząstkowe sięgały maksymalnie wartości 11,9% wartości siły wiatru, lecz średnio było to jedynie 2,48%. Wartość ta maleje wraz z określaniem coraz dłuższych okresów porównań pomiarów co oznacza, że system dokonuje dokładniejszych pomiarów, lecz brak możliwości synchronizacji badań wywołuje różnicę w wynikach pomiarów. Dla zbadanego przypadku analiza liniowa ruchu i zmian naprężeń byłaby niedoszacowana o wartość 3,72% energii ruchu struktury. Przez cały okres 1 badania struktura o masie niecałych 8 ton i rozpiętości 10m zużyłaby $3{,}05 * 10^{-8}[GWh]$, czyli $0{,}0305[kWh]$. Zakłada się, że model funkcjonować będzie przez cały okres roku co daje zużycie energii na poziomie 801,54 kWh/rok średnio. Obliczeniu nie podlegały systemy obliczania pracy struktury, czujniki, ani mikrokontroler czujników. Zakłada się, że dla struktur pełnoskalowych zużycie energii przez systemy pomiarowe i obliczeniowe będzie mieć marginalny wpływ na całkowitą efektywność systemu zgodnie z szacunkami dla opracowania [87]. Przytoczony wynik wzrostu efektywności przy użyciu systemów responsywnych w miejsce statycznych wynosi od 12% do 31%, co oznacza, że w celu pełnego potwierdzenia efektywności responsywności obliczona wartość zużycia energii w rozliczeniu rocznym musi być niższa niż 12% całkowitej energii wbudowanej dla obliczeń powszechnie stosowanych w badaniach responsywności [69], [70].



Grafika 10. Model badania wydatku energetycznego symulowanej struktury. Dwie prostopadłe płyty połączone z tensometrami zbierają informacje o prędkości wiatru, które są interpretowane przez mikrokontroler, a następnie w zrozumiałym dla jednostki centralnej formacie przesyłanie do programu Rhinoceros Grasshopper, gdzie stanowią dane wejściowe zmiany geometrii modelu.

4.3 Podsumowanie

Badania potwierdzają skuteczność stosowania dynamicznych relaksacji w sterowaniu ruchem struktury responsywnej dyskretnej. W wyniku badań potwierdzono jej zdolność do redukcji naprężeń maksymalnych przy jednoczesnej uniformizacji części przypadków obciążeniowych. Wyznaczono efektywne wartości parametrów symulacji.

Jednocześnie przedstawiono szereg problemów wykorzystania metody jako głównego i jedynego modelu zachowań w strukturze responsywnej co uniemożliwia jej stosowanie jako jedynego modułu sterowania. Trudności uzyskania wyników w zamierzonym czasie, niepewność wyników wraz ze wzrostem uniformizacji przypadków obciążeniowych generuje optimum uniformizacji, lecz nadal próg bezpieczeństwa nie jest spełniony, co wymusza stosowanie dodatkowych modeli preakcji do sterowania strukturą oraz geometrii bezpiecznych. Każdorazowo efektywne parametry symulacji mogą podlegać zmianie co wymusza wykorzystanie algorytmu ewolucyjnego nawet w module głównym iteracyjnego modelu dynamicznych relaksacji. Określenie zakresu optymalnej liczby iteracji w badanych przypadkach korzystnie wpływa na poziom skuteczności generowania wyników, lecz nie jest warunkiem wystarczającym do samodzielnej pracy modelu. Potwierdza to pierwszą tezę stawianą w pracy dla struktur dyskretnych sterowanych dynamicznymi relaksacjami.

Druga teza potwierdzona została dla struktur sterowanych badanym modelem zachowań poprzez zdefiniowanie niepewności podczas unifikacji przypadków obciążeniowych. Wskazuje to na niewystarczającą metodę sterowania. Wspomaganie generowania geometrii powinno zaistnieć w celu redukcji maksymalnych naprężeń w unifikowanych przypadkach obciążeniowych co opisywano w wynikach badań. Zależność tę zdefiniowano dzięki zastosowaniu algorytmu ewolucyjnego w poszukiwaniu parametrów symulacji. Nie da się na podstawie przebadanej liczby przypadków określić jak dostosować model sterowania geometrią, lecz możliwe jest określenie, że model ten wymaga modyfikacji.

5. Responsywność struktur powłokowych – ewaluacja zagadnień elementarnych budowy i modeli zachowań zmian geometrii

5.1 Wstęp

5.1.1 Stopień złożoności wzajemnego wpływu geometrycznego i statycznego elementów modeli powłokowych

Możliwe jest dokonanie gradacji trudności operowania responsywnością struktury w odniesieniu do stopnia wzajemnych zależności ruchu elementów między sobą. Zgodnie z przyjętym kryterium najprostszymi w obsłudze pozostają struktury sztywne lecz nie przesztywnione dyskretne, pozwalające na bardzo dużą niezależność teleskopowania pojedynczych prętów. Każda zmiana długości jednego z elementów ma wpływ na rozkład naprężeń, lecz pozostaje fizycznie możliwa. Zależności tej nie wykazują struktury odkształceniem wpływające na układ sił wewnętrznych generując sprężenie lub rozciąganie osiowe sumujące się lub redukujące z naprężeniami pochodzącymi z sił zewnętrznych. Ze względu na liczbę pasm prętów wyszczególnia się trzy grupy struktur. Najprostsze pozostają dwupasmowe, gdzie momenty gnące rozchodzą się w sposób przewidywalny. Następuje w nich klarowny podział na rozciągane pasmo dolne i ściskane górne w strukturach o podporach rozmieszczanych na krańcach lub narożach struktury. Dwa pasma pozwalają na zachowanie sztywności praktycznie w każdej geometrii, dla dowolnie złożonego zakrzywienia w rozumieniu opisującego go aparatu matematycznego. Trudniejsze pozostaje realizacja i obsługa zmian geometrii modeli jednopasmowych, których przykład przedstawiono w 9.5 w opisie struktur ekspandujących. Występujące w nich zjawisko zmiany znaku krzywizny Gaussa powłoki, czy konieczność opracowania sekwencji wzrostu znacznie zwiększają stopień złożoności zagadnienia. Najtrudniejsze jednak pozostają modele wielopasmowe nieopisywane w pracy i nie podlegające analizie, a w ich miejsce badaniu podlegać w dalszej części będą struktury ramowe. Badania literaturowe nie skupiają się na ich opracowaniu, określeniu sposobu ruchu lub potencjalnych zastosowaniach.

5.1.2 Teoretyczne zagadnienia ruchu modeli powłokowych

Orientacja responsywności na zysk energetyczny zauważalny w najnowszych trendach badań [69] skutecznie obniża znaczenie badawcze takich modeli jako wysoce nieefektywnych. Największym stopniem złożoności budowy i zachowań charakteryzują się jednak struktury ciągłe. Sztywne powłoki, tarcze, lite struktury. Ich stopień wzajemnych oddziaływań jest tym większy im bardziej sztywnymi materiałami o większych gabarytach operuje się w strukturze. Modele te stanowią dość nową dziedzinę badań, której początków i pierwszych koncepcji można doszukiwać się w Fuji Group Pavilion na Expo w Osace w 1970r. autorstwa Mamoru Kawaguchi [150], bądź Floating Theater na tę samą wystawę wykonany przez Herzog [151]. W przypadku pierwszej konstrukcji należy wspomnieć o samoregulującym poziomie ciśnienia w strukturze sterowanym przez stopień zanurzenia końców napompowanych tub w wodzie otaczającej strukturę. Model ten pozwalał na uzyskanie kilku geometrii i proporcji wysokości do szerokości w celu dostosowania do aktualnych wymagań użytkowników i obciążeń zewnętrznych co znajduje wspólne cechy motywatorów ruchu z opisaną koncepcją struktury ekspandującej. Drugi model dzięki szeregowi cięgien i elastycznych żeber pozwalał na swobodną zmianę kubatury i geometrii zewnętrznej. Oba modele należały do typu obiektów pneumatycznych i oba sterowane były poprzez zmianę proporcji ciśnień powietrza w poszczególnych komorach. Skuteczność uzyskania kształtu zależna była od poprawności odtworzenia sekwencji zmian ciśnień w komorach, stopnia utrzymania jednolitości ciśnienia

oraz co ważne od warunków obciążeń zewnętrznych zdominowanych przez wiatr i opady atmosferyczne. Operowanie modelami było zagadnieniem nietrywialnym, lecz znacznie odmienne z czasem opracowywane modele sztywne responsywne charakteryzowały się największym stopniem złożoności. Jedynym szeroko znanym obiektem pozostaje Stuttgart Smartshell [53] będący powłoką w całości wykonaną z drewna klejonego układanego krzyżowo w kolejnych 5 warstwach. Struktura przyjmuje kształt kwadratowego w rzucie elementu o wysokich właściwościach elastycznych sprężonego z dużą siłą na wszystkich 4 narożnych podporach. Specjalna geometria, krzywizna i oryginalny układ ruchu stanowiły wyzwania inżynierskie, lecz sposób obliczania geometrii końcowych i sposobu ruchu podczas zmian formy pozostaje najbardziej złożonym zagadnieniem spośród poruszanych w pracy typów ruchu modeli.

5.1.2.1 Rozwiązania ruchu w strukturach powłokowych

Ruch w przeciwieństwie do dotychczasowych struktur odbywa się nie poprzez poruszanie elementami tworzącymi strukturę, lecz poprzez ruch podpór. Sama powłoka pozostaje nieruchoma, lecz posiada pewną elastyczność pozwalającą na wyzwalanie naprężeń wtórnych powodowanych przemieszczeniami podpór. Wyniki badań obiektu wykazały duży potencjał do zmniejszania nakładu materiałowego na realizację i zarządzanie strukturami przy zachowaniu ich pierwotnej nośności. Model jednak posiadał powłokę o jednej określonej sztywności, stałej krzywiźnie, a podpory nie posiadały alternatywnych rozwiązań dla ruchu o prostszej formie realizacji lub mniejszej podatności na zginanie. Co więcej sam model ruchu zbudowany był na arbitralnych założeniach ruchu, co uniemożliwiało stałe podnoszenie efektywności pracy modelu.

Żaden inny obiekt lub koncepcja nie otrzymały tak szerokiego opisu i zakresu zrealizowanych badań. Analizy zachowań i sterowania modelami podejmowane były przez inne jednostki badawcze, lecz wynikiem zamiast systemu sterowania i pełnego typoszeregu elementów i modeli responsywnych pozostawały studia przypadków oparte głównie o operowanie stopniem sprężenia cięgien lub zbrojeń w strukturach pełnościennych [72], [73], [152]. Problematyka ruchu modelu ciągłego sztywnego wynika z trudności ingerencji w wybrany precyzyjnie wyekstrahowany fragment struktury poddawany w konkretnym momencie największym naprężeniom lub odkształceniom zależnie od mierzonego parametru. Ruch podporami wymusza uogólnienie zmian naprężeń na strukturze. Kluczowy pozostaje parametr granicy dokładności i wpływu na sąsiednie strefy naprężeń powstające podczas użytkowania modelu[153].

5.2 Badanie modelu symulacyjnego zachowań

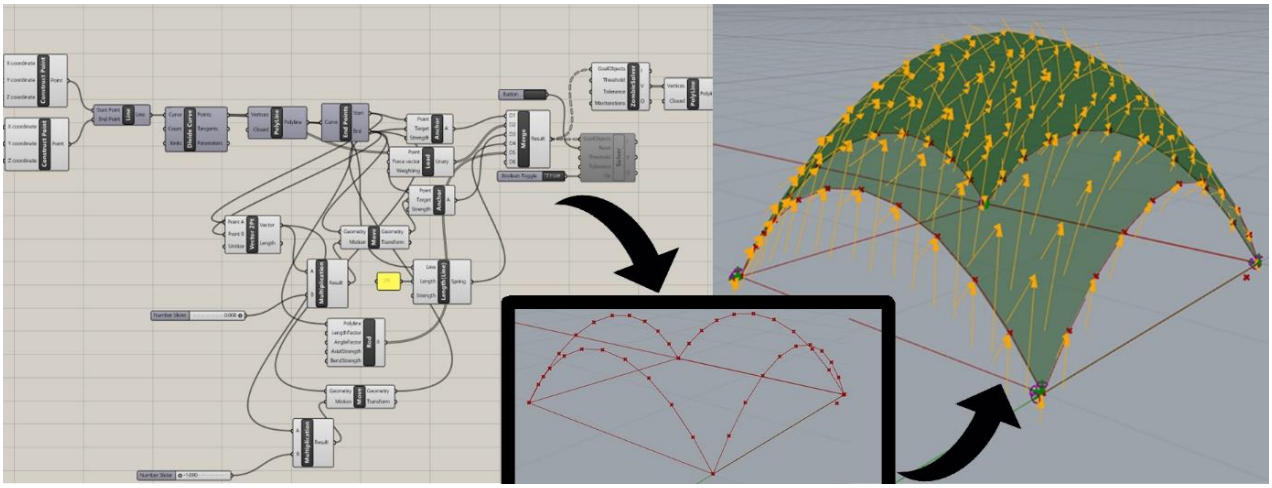
W celu przebadania możliwości operowania strukturami ciągłymi z wykorzystaniem analogicznych systemów ruchu opracowano model w oprogramowaniu Rhinoceros Grasshopper. Bazując na tożsamych z wcześniejszymi sposobach definiowania miejsc wystąpienia podpór i rozpiętej między nimi powłoce opracowano geometrię struktury.

5.2.1 Koncepcja modelu

5.2.1.1 Koncepcja modelu i zasady działania

Powłoka przyjęła kształt wycinka sfery ograniczonego przestrzenią sześcianu. W każdym z 4 naroży zamodelowano podporę o zmiennym stopniu usztywnienia. Początkowo sferyczną geometrię zmodyfikowano następnie w celu uzyskania bardziej równomiernych naprężeń zgodnie z metodami dynamicznych relaksacji. Krawędzie struktury przyjmujące kształt okręgów zastąpiono krzywymi łańcuchowymi o liczbie segmentów równej liczbie elementów z nimi stycznych. Pozwoliło to na uzyskanie korelacji między dyskretnymi prostymi odcinkami krzywych łamanych, a modelem pozwalając na uniknięcie niedokładności na tym etapie prac. Krzywe łańcuchowe uzyskano dzięki zastosowaniu funkcji modelowania zachowań sprężystych i symulowania ich zachowania w Grasshopper. W tym celu zasymulowano dwa kolejne punkty mocowania krzywej łamanej 15-elementowej na obu jej

końcach. Nadano parametry sztywności ***„Strength=10 000”***, graniczne wydłużenia poszczególnych odcinków krzywej ***„LengthRatio= 0,850”*** oraz siłę naciągu ***„Anchor, Strengt = 10”***. Dalej użyto modułu symulacji prętowej ***„Rod”*** do której podłączono krzywą łamaną w celu zapewnienia zachowania krzywej łańcuchowej. W ostatnim etapie przyłożono siłę skierowaną ku górze o dowolnie małej niezerowej wartości wywołując odkształcenie pozwalające na uzyskanie krzywej łańcuchowej. Krzywa ta nie jest dalej obciążana w trakcie badań. Na jej podstawie model generuje wierną kopię geometrii o sztywności równej sztywności materiału z którego wykonano powłokę. Wszystkie 4 krawędzie wykorzystują tę samą metodę kształtowania krawędzi generując geometrię powłoki o 4 osiach symetrii. Budowę modelu przestawiono na Grafika 11.



Grafika 11. Schemat blokowy i wynikowa geometria sterowana parametrycznie dla modelu powłoki deformowanej ruchem podpór.

Przyjęto wymiary 12m rozpiętości między sąsiednimi podporami. Na 4 przygotowanych krawędziach rozciągnięto powłokę z wykorzystaniem modułu programu ***„Edge Surface”***. Powstałą powłokę dalej przetworzono na model siatkowy z wykorzystaniem modułu ***„Simple Mesh”***, a następnie podłączono bezpośrednio do modułu obliczającego naprężenia w strukturze. Model zdefiniowano jako skorupę funkcją ***„ mesh to shell”*** i nadano jej parametry zachowań i wytrzymałości dla stali S235 o grubości 17mm. Geometrię podzielono na 6520 elementów o zbliżonych wymiarach. Bazowo przyłożono do modelu stałe obciążenie grawitacyjne ciężarem własnym o wartości 12 053kg. Ostatecznie struktura przyjmuje wysokość liczoną od podpór do szczytu centralnie położonego punktu równą 9,4m.

5.2.1.2 Koncepcja podpór

Dotychczasowe modele kształtowane były w oparciu o jedną z podstawowych podpór o określonym stopniu swobody. Nie podlegały one przemieszczeniom i w założeniu ich współpracy z modelem miały zapewniać nieskończoną sztywność. W opracowywanym modelu powłoki występuje odwrotna zależność gdzie to powłoka pozostaje sztywna, lecz w pewnym ograniczonym stopniu. Korzysta ona z parametru współczynnika plastyczności, natomiast za ruch opisywanego modelu odpowiadają 4 podpory orientowane pod kątem 32 stopni względem stalowej skorupy. Sposób ich mocowania stanowiący istotny element opracowania opisany jest w dalszej części pracy. Same podpory na etapie koncepcyjnego modelu nie posiadają formy bryłowej. Zdefiniowane są jedynie przez zasady ruchu. Przemieszczane są siłami zewnętrznymi, a pomiarowi bezpośredniemu podlega jedynie ich przemieszczenie. Pośrednio na jego podstawie mierzone są naprężenia. W celu zasymulowania pracy przy odkształceniach do modelu Grasshopper wykorzystano moduł kontrolowanych deformacji pozwalający na wywoływanie naprężeń na elementach modelu w zależności od dokładnych wartości przemieszczeń punktów referencyjnych. Ruch odbywa się w dwóch płaszczyznach X oraz Y, natomiast w płaszczyźnie Z żadna z podpór nie podlega deformacjom i zachowuje pełną sztywność.

W celu wytworzenia naprężeń o odpowiednich wartościach i bryle oddziaływania należy uwzględnić w obliczeniach układ stopni swobody wszystkich mocowań i przegubów w modelu. Aby efektywnie wytwarzać naprężenia wewnętrzne równoważące naprężenia wywoływane siłami zewnętrznymi konieczne jest określenie stałej liczby stopni przesztywnienia, których wartość nie może być mniejsza od 1. Równie ważne pozostają kierunki usztywnień oraz lokalizacji przegubów co podlega badaniom na dalszych etapach pracy. Ze względu na operowanie modelem sztywnym do obliczania naprężeń wykorzystano model obliczeniowy nieliniowy korzystający z równań regresji liniowej. Dla małych wartości odkształceń nie jest on wymagany, lecz operowanie strukturą na granicy sprężystości materiału wymaga wykorzystania użytej metody obliczeniowej. Przemieszczenia podpór wykorzystane do generowania naprężeń w bryle struktury określone są trzema parametrami opisującymi odległości przemieszczeń podpór względem punktu referencyjnego we wszystkich 3 kierunkach. Jednostką przemieszczenia pozostaje [cm].

5.2.1.3 Właściwości fizyczne i statyczne oraz model ruchu struktury

Model poddawany jest znacznym odkształceniom sprężystym. Oznacza to konieczność wyznaczenia maksymalnych ugięć na podstawie granicy sprężystości materiału. Podczas przemieszczania podpory przypisane jej naroże powłoki ulega przesunięciu tak, aby narożny punkt był zawsze styczny z podporą, lecz jej koncepcja ruchu pozwala na swobodny obrót naroża w wyniku wygięcia modelu.

Ruch struktury sterowany jest 8 parametrami pozycji 4 podpór w osiach X oraz Y. Wszystkie wartości w zakresie -0,5 do 0,5m podłączone są do algorytmu ewolucyjnego. Model może sterować pozycjami z dokładnością do 0,1cm co daje matrycę pozycji o milionie wartości dla każdej podpory. Silne zależności między sąsiednimi wartościami, mała liczba lokalnych ekstremów oraz identyczność wielu układów podpór sprawia, że znacznie zawęża się zakres poszukiwań. Istnieje możliwość usztywnienia pojedynczej podpory, lecz zmniejsza to zakres możliwych do uzyskania geometrii. W czasie badań ograniczenie zakresów wartości zostanie przeprowadzone na podstawie wyników badań najefektywniejszych geometrii.

Siły przykładane do modelu rozdzielane są na składowe poziome oraz pionowe w centrach geometrycznych trójkątnych elementów skończonych. Jest to uproszczenie modeli dyskretyzujące siły, lecz zakłada się nieistotny poziom wpływu uproszczenia na wyniki badań. Siły obciążeń poziomych sumują się z obciążeniami grawitacyjnymi generując zawsze dokładnie jeden przypadek obciążeniowy.

5.2.2 Badania efektywności ruchu struktury

5.2.2.1 Przygotowanie do badań

W celu określenia funkcjonalności modelu przeprowadzono badania możliwości redukcji naprężeń i ugięć w czasie użytkowania struktury dla statycznych przypadków obciążeniowych. Model docelowo może operować w zakresie sił zmiennych o częstotliwości zmian 0,5Hz. Na potrzeby badań przygotowano 20 sytuacji obciążeniowych złożonych z pojedynczej siły zewnętrznej powierzchniowej o wartości w zakresie od -5kN/m^2 do 5kN/m^2 dla każdej składowej siły X, Y oraz Z. Wartości dobrano tak, aby uwzględniały przypadki obciążenia poziomego, pionowego, przypadków kombinowanych, układów obciążeń ukośnych, aby zbadać zachowanie struktury w możliwie szerokim spektrum przypadków. Po dobraniu wartości każdej składowej były one sumowane wektorowo. Składowe jako dane wejściowe stanowią część informacji w tabeli badania powłoki aktywnie wyginanej. Badano dwa parametry. Pierwszym była strzałka ugięcia liczona jako największa pionowa składowa wektora przemieszczeń elementu skończonego spośród wszystkich elementów modelu. Liczona była w centymetrach. Drugą wartością było średnie naprężenie. Stanowi ono sumę wszystkich naprężeń zredukowanych Von Misses dla każdego elementu skończonego podzieloną przez liczbę elementów. Podczas badania dla każdej sytuacji obciążeniowej mierzono i zbierano dane na temat trzech kolejnych stanów struktury. Pierwszym była geometria domyślna mierzona przed przemieszczeniami podpór. Zakres zbieranych danych

ograniczał się do wartości naprężeń średnich, strzałki ugięcia i wartości sił reakcji podporowych. Drugi pomiarowany stan struktury dotyczył wyniku modyfikacji jej geometrii algorytmem ewolucyjnym ze względu na minimalizację strzałki ugięcia. W wyniku badania zbierane są dane o tych samych parametrach, lecz analiza poszerzona jest o dokładne wartości pozycji wszystkich podpór. Ze względu na ograniczenie ruchu w osi Z dane zbierane są wyłącznie w odniesieniu do osi X oraz Y. Trzeci pomiar pozwala na zebranie identycznego zakresu danych, lecz są one poszukiwane przez algorytm ewolucyjny pod kątem minimalizacji średniej wartości naprężeń.

Na podstawie zebranych danych możliwe będzie określenie najefektywniejszego scenariusza modyfikacji modelu powłoki. Określony został koszt efektywności priorytetyzacji każdego parametru indywidualnie w celu oceny wagi uśrednionej obu parametrów. Na podstawie wyniku możliwe było określenie współczynników istotności parametrów w celu minimalizacji obu parametrów jednocześnie. Ocenie podlegało również tempo zmian modelu oraz pierwotnie obrany zakres przemieszczeń podpór. Na podstawie wyników minimalizacji strzałki ugięcia oraz redukcji naprężeń określony został sposób ruchu struktury jako sztywniejszy, mniej podatny na odkształcenia lub bardziej sprężysty jako orientowany na ujednolicanie naprężeń kosztem znacznych odkształceń. W wyniku badania zostało więc ocenione zachowanie modelu i jego budowa. Wszystkie badania rozpoczynały się od jednakowej geometrii wyjściowej bez wstępnych przemieszczeń podpór. Każde badanie trwało maksymalnie 10 minut do uzyskania 600 przebadanych geometrii. Sumarycznie badania objęły 60 cykli poszukiwania form efektywnych geometrii.

5.2.2.2 Wyniki

Wyniki badań jasno wskazują na efektywność użycia ruchomych podpór w kształtowaniu struktury. W dwóch kolejnych seriach badawczych każdy z kluczowych parametrów struktury odznaczał się lepszymi wartościami dla modelu ruchomego niż dla modelu statycznego. W pierwszym badaniu efektywność orientowano na zmniejszenie strzałki ugięcia. Wyniki uzyskanych geometrii wskazywały na podniesienie efektywności w przedziale od 1% do 31%. Zauważono dużą niestałość w uzyskiwanych wynikach rozumianą jako trudność określenia dla jakich układów sił zewnętrznych należy spodziewać się mniejszej oraz większej efektywności. Oznacza to konieczność przyjęcia małej efektywności zwiększenia zakresu wytrzymałości modelu ze względu na ugięcia. Najniższe wzrosty efektywności odnotowano dla 4 przypadków obciążeniowych. Wartości do 5% określano jako równe granicy błędu pomiarowego i wykonawczego odnotowano w 2 przypadkach. Pozostałe 14 przypadków obciążeniowych pozwalało na uzyskanie lepszych lub znacznie lepszych geometrii. Dla 3 przypadków spadek wartości strzałki ugięcia wyniósł blisko 30%. Pozostałe wartości oscylowały w równym rozkładzie między wartościami 6%, a 29%. Przyjmując, że zestaw przypadków jest reprezentatywny, a struktura zostanie odciążona poprzez zmniejszenie nakładu materiałowego o 10% oznacza to niezapewnienie odpowiednich warunków i przekroczenie granic użytkowania obiektu w 30% przypadków obciążeń przekraczających zakres maksymalny o nie więcej niż 40%. Wszystkie typowe obciążenia zakłada się, że zostaną bez naruszania struktury rozłożone na podpory. Spadek wartości strzałki ugięcia koreluje jednak z bardzo dużym wzrostem średnich naprężeń w całym modelu. W większości przypadków wzrost odnotowywalny był na poziomie 12-24%.Oznacza to, że należy znaleźć proporcje wagi obu parametrów dla zwiększenia całkowitej efektywności i bezpieczeństwa pracy modelu. Zauważa się, że dla największych spadków wartości strzałek ugięcia zmalały również wartości naprężeń średnich, lecz nie jest to zasadą. Największy wzrost naprężeń równy był 6,5%. Rozkład naprężeń na powierzchni struktury prezentował się nierównomiernie. Największe wartości osiągane były w obszarze wokół mocowań podpór. Może to oznaczać konieczność opracowania większych elementów łącznikowych pozwalających na rozłożenie naprężeń na dłuższej linii styku z powłoką. 2% górnych wyników naprężeń dotyczyło wyłącznie stref wokół podpór. Wartości bliższe centrum modelu charakteryzowały się większym ujednoliceniem rozkładu. W centralnej części powłoki nigdy nie występowały maksymalne

wartości naprężeń bez względu na kierunek działania siły. Jednolita stosunkowo niska wartość naprężeń była charakterystyczna dla strefy w promieniu 2m od geometrycznego środka.

5.2.2.3 Wnioski

Model zachowań znacznie lepiej radził sobie z poszukiwaniem geometrii efektywnych pod kątem rozkładu naprężeń. Dla wszystkich 20 przypadków znaleziono efektywniejsze formy. Spadek średniej wartości naprężeń oscylował między 10%, a 15% co daje znacznie bardziej miarowe wyniki, niż analizowana uprzednio modyfikacja orientowana pod strzałkę ugięcia. Struktura jednak jest bardzo niestabilna pod względem sztywności. Dla wszystkich przebadanych przypadków strzałka ugięcia podczas orientacji na naprężenia wzrosła o 131% przyjmując maksymalnie wartość wzrostu na poziomie 750% co dyskwalifikuje geometrię z analizy. Oznacza to całkowite przekroczenie granicy sprężystości oraz granicy plastyczności. Dla wartości dwukrotnie mniejszych szacuje się wystąpienie plastycznego przegubu na powłoce i całkowitej utraty statyczności modelu prowadzącego do zawalenia. Model opracowywany jest, aby swoją elastycznością pozwalać na operowanie w zakresie odkształceń sprężystych, lecz jego przekroczenie jest niedopuszczalne. Oznacza to, że orientacja wyłącznie na redukcję naprężeń nie jest możliwa do implementacji w ostatecznym modelu. Nawet dla bardzo małych wartości spadku naprężeń strzałka wzrasta znacząco. Wynika to z natury redukcji naprężeń. W początkowej fazie modyfikacji modelu przez algorytm ewolucyjny model jest nierównomiernie naprężony. Możliwe jest wyznaczenie stref potencjalnej inicjacji zniszczenia. To oznacza jednocześnie, że pozostałe strefy struktury są znacząco odciążone. W wyniku nierównomiernego rozkładu dochodzi do wystąpienia odkształceń wyłącznie w miejscach agregacji naprężeń. Pierwszą strefą występowania naprężeń są podpory, lecz one rozkładają się głównie w osiach poziomych nie wpływając na strzałkę ugięcia. W górnych częściach modelu natomiast występują znacznie mniejsze siły, których deformujący wpływ na geometrię modelu jest niski. Przemieszczenia poziome często przekraczają wartości strzałki ugięcia. Występowanie tylko strefowych przeciążeń modelu działa pozytywnie na kąty obrotu modelu, które mimo iż są znaczne, to znajdują się blisko centrum i nie wywołują wyraźnych ugięć. Wraz z rozpoczęciem pracy algorytmu ewolucyjnego orientowanego na redukcję naprężeń zauważa się przede wszystkim ich ujednolicenie. Naroża struktury stają się znacznie odciążone i mimo, iż nadal charakteryzują się największymi naprężeniami, to proporcje ich naprężeń do reszty struktury są o rząd wielkości mniejsze. Zwiększenie i wyrównanie naprężeń na całej reszcie powierzchni powłoki wywołuje małe kąty przemieszczeń równomiernie rozmieszczone na powłoce. Wpływają one coraz mocniej na strzałkę ugięcia wraz z przybliżaniem ku punktowi centralnemu modelu. Taki równomierny rozkład naprężeń oraz ugięć może być interpretowany pozytywnie ze względu na jednorodność pracy struktury i zwiększenie jej sztywności podłużnej, lecz ze względu na wymogi bardzo wysokiej dokładności wykonawczej określa się to zjawisko jako wymagające dalszej analizy, koniecznej dla zapewnienia identyczności warunków pracy modelu do zasymulowanych w badaniu. Nadal jednak strzałki ugięć musiałyby ulec redukcji. To z kolei koreluje się z wnioskami z badań pierwszej serii o konieczności opracowania współczynników istotności strzałki ugięć oraz średniej naprężeń w celu połączenia obu parametrów w jednej formule modyfikacyjnej, aby naraz redukować oba parametry. Zauważa się średnią korelację między wartościami początkowymi naprężeń, a skalą redukcji wartości po przeprowadzeniu procesu poszukiwania geometrii, w której początkowo wyższe wartości naprężeń pozwalają uzyskać proporcjonalnie większą redukcję wartości w procesie modyfikacji. Poza badaniem nr 8, które dla znacznej wartości początkowej osiągnęło niższą efektywność.

5.3 Badania formy podpór modelu

5.3.1 Modele zachowań, a dokładność badań

Podczas koncepcyjnego kształtowania modelu powłoki nie uwzględniano form podpór. Określone jako elementy o koncepcyjnym zachowaniu bezwymiarowe oraz bez właściwości materiałowych minimalizowały trudności symulacyjne pozwalając wyekstrahować efektywność samej idei ruchu. Kolejny etap prac polega na precyzowaniu modelu bryłowego struktury w celu przygotowania pełnej palety rozwiązań modelowych elementów strukturalnych o odpowiednich parametrach wytrzymałościowych i ruchowych. Dotychczas prezentowane w literaturze modele podpór struktur ruchomych nie podlegały analizie statycznej ani dynamicznej poza badaniami [53], [153] zdecydowanie oryginalnymi na tle pozostałych proponowanych rozwiązań. Przeważnie podpory zrealizowane były jako pełne usztywnienia na przemieszczenia z pewną swobodą obrotu [67], [71]. Analiza naprężeń mogła nie uwzględniać podpór ponieważ jako elementy statyczne w bardzo prosty sposób uzyskiwały wymaganą sztywność mimo, iż jej wartość minimalna była znacznie większa niż dla statycznych struktur [75], [80], [104]. Szczególnie widoczne jest to w badaniach [104] niewykonalnych w skali rzeczywistej ze względu na wartości sił podporowych i konieczność sztywności nieosiągalnej dla modeli pełnoskalowych. Problem pozostaje tym wyraźniejszy przy uwzględnieniu typu opracowywanej struktury. Powłoki o małej krzywiźnie generują bardzo duże siły poziome. To one w głównej mierze wpływają na wymagania wytrzymałościowe podpór [154]. Dlatego też istnieje granica opłacalności między realizacją powłok płaskich, a struktur pneumatycznych, gdzie wyraźnym przykładem skrajności był pawilon amerykański na EXPO 1970 [155]. Struktura taka byłaby niewykonalna ze względu na siły ściskające generowane tak grawitacyjnie jak i w wyniku występowania obciążeń zmiennych. W Stuttgart Smartshell motorykę rozwiązano jako grupy trzech współpracujących siłowników, których nośność znacząco przewyższała obciążenia przykładane do struktury [53]. Skala sił może więc stanowić największą barierę realizacyjną obiektu. W celu opracowania sposobu ruchu modelem odpowiadającym na wszystkie opisane trudności przeprowadzono badania poszukiwania form ruchu, a dalej geometrii i sterowania podporami.

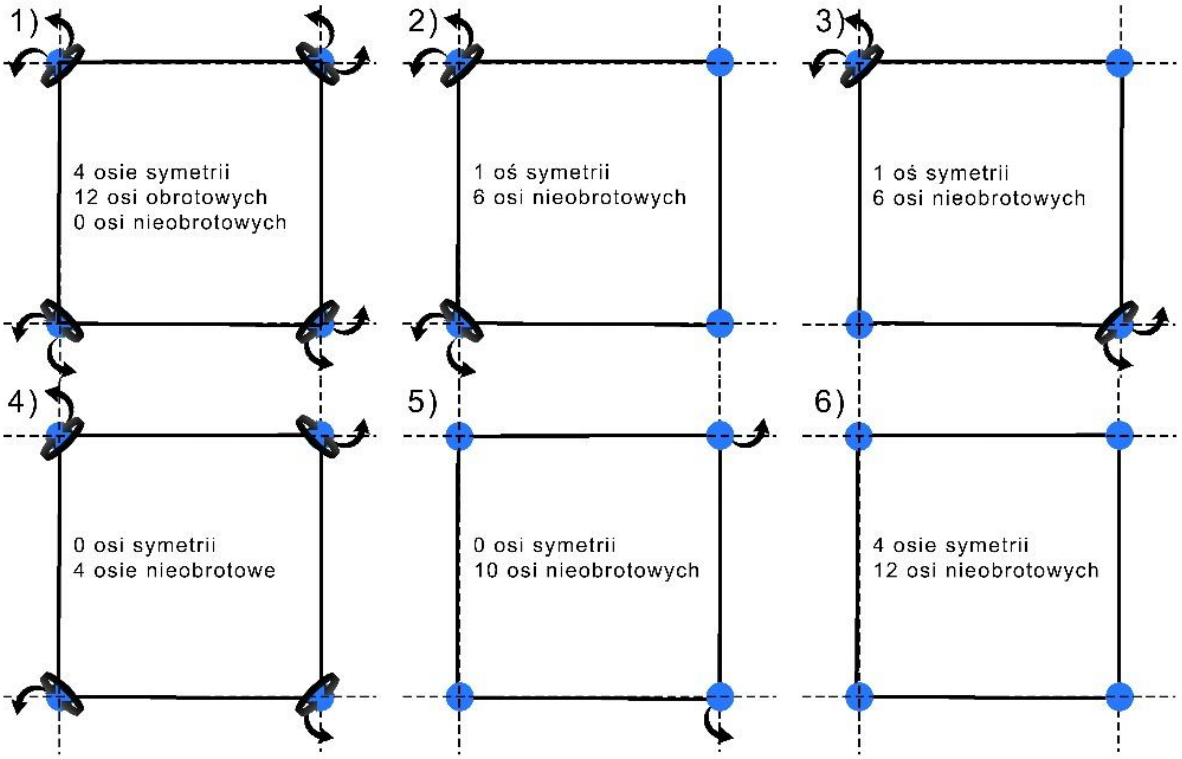
W pierwszej kolejności dla uprzednio przeprowadzonych badań przeanalizowano wyniki dotyczące naprężeń na podporach. Wartości zebrane w Tabela 7 stanowiącej załącznik do pracy, podane w Newtonach dla odpowiednich przypadków obciążeniowych pokazują, że naprężenia na podporach mają wartości proporcjonalne do maksymalnych naprężeń na strukturze. Kierunek w osi Z sił zewnętrznych ma duży wpływ na rozkład naprężeń w poszczególnych kierunkach. Ze względu na przyjętą grubość powłoki oraz materiał, symulacja uwzględniała sprężystość modelu w rozkładzie sił na poszczególne podpory. Z analizy wynika, iż od strony z której przyłożona była siła naprężenia na powłokę stanowią średnio 127% naprężeń przeciwległych podpór.

5.3.1.1 Przygotowanie prób badawczych

Badania rozpoczęto od przeanalizowania wpływu stopnia swobody obrotu podpory na efektywność redukcji naprężeń. Dla 6 kolejnych układów podpór w narożach przeprowadzono pomiary maksymalnych naprężeń na podporach oraz powierzchni modelu. Układy sztywności i przegubowości podpór dobierano tak, aby zawsze uzyskiwać dokładnie jeden wynik geometryczny. Oznacza to konieczność co najmniej usztywnienia struktury lub jej przesztywnienia. Zakłada się istotny wpływ badanych czynników na generowanie efektywnych geometrii dlatego też wnioskiem badania będzie dobór układu podpór najodpowiedniejszego do zamodelowanej struktury. Pierwszym z badanych układów jest pełna swoboda obrotu wszystkich 4 podpór w każdym kierunku. Podpory mogą się przemieszczać, lecz zakłada się, że ruch odbywa się tylko poprzez system sterowania. W wyniku dowolnie dużych naprężeń nie wystąpi odkształcenie lub przemieszczenie podpory. To definiuje strukturę jako wspartą na 4 nieprzesuwnych przegubach. W drugim układzie zamodelowano asymetryczny układ podpór, gdzie dwie sąsiednie posiadają mocowanie przegubowe, z kolei dwie przeciwległe

mocowanie sztywne. Ze względu na symetryczność 4-krotną modelu nie istnieje potrzeba analizy odwrotnego układu podpór. Kolejnym układem jest usztywnienie dwóch przekątnych podpór oraz wykonanie przegubów na pozostałych. Dalej przebadano kierunkowe przeguby gdzie obrót możliwy jest w jednym kierunku. Podpory o takiej charakterystyce dobrano w przypadku nr 4 w ułożeniu biegunowym, gdzie każda kolejna podpora obrócona jest o 90 stopni względem sąsiedniej zgodnie z ruchem wskazówek zegara. Układ 5 stanowi połączenie modeli nr 2 oraz nr 4 gdzie dwie podpory pozostają w pełni usztywnione, natomiast dwie przeciwległe mają swobodę obrotu, przy czym każda z podpór w innym kierunku. Układ nr 6 stanowi pełne usztywnienie wszystkich podpór uniemożliwiając im obrót. Pełne zestawienie układów podpór przedstawiono na Grafika 12. Szacuje się wystąpienie największych momentów zginających podczas analizy przypadku nr 6 spośród wszystkich badanych układów przestrzennych. Dla każdego układu podpór przebadano 5 przypadków obciążeniowych. Wyniki zebrano w formie tabeli stanowiącej załącznik do badań.

5.3.2 Przebieg i wyniki badań



Grafika 12.Schemat układu typów podpór w strukturze. Dla każdego układu powłoka wsparta jest w 4 punktach narożnych, lecz zawsze zróżnicowany pozostaje układ stopni swobody.

Badano kolejno wszystkie przypadki dla każdego z przedstawionych na schemacie układów podpór. Układ nr 1 jest tożsamy z wcześniej analizowanymi układami. Układ nr 2 uzyskiwał bardzo równe wartości strzałki ugięcia wszystkich kolejnych przypadków poza przypadkiem nr 4, dla którego uzyskał prawie najwyższy wynik ugięcia spośród analizowanych układów. Układ nr 3 uzyskiwał średnio wyższe wartości ugięcia oraz naprężeń średnich, lecz maksymalne wartości były zawsze mniejsze o minimum 12% od wartości przypadku nr 2. Dla układu nr 4 uzyskano najmniej satysfakcjonujące wyniki dające największą amplitudę wartości w zakresie od 13,4cm do 25,1cm. Podobnie naprężenia dla przypadku nr 4 osiągnęły nieproporcjonalnie dużą wartość. Ostatni układ podpór charakteryzował się najbardziej równymi wartościami dla których amplituda osiągnęła najmniejszą wartość z zakresu 9,78cm do 18,2cm. Dla przypadku nr 2 odnotowano najmniejszy wzrost strzałki ugięcia oraz naprężeń spośród badanych przypadków.

W trakcie badań mierzono tak dwa główne parametry struktury jak i przemieszczenia podpór oraz siły reakcji. Dla każdego przypadku zauważa się bardzo zbieżny rozkład sił, gdzie podpora nr 3 poddawana jest największym obciążeniom w większości przypadków. Dla wszystkich podpór składowa o najwyższej wartości przypisana jest osi pionowej co pozwala na wykorzystanie podpór o mniejszej wytrzymałości poziomej warunkując możliwość uniknięcia modelowania podkładów lub innych form wzmocnienia podpór zapobiegających ich obrotowi bądź niekontrolowanemu przemieszczeniu. Dla wszystkich przypadków wartości reakcji podporowych zawierały się w przedziale 3,85kN, a 24,57kN. Najbardziej równym rozkładem sił podporowych charakteryzował się układ podpór nr 2, gdzie wszystkie wartości zawierały się w zakresie 4,25kN do 19,83kN. Zauważa się dużą dynamikę zmian sił reakcji dla przypadków obciążeniowych o podobnych zwrotach i wartościach obciążenia. Oznacza to konieczność opracowania modeli podpór o dużej wytrzymałości na podatność podpór, które w wyniku znacznej dynamiki zmian sił ulegać mogą szybkiej degradacji elementów na styku łożyska obrotowego z powłoką. Dla układu nr 5 korzystnego z wcześniej omówionych charakterystyk zauważa się duże zróżnicowanie wartości reakcji. Dynamika zmian jest znacząca dlatego też uzyskanie efektywnych geometrii gwarantujących zwiększenie wytrzymałości wiąże się dla przebadanych przypadków z koniecznością zwiększenia nośności i wytrzymałości podpór. Tendencja odnotowywalna jest również w pozostałych przypadkach i układach podpór, lecz najbardziej zauważalną postać przyjmuje dla układu nr 5.

Tabela 7. Wyniki badania wpływu formy podparć struktury na skuteczność uzyskiwania wyższych efektywności statycznych powłoki. Dla poszczególnych przypadków obciążeniowych ułożonych kolumnami zebrano wynikowe naprężenia liczone jako % wykorzystania przekroju modelu podpory. Pełne zestawienie wyników badań znajduje się w załączniku „Rozdział 5 - badania struktury sterowanej dynamicznymi relaksacjami".

2	podpora 1 a		0,147	0,52	0,137	0,325	**5**	0,111	0,056	0,011	0
	podpora 1 b		0,073	0,519	0,389	0,842		0,017	0,163	0,133	0,009
	podpora 2 a		0,141	0,307	0,452	0,067		0,013	0,043	0	0,005
	podpora 2 b		0	0,117	0,816	0,786		0	0,006	0,089	0
	podpora 3 a		0,21	0,877	0	0,557		0,006	0,102	0,057	0
	podpora 3 b		0	0,155	0,471	0,579		0	0,135	0,121	0
	podpora 4 a		0,096	0,666	0,327	0,347		0,111	0,058	0	0
	podpora 4 b		0,063	0,468	0,662	1		0	0	0,121	0
3	0,038	0,132	0,023	0	0		**6**	0,105	0,1	0,005	0
	0,016	0,011	0,121	0,052	0,137			-0,019	-0,011	0,004	-0,004
	0,017	0,125	0,007	0,023	0,02			0,082	0,098	0	0,012
	0	0	0,105	0	0,045			0	0,004	0,008	0
	0,029	0,103	0,032	0	0,006			0	0,108	0,001	0
	0	0,072	0,12	0,121	0,102			0,002	0,044	0,008	0,001
	0,028	0,1	0	0	0,065			0,12	0,055	0,001	0
	0	0,017	0,096	0	0,03			0	0,035	0,007	0
4	0,062	0,136	0	0	0,059						
	0,018	-0,012	0,13	0,002	0,132						
	0,093	0,126	0	0,157	0						
	0	0	0,085	0	0,054						
	0,081	0,1	0,069	0	0,023						
	0,022	0,086	0,111	0,019	0,144						
	0,079	0,064	0	0,131	0,001						
	0	0	0,125	0	0,028						

5.3.3 Wnioski

Wyniki pomiarów uzupełnione o pozycje końcowe podpór struktury nakreślają wyraźną zasadę wymogu mniejszego zakresu ruchu podpór dla coraz bardziej usztywnionych układów. Model ze swobodnym obrotem na wszystkich osiach każdej podpory wymuszał przemieszczanie podpór w największym zakresie wykorzystując całą dostępną przestrzeń ruchu od -0,5m do 0,5m. Każdy następny układ podpór pozwalał na ograniczenie zakresu ruchu podpór. Kolejno zakresy zawężały się - dla układu nr 4 zakres wyniósł 167mm, dla układu nr 3 157mm, układu nr 2 137mm oraz dla w pełni usztywnionego układu nr 5 zakres

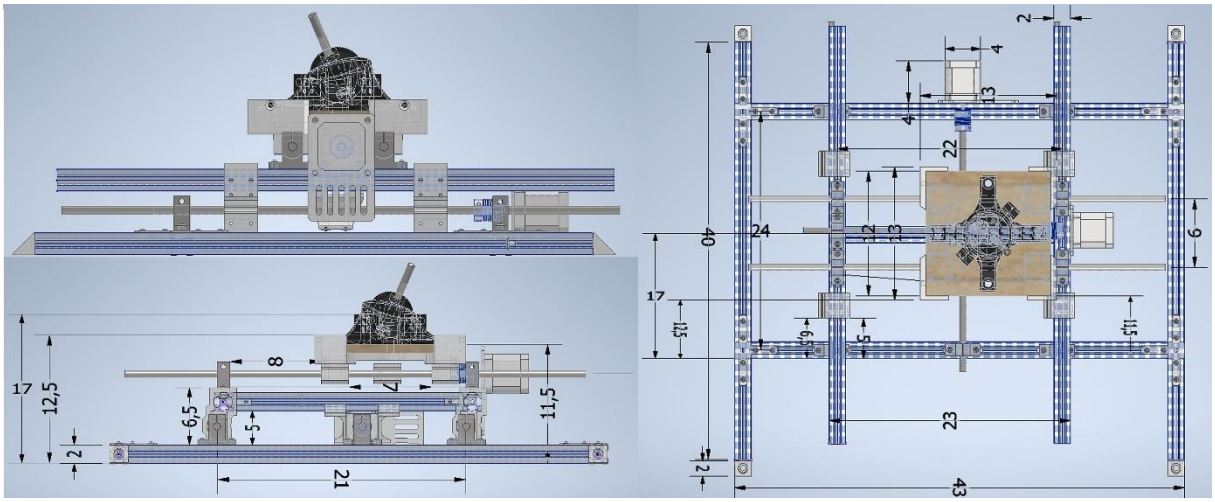
obejmował otoczenie 120mm wokół podpory, lecz jego średnia wartość przemieszczenia była znacząco niższa od przemieszczeń pozostałych układów wynosząc 3,85mm. Zakres ten jest dwukrotnie mniejszy od drugiego układu podpór charakteryzujących się najmniejszą zmiennością. Badania przeprowadzane były dla dokładności ruchu równej 1mm, lecz skala przemieszczeń podpór dla modelu układu nr 5 wymaga określenia większej dokładności.

Zauważa się ścisłą zależność między liczbą osi swobody, a skalą wymaganych przemieszczeń podpór. W każdym z badanych układów odnotowywano wyłącznie wzrosty efektywności co potwierdza skuteczność wprowadzenia ruchu do struktury ciągłej. Dla każdego układu podpór możliwe jest operowanie motoryką podpór ze względu na zbieżny lub zdecydowanie mniejszy zakres ruchu od obranego na cele badań. Do dalszych analiz wybiera się układ podpór nr 5 jako gwarantujący najstabilniejszą efektywność minimalnym kosztem pojedynczych przypadków efektywności.

5.4 Badania elementarne fizycznej struktury

5.4.1 Koncepcja modelu

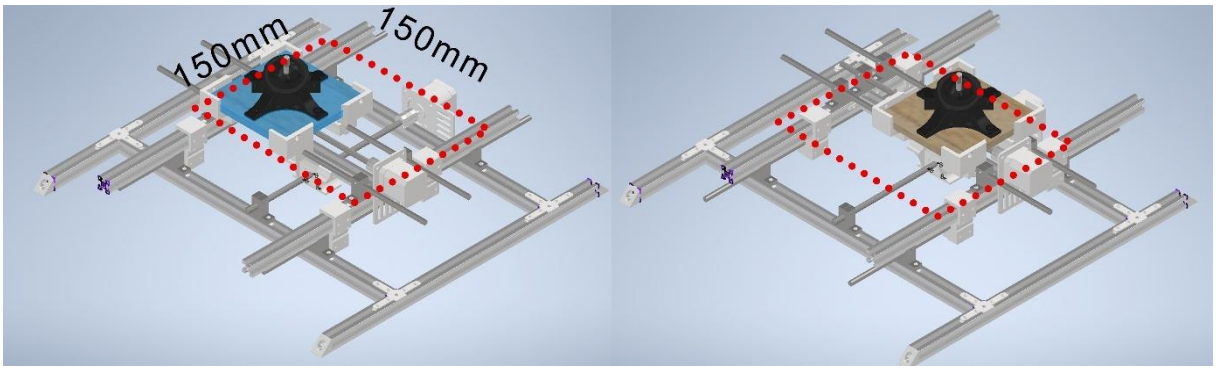
Zakłada się, że dla uproszczenia sterowania modelem i uzyskania większej precyzji zablokowany zostanie ruch podpory w osi pionowej. Zgodnie z zakresem badań teoretycznych podpora w założeniu ma poruszać się wyłącznie w osiach X oraz Y równoległych do podłoża. Zakres ruchu zmniejszono zgodnie z wynikami badań do 150mm pozostawiając rezerwę swobody przemieszczeń dla skrajnych wartości obciążeń. Podpora ma pozwolić na walidację wszystkich układów usztywnienia naroży modelu jak miało to miejsce w uprzednim badaniu, dlatego też zdecydowano się na zastosowanie modułowych łączników dla podpór. Ostatecznie cała podstawa struktury ruchomej składa się z dwóch elementów, którymi są moduł ruchu odpowiadający za przemieszczanie naroża zgodnie z zadanymi parametrami przy określonych siłach z zadaną dokładnością i możliwością weryfikacji położenia podpory oraz właściwa podpora która odpowiada jedynie za zapewnienie stopnia obrotu, której trzy kolejne modele zostały wykonane w celu doboru każdego możliwego układu usztywnień. Ostateczny model ruchomej podpory przedstawiono na Grafika 13.



Grafika 13.Opracowanie modelu fizycznej podpory z wykorzystaniem oprogramowania Autodesk Inventor 2024.

5.4.2 Badania zdolności realizacji fizycznej struktury podpory na podstawie opracowanej koncepcji

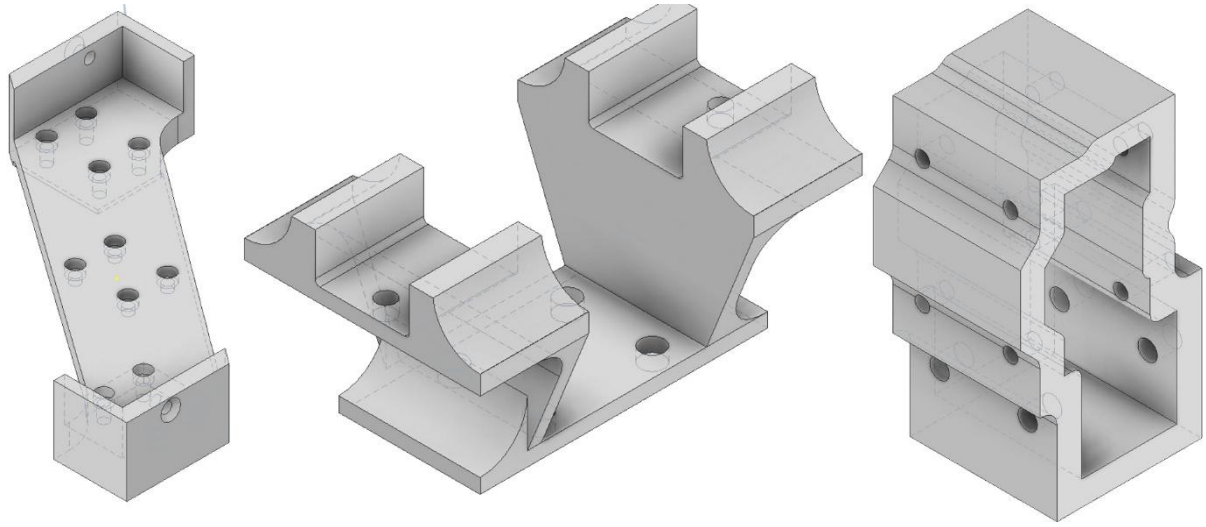
Składa się on z 45 elementów, 32 łączników, 64 śrub i mocowań oraz układu elektronicznego sterowanego automatycznie za pomocą Rhinoceros Grasshopper. Dobór elementów jak i sposób złożenia stanowią w całości autorskie opracowanie i w formie pełnej podpory przedstawione zostały na Grafika 14. Ruchomą bazę podpory zamodelowano z wykorzystaniem elementów powszechnie dostępnego systemu konstrukcyjnego



Grafika 14. Wizualizacja zakresu ruchu poziomego podpory ruchomej struktury responsywnej. Skala ruchu dopasowana została do skali struktury. Model komputerowy podpory zrealizowany w programie Autodesk Inventor Professional 2024 stanowi element załącznika nr 5.B pracy.

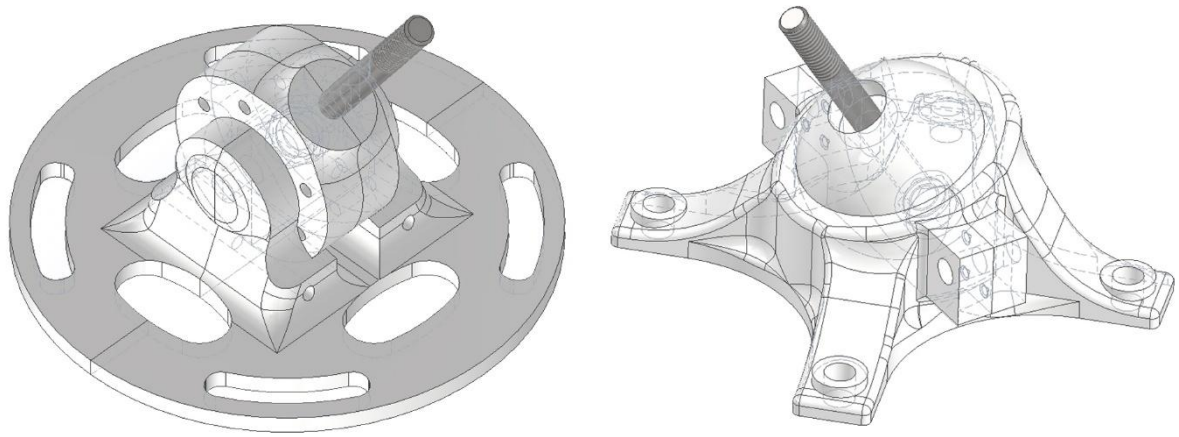
mechatronicznego v-slot. W pracy wykorzystano aluminiowe profile serii 2020, łączniki kątowe oraz śruby systemowe wraz z blokami mocowania. Wszystkie elementy łączono z użyciem śrub i haków zaciskowych stanowiących część systemu. Stelaż składa się z 3 kolejnych sztywnych ram z czego 2 znajdują się na prowadnicach i mogą się swobodnie przesuwać. Pierwsza rama spodnia z wykorzystaniem 4 narożnych kątowników mocowana jest do podłoża. Na ramie umieszczono łożyska liniowe systemowe na których osadzono osie stalowe o rozstawie zapewniającym stabilność pionową podpory. Między osiami osadzono śrubę trapezową wraz z blokiem prowadnicy pośrodku. Blok ten zawsze pozostaje równoległy do podłoża poprzez połączenie z zewnętrznymi osiami uniemożliwiając obrót elementu. Śrubę następnie połączono z silnikiem krokowym NEMA 17 SM 42/38-0804A o momencie trzymającym 0,26Nm. Silnik ze śrubą połączony jest sprzęgłem oraz osadzony na podkładce silnika dedykowanej użytemu modelowi wraz z przekładką antywibracyjną dla zachowania płynności ruchu bez przenoszenia wibracji na model powłoki. Przekładka ta stanowi jeden z kluczowych elementów budowy podpory ze względu na uniknięcie drgań mogących wpadać w zakres częstotliwości modalnych. Pozwala to uniknąć swobodnych przemieszczeń modelu niekontrolowanych mechanicznie, których wpływ opisywany jest w licznych pracach tematyki architektury i konstrukcji responsywnych[65], [89], [113], [156]. Obrót silnika wywołuje obrót śruby trapezowej, ta z kolei generując napór na blok mocowania wyższej części podpory porusza się w sposób liniowy w przód lub w tył zależnie od kierunku obrotu silnika. Na bloku oraz 4 narożnych analogicznych przesuwnych łożyskowanych prowadnicach umieszczono kolejną ramę w orientacji prostopadłej do niższej. Wyposażona była w analogiczny zestaw elementów tworząc szkielet wraz z częścią ruchomą wykonaną z dwóch łożyskowanych osi stalowych oraz śruby trapezowej napędzanej identycznym silnikiem NEMA 17 połączonym łożyskiem oraz izolowanym przekładką antywibracyjną. Na drugiej ramie zamocowano podstawę podpory wykonaną z plastikowego chwytaka oraz osadzonej na nim drewnianej płyty. Płytę wstępnie przewiercono w 4 miejscach umożliwiając łatwy montaż śrub mających na celu mocowanie głowicy podpory wykonanej w technologii druku 3D. Głowica wykonana została w 3 wersjach reprezentujących możliwość obrotu w dowolnym kierunku, w jednej osi lub zapewniając pełne usztywnienie w zadanej orientacji.

Cały model ruchomej podpory ma wymiary zewnętrzne 42x42x17cm i waży 3,174kg. Do jego zamodelowania oraz realizacji autor zamodelował oraz wykonał 9 modeli elementów w oprogramowaniu Autocad Autodesk, następnie przygotował do druku w oprogramowaniu Autodesk Inventor Professional finalnie przygotowując pliki do druku z użyciem programu Prusa Slicer. Modele przed uzyskaniem ostatecznych form przechodziły średnio 3 iteracje prototypowe w celu doboru wymiarów i spasowania elementów w granicach błędu wykonawczego drukarki użytej do wykonania elementów. Przykładowe modele przygotowane specjalnie na cele realizacji podpory ruchomej przedstawiono na Grafika 15.



Grafika 15.Aksonometryczne prezentacje elementów podpory wykonane przez autora w programie Autodesk Inventor 2024 stanowią część załącznika nr 5.B pracy. Elementy przygotowano w module systemu v-slot 2020.

Modele mocowań przygotowano w sposób tożsamy z pozostałymi elementami podpór i są przedstawione na Grafika 16. Każde mocowanie wyposażone jest w 4 lokalizacje osadzania śrub. Model w pełni obrotowy (po prawej) ma wyznaczone gniazda śrub. Nie podlega dopasowaniu kątowemu podczas osadzania na mechanizmie podpory. Wyposażony w łożysko sferyczne umożliwia obrót w dowolnym kierunku. Mocowanie obrotowe kierunkowe (po lewej) pozwalające na swobodę obrotu w jednej osi wyposażone jest w panoramiczne gniazda połączeń śrubowych. Pozwala to na uzyskanie dowolnego kąta orientacji osi



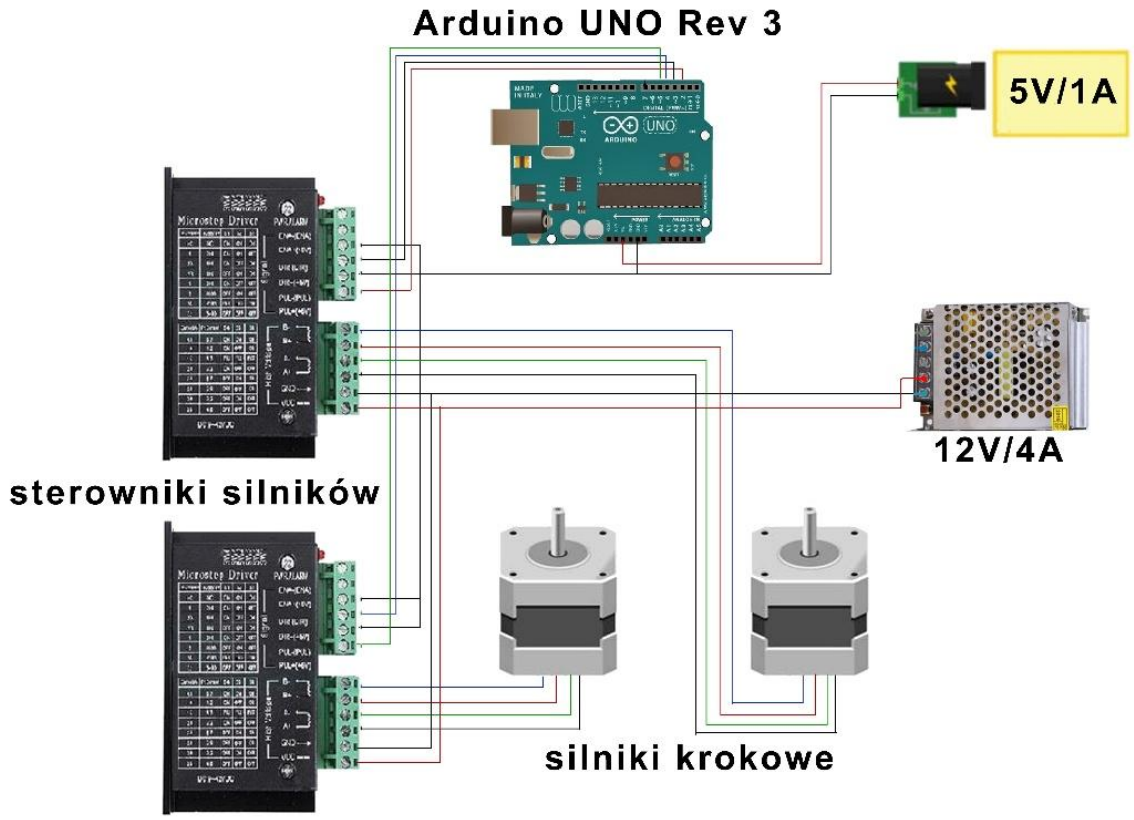
Grafika 16.Model podpory odpowiedzialny za swobodny obrót mocowania względem ruchomej części podpory. Modele stanowią załączniki nr 5.D.1 oraz 5.D.2 do pracy.

obrotowej i sztywnej względem wspieranej struktury. W badaniach uwzględniano wyłącznie obrót o pełne 90 stopni, lecz model pozwala na szerokie spektrum pośrednich układów płaszczyzn obrotu. Oba mocowania posiadają gniazda na centralną śrubę M8 pozwalającą na łączenie z narożem powłoki.

Geometrie obu podpór zostały opracowane z uwzględnieniem metod wykonawczych użytych następnie do przygotowania elementów oraz w oparciu o dopuszczalne siły maksymalne. Grubości elementów , wymiary gniazd śrub oraz łożysk opracowano z uwzględnieniem wytrzymałości materiałowej dla typowego filamentu PLA stanowiącego materiał wykonawczy modeli. Szerokości gniazd dobrano do zakresu dokładności wykonawczej użytej drukarki 3D w celu utworzenia samonawiercającej prowadnicy w każdym gnieździe. Zgodnie z badaniami wstępnymi gniazda wykonywane podaną metodą osiągały wytrzymałość na zerwanie przy maksymalnych siłach osiowych przy zagłębieniu na poziomie 7,5mm. Wartość ta została zdefiniowana jako minimalna głębokość wszystkich gniazd mocowania. Dzięki dobranemu spasowaniu elementów uzyskuje się naturalne sprężenie połączeń działających dla miękkiego materiału na zasadzie kołków rozporowych.

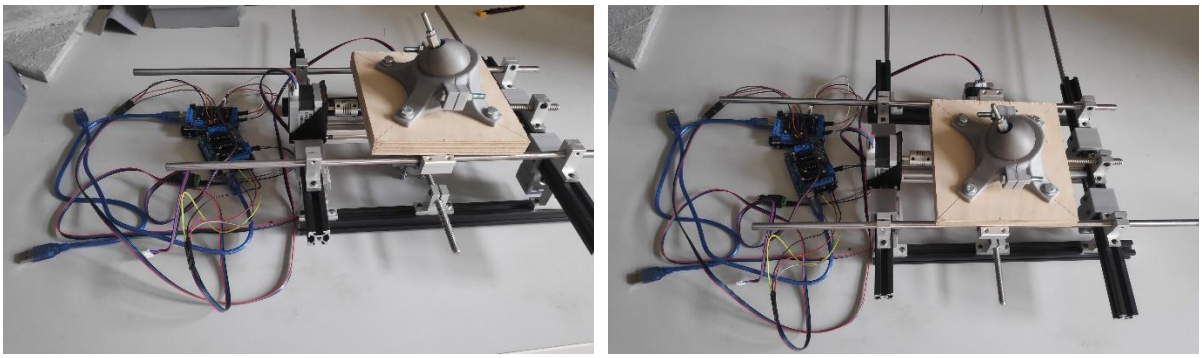
5.4.3 Układ sterowania ruchem, sposób działania modelu

Po przygotowaniu modelu w oprogramowaniu Inventor Professional przygotowano wszystkie wymagane elementy modelu i przystąpiono do procesu składania fizycznej ruchomej podpory. Składanie wymagało pocięcia profili aluminiowych oraz samodzielnego przygotowania podłoża z płyty wiórowej. Proces składania zajął 1,5h dla pojedynczej podpory. Po zakończeniu montażu przystąpiono do przygotowania instalacji elektronicznej złożonej z mikrokontrolera Arduino UNO Rev3 odpowiadającego za odbieranie danych o położeniu podpór symulowanych z komputera i przekazywanie ich w formie komend do kontrolera silników krokowych. Arduino połączone było przewodowo z jednostką centralną zapewniając przesył danych na poziomie umożliwiającym płynny przesył wystarczającej liczby danych w określonym czasie. Kontroler silników krokowych łączył się z kolei z mikrokontrolerem poprzez dwupasmową magistralę sygnałów analogowych. Kontrolery dobrane w projekcie posiadały funkcję obsługi dwóch kanałów jednocześnie. Korzystając z możliwości oferowanej przez jednostkę podłączono do niej oba silniki. Następnie ustawiono na kontrolerach rozdzielczość sterowania silnikami tożsamą z oferowaną przez same rotory równą 200 krokom na pojedynczy obrót. Rozdzielczość ta przy uwzględnieniu gęstości zwojów śruby trapezowej pozwalała na pozycjonowanie podpory z dokładnością 0,05mm. Ostatecznie dokładność ta została znacznie zmniejszona poprzez niedokładności wykonawcze powodowane innymi elementami mechanicznymi, nadal jednak pozostając w granicy dokładności żądanej dla realizowanej struktury. Ostateczna dokładność pracy modelu wyniosła 0,3mm w obu kierunkach. Ze względu na duże zapotrzebowanie energetyczne dla silników niemożliwe było zasilanie podpory bezpośrednio z gniazda sygnałowego USB komputera. Zastosowano zewnętrzne zasilanie 9V o natężeniu do 2A. Wartość ta była wystarczająca dla jednoczesnej pracy obu mechanizmów. Następnie połączono masy (bieguny ujemne) mikrokontrolera, jednostki centralnej oraz zewnętrznego zasilania w celu uwspólnienia zakresów stanów logicznych. Pełny schemat elektroniczny przedstawiony został na Grafika 17.



Grafika 17.Schemat elektroniki sterowania ruchem podpory z użyciem mikrokontrolera Arduino Uno Rev3 z użyciem własnego oprogramowania.

Ostatnim etapem było napisanie programów obsługi. Pierwszy program wykonany metodą blokową w Rhinoceros Grasshopper przygotowany został z użyciem zewnętrznej nakładki ***„Firefly”*** pozwalającej na dwukierunkową transmisję danych mikrokontrolerów i jednostek centralnych bazujących na oprogramowaniu Windows. W ramach testów sterowania modelem nie podłączano go na opisywanym etapie do symulacji struktury ruchomej. Ręcznie za pomocą suwaków wydawano komendy przemieszczenia podpory osobno dla osi X oraz Y z możliwością pracy symultanicznej. Podczas prób sterowania podporą stwierdzono pełną skuteczność reakcji systemu i gotowość do włączenia modelu podpory do fizycznego modelu badawczego struktury. Wykorzystane rozwiązania mechaniczne znacznie przekraczały założone początkowo minimalne parametry pracy. Silniki efektywnie były w stanie poruszać podporą obciążoną siłą poziomą równoległą do osi o wartości 120N, podczas gdy przeskalowany model musiał osiągnąć wytrzymałość na siłę minimalną 7,43N. Dowolna siła pionowa w zakresie dopuszczalnych obciążeń nie wpłynęła na utratę właściwości mechanicznych łożysk pozwalając na swobodny obrót podpór w zadanych kierunkach nawet przy pełnym obciążeniu pionowym na podporze. Model zachowywał pełną prędkość przesuwu dla dowolnych sił w zakresie. Ruch odbywał się z prędkością 4,5cm/s co pozwalało na wykonywanie dowolnej komendy reakcji w czasie krótszym niż 4s. Czas transmisji danych z programu Grasshopper do kontrolera silników wynosił poniżej 0,1s, co dawało średni czas reakcji podpory na poziomie 0,7s. Podpora wykazywała pełną sztywność wyłącznie podczas aktywnej pracy silników. Gdy zasilanie modelu ustępowało siła trzymająca spadała z wartości 0,26Nm do wartości definiowanych siłami tarcia mechanizmu równymi 0,03-0,04Nm co uniemożliwiało sztywne zachowanie Struktury. Dla przeskalowanego modelu nie stanowi to poważnego problemu, lecz pełnoskalowy obiekt musi charakteryzować się opisywanymi we wcześniejszych rozdziałach rozwiązaniami zabezpieczenia na wypadek chwilowego zaniku zasilania.



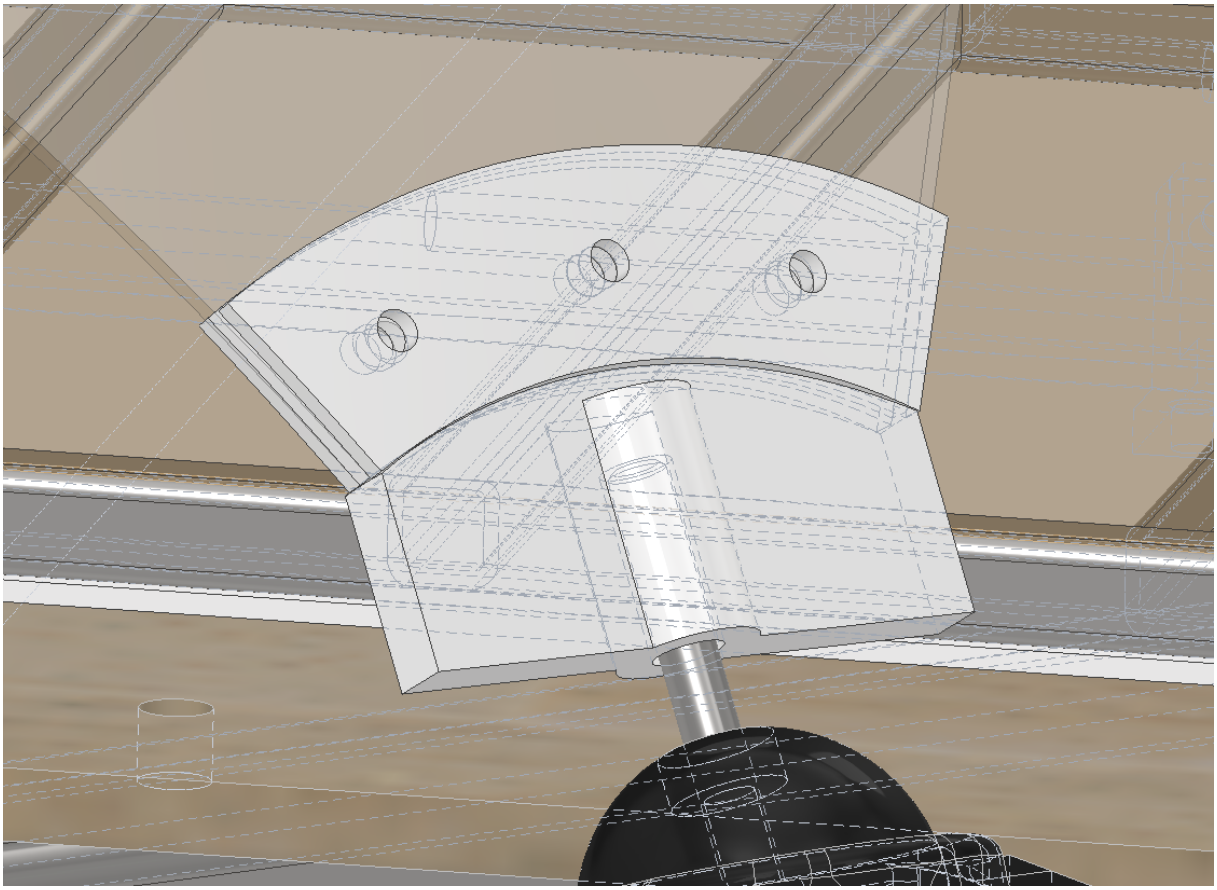
Grafika 18. Gotowy fizyczny model struktury responsywnej, w pełni funkcjonalny, umożliwiający do przesuwu przy siłach poziomych do 200N.

5.4.4 Koncepcja modelu łączenia podpory z powłoką

Struktury powłokowe sztywne podobnie jak membrany wymagają inżynierskiego opracowania sposobów mocowania do podpór. W każdej konstrukcji membranowej w miejscu podpory materiał ulega zwężeniu do nieskończenie wąskiego pasma wywołując nieskończenie duże naprężenia. W małej skali jak plandeki, czy namioty wystarczającym rozwiązaniem jest stalowe kołowe gniazdo na osadzenie elementu kotwiącego. Wraz ze wzrostem skali należy stosować bardziej złożone rozwiązania. W celu efektywnego rozłożenia naprężeń na większej powierzchni materiału stosuje się stalowe łączniki, które poza większą wytrzymałością na rozciąganie pozwalają na wzrost nośności poprzez operowanie grubością modelu łącznika. Łączniki zastępują skrajną narożną część materiału wiotkiego i zapewniają przeniesienie naprężeń rozciągających poprzez powierzchniowy zacisk na materiale naciąganym obustronnym spięciem pasmami metalu z użyciem punktowych śrubowań. Przykład membrany wymagającej odpowiednich mocowań przedstawiono na Grafika 19. Dodatkowo stosowanym rozwiązaniem dla powłok jest użycie stalowych cięgien dla zwiększenia sztywności krawędzi membrany, gdzie w innym przypadku dochodziłoby do zaburzenia ciągłości naprężeń, co opisywane było już w pionierskich pracach Frei Otto [157]. Modele struktur ciągłych responsywnych wykonane ze sztywnych elementów charakteryzują się podobnymi trudnościami wykonawczymi. Mimo, iż Stuttgart Smartshell posiada swoją wystarczającą sztywność, aby utrzymać geometrię pod wpływem obciążeń zewnętrznych to kształt struktury generowałby ryzyko zmiażdżenia naroży nad podporami. Połączenie to musiało zostać opracowane na zasadach analogicznych do struktur membranowych poprzez umieszczenie w narożu stalowej formatki o grubości pozwalającej na rozkładanie naprężeń z 3 punktowych siłowników na całą grubość powłoki w narożu równomiernie.



Grafika 19. Przykładowy model połączenia podpory sztywnej z modelem membranowym. Analogiczny problem łączenia występuje na połączeniu podpory z powłoką. Ze względu na sztywny charakter powłoki w badanym modelu nie występuje potrzeba stężania krawędzi, która w powłokach membranowych stanowi kluczowy element zachowania geometrii.



Grafika 20. Przedstawienie modelu mocowania powłoki do podpory. Pozwala ono na jednorodną dystrybucję naprężeń między elementami oraz uniknięcie zmiany znaku naprężeń w narożu modelu.

Opracowywana w badaniach powłoka responsywna charakteryzuje się minimalną grubością, która w przypadku realizacji pełnoskalowej struktury podlegać będzie optymalizacji grubości z uwzględnieniem właściwości materiałowych. Symulowany model komputerowy jest nierealistyczny pod względem geometrii naroży. W miejscu wystąpienia podpory model wsparty jest punktowo. Na potrzeby symulacji uwzględniono ten czynnik i ścisłą okolicę naroża zastąpiono teoretycznym materiałem o nieskończonej sztywności, umożliwiając przeprowadzenie analiz dla realistycznych warunków brzegowych. W symulacji tworzono wirtualną podporę na szerokości 0,5m pasma powłoki, gdzie na całej długości podparcia model wykazywał homogeniczną sztywność bez uwzględnienia punktów śrubowań koniecznych w fizycznych realizacjach modeli. Uproszczenie to skutecznie umożliwiało prowadzenie badań naprężeń i ugięć na modelu. Dla przeskalowanego modelu przygotowano mocowanie łączone śrubą z podporą dla dowolnego typu podpory oraz poprzez zacisk z narożem powłoki. Ważne jest, aby zachować wytrzymałość elementu jak i jego elastyczność. Musi pozwalać on na deformację w zakresie zbliżonym do zakresu odkształcalności powłoki. Zakłada się wykonanie elementu ze stali lub aluminium.

Na Grafika 20 przedstawiono model elementu mocowania podczas pracy struktury. Geometria połączenia z podporą pozostaje prosta o płaskiej geometrii, pryzmatycznym przekroju w znacznej części, natomiast w strefie połączenia z powłoką geometria podlega dwupłaszczyznowemu zagięciu tworząc formę trudną do powtórzenia. Model nie może pozostać całkowicie płaski, aby zapobiec powstawaniu zbyt znaczących naprężeń zdeformowanymi narożami. Kształt mocowania dostosowany jest do powłoki, aby w kontrolowany sposób minimalnie wyginać model. Bazowa krzywizna powłoki w narożu wzdłuż linii styku (wzdłuż linii krzywej łączącej środki otworów dla śrub) ma po 5,26 stopnia zakrzywienia. Model mocowania osiąga zakrzywienie na poziomie 6,26 stopnia. Zakrzywienie

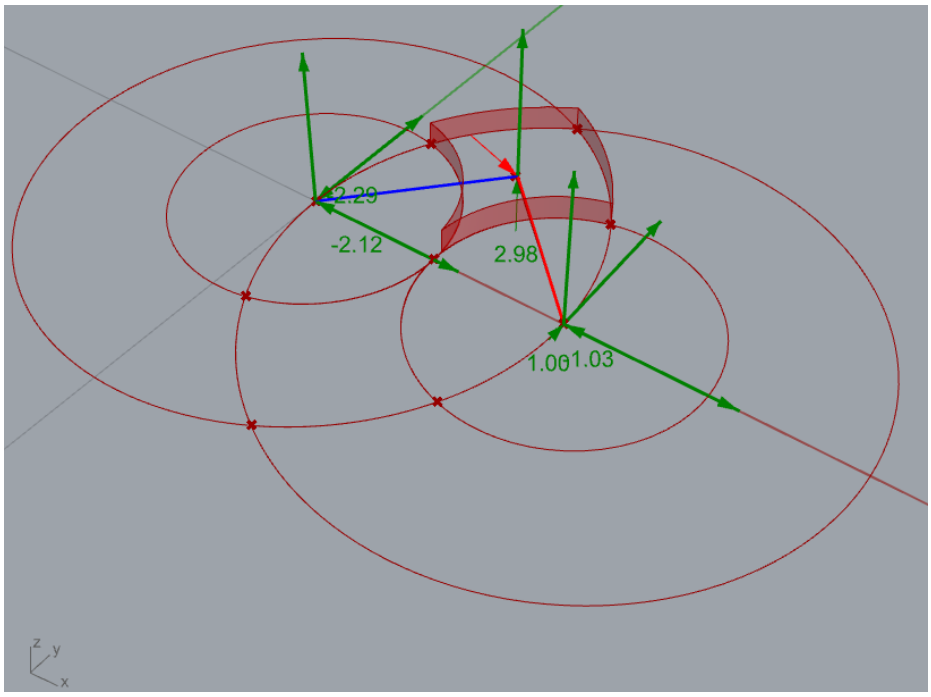
to wywołuje największe naprężenia w narożu mocowania, co wyzwala naprężenia zginające wzdłuż krawędzi bocznej modelu skorupy. Analogicznie do opisywanych wcześniej membran krawędzie ulegają usztywnieniu co zmniejsza podatność struktury na zmiany kierunku przykładanych do nich sił zewnętrznych. Mocowanie wykonane zostanie z materiału średnio 14-krotnie wytrzymalszego niż powłoka, dlatego też zachowanie grubości elementu równego grubości powłoki pozwoli na zachowanie sztywności oraz permanentnego usztywnienia modelu. Gniazda śrub łączących powłokę z mocowaniem zlokalizowano w odległości 3 średnic śrub od krawędzi oraz między kolejnymi śrubami w celu uniknięcia wpływu wzajemnego otworowań redukującego wytrzymałość modelu.

Mocowanie kątami zakrzywienia nie naśladuje wiernie kształtu powłoki wytyczonej teoretyczną symulowaną powłoką. Powodowane jest to koniecznością uniknięcia zjawiska zmiany charakteru pracy modelu w narożach. Zjawisko to opisane i zbadane przez Heinza Islera [158] jest niezwykle ważne w kontekście nośności struktur naśladujących geometrie membran pneumatycznie formowanych. Zgodnie z opisaną przez badacza zasadą błędne jest kształtowanie naroży struktur poddawanych wyłącznie ściskaniu w sposób prostokreślny poprzez ostre kątowe kształtowanie naroży. Naroże takie poddawane jest odwrotnym naprężeniom, a ruch podpór może jedynie zwiększyć wartości naprężeń. Dzieje się tak ze względu na charakter sił. W narożach generowane są naprężenia rozciągające, tożsame z naprężeniami wywoływanymi ruchem podpór. Cała suma naprężeń ściskających w strukturze oddziałuje na naroża jako skoncentrowane rozciąganie ze względu na przegięcie struktury i zmianę znaku krzywizny opisywaną wcześniej jako zjawisko przegięcia powłoki. W celu uniknięcia opisanego zjawiska ukształtowano mocowanie z zachowaniem krzywizny wypukłej o promieniu mniejszym niż na styku z powłoką. Zaburza to precyzyjną geometrię krawędzi wypracowaną w procesie przenoszenia krzywej łańcuchowej do modelu symulowanego, lecz zapobiega powstawaniu nieoczekiwanych znacznych naprężeń nie podlegających redukcji poprzez ruch podpór.

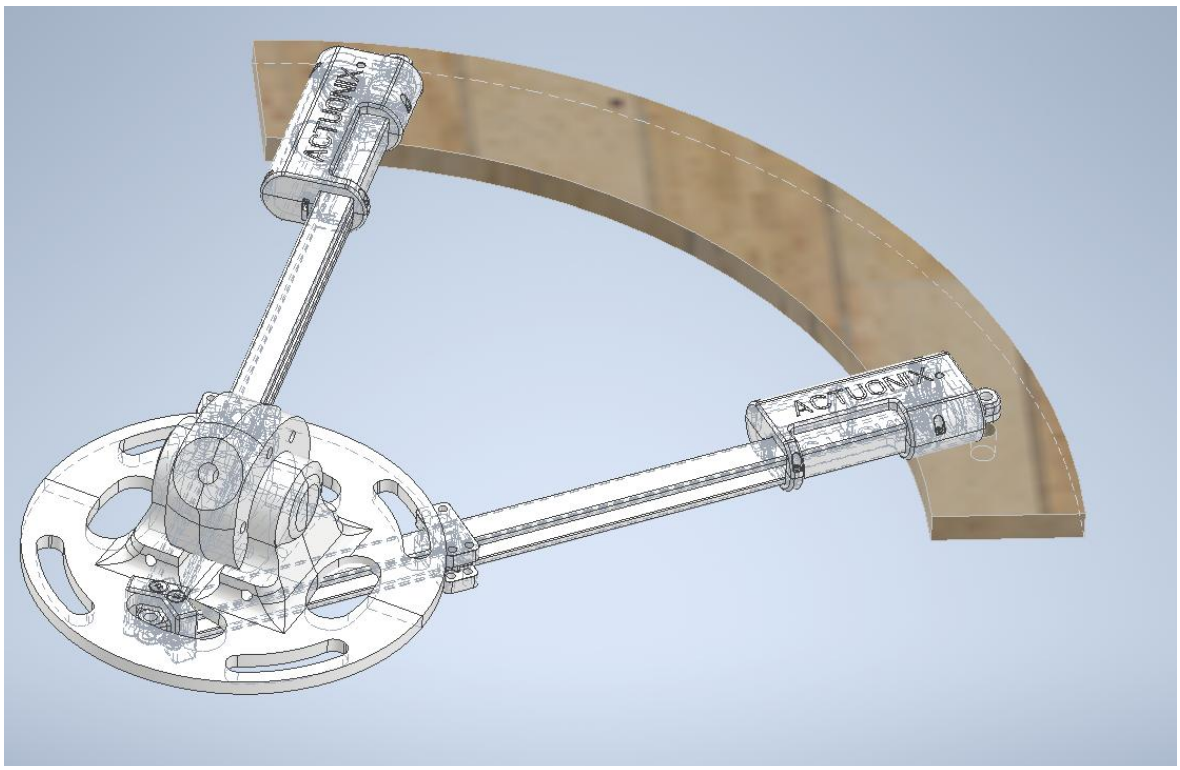
5.5 Badania alternatywnego modelu podpór

5.5.1 Koncepcja modelu i zagadnienia dokładności symulacji\

Model podpory opracowany dla powłokowej struktury o zmiennej geometrii charakteryzuje się pełną funkcjonalnością dla symulowanej skali modelu struktury. Problem skalowania do struktury pełnowymiarowej może generować trudności związane ze stopniem złożoności i skomplikowaniem metody ruchu podpór. Wysoką precyzję model uzyskuje kosztem wytrzymałości, która przy przeskalowaniu większym niż 4-krotne zaczyna wywoływać niestabilność w osi pionowej. Pierwotne założenie o pełnej sztywności części ruchomej struktury w osi pionowej dla całego spektrum ruchu przestaje być spełniane na rzecz sprężystego lub dalej plastycznego zachowania. Model ruchu wymusza znaczną dokładność geometrii elementów ruchomych dla zapewnienia poprawności ruchu obu osi w prostopadłych kierunkach co wywołuje konflikt. Stosunkowo małe siły pełnoskalowego modelu wywoływałyby znaczne deformacje i blokowanie silników. Problematyka skali znacznie upraszczana w opracowaniach naukowych [64], [87] wywołuje znaczące implikacje uniemożliwiając stosowanie prostego skalowania na elementy ruchu. Cały model podpory wymagałby obliczeń statycznych oraz dynamicznych, które nie stanowią zakresu pracy. W wyniku obliczeń elementy podpory i systemu ruchu znacząco zmieniłyby proporcje, a opłacalność użycia przedstawionego rozwiązania uległaby znacznej redukcji. Trajektoria ruchu podpory według wstępnych założeń pozostaje prosta. Możliwe jest przedstawienie licznych sposobów ruchu pojedynczą podporą. W celu wykluczenia opisanych trudności realizacyjnych przystąpiono do opracowania alternatywnego systemu ruchu. Najczęściej stosowanymi w architekturze responsywnej rozwiązaniami elementów ruchomych pozostają siłowniki dlatego też od nich rozpoczęto modelowanie. Układy równoległe i prostopadłe analogiczne do układu elementów ruchomych z pierwszej podpory każdorazowo wymuszają stosowanie zróżnicowanych form prowadnic. Unikając ortogonalnego układu elementów ruchomych rozwiązaniem pozostaje ukośny układ dwóch siłowników połączonych w miejscu wystąpienia podpory.



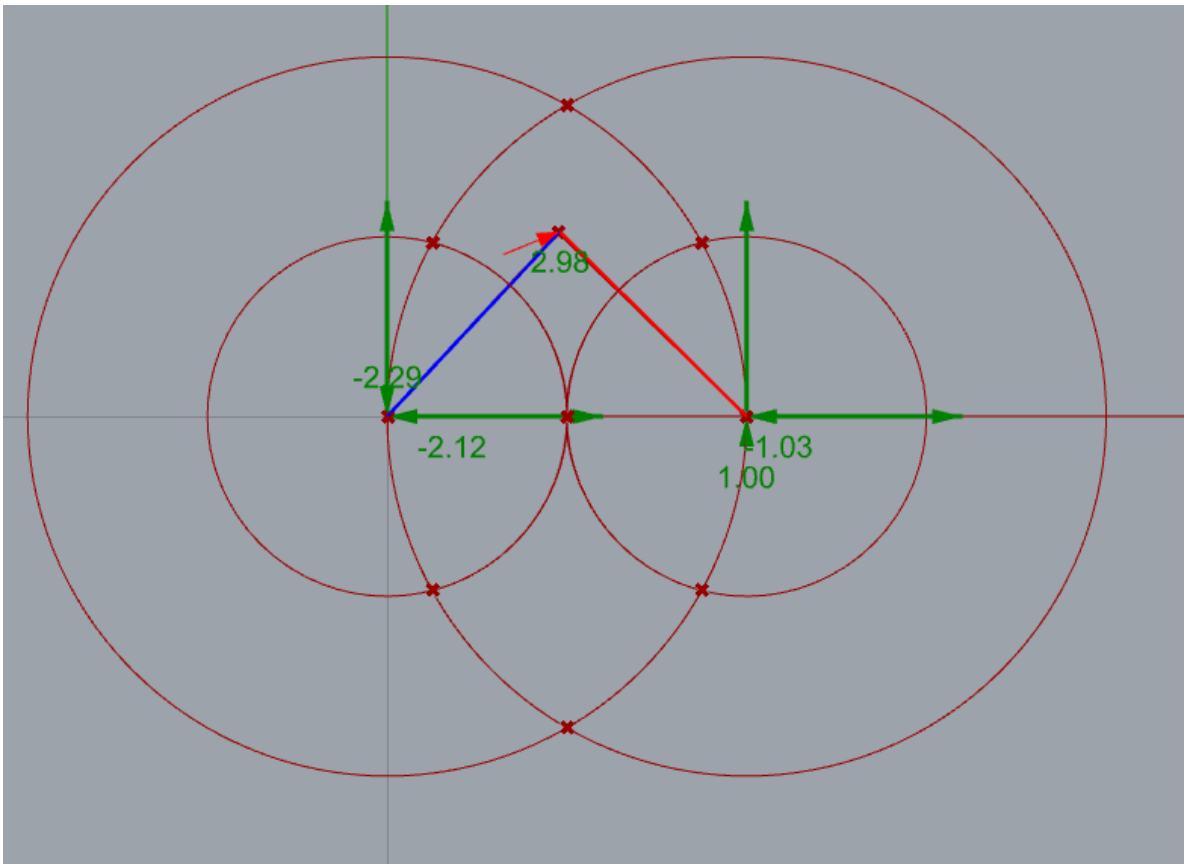
Grafika 22.Przedstawienie aksonometryczne zakresu przestrzeni ruchu podpory powłoki.



Grafika 21.Model podpory opartej na dwóch siłownikach. Sterowanie odbywa się poprzez ruch biegunowy dwóch siłowników. Model wykonano przy użyciu programu Autodesk Inventor Professional 2024. Stanowi on załącznik nr 5.C pracy.

Upraszcza to model ruchu do minimum pozostawiając wyłącznie dwa siłowniki oraz dwa punkty kotwienia w podłożu. Należy dobrać kąt oraz wymiary siłowników umożliwiające spełnienie wszystkich wymagań oraz zapewnienie funkcjonalności co najmniej równej wcześniej opracowanej podporze. Na Grafika 22 przedstawiono program symulacji zachowań podpory.

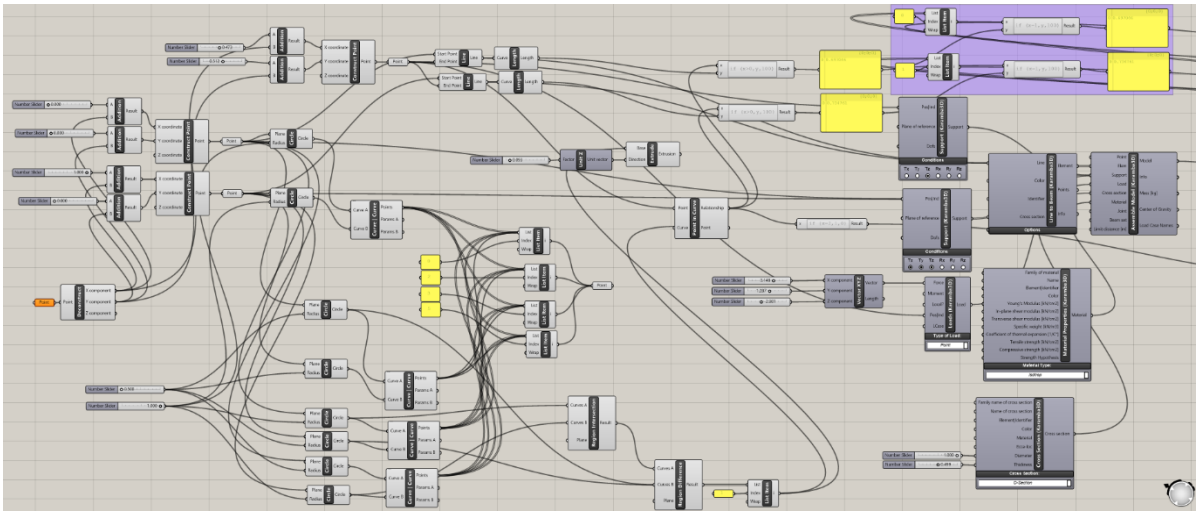
Na grafice Grafika 21 przedstawiono pierwszy model podpory prezentujący wzajemne połączenie elementów. Przedstawia on wstępną koncepcję połączenia elementów bez uwzględnienia efektywnego kąta między siłownikami i proporcji długości elementów. Zauważyć można zaokrąglony łącznik spinający oba siłowniki. Musi on wykazywać się znaczną sztywnością, aby uniknąć podatności połączeń siłowników z podłożem co mogłoby skutkować znacznymi niedokładnościami przemieszczeń podpór struktury. Na wspólnym końcu podpory zlokalizowana jest podpora. Poprzez uniwersalne połączenie na głowicach siłowników możliwe jest osadzanie wszystkich rodzajów podpór opisanych w rozdziale. Z kolei od spodu pod podporą znajduje się łożysko kulowe pozwalające na swobodne przemieszczanie podpory w płaszczyźnie poziomej. Układ ukośny siłowników znacznie komplikuje model ruchu struktury. Kartezjański układ współrzędnych należało zastąpić układem biegunowym o dwóch punktach centralnych. Zależnie od długości siłowników i kąta między nimi różne będzie pole zakresu ruchu podpory. Z dotychczasowego prostokątnego lub kwadratowego pola ruchu ulegnie przekształceniu w część wspólną dwóch powierzchni pierścieniowych. Dla zobrazowania problematyki zamodelowano badanie pozwalające na określenie parametrów ruchu i efektywnych zakresów motoryki podpór. Wyniki widoczne są w modelu parametrycznym prezentowanym na Grafika 23.



Grafika 23. Widok z góry układu podpory. Wszystkie parametry geometryczne pozostają zmienne co pozwala na proste dostosowanie zakresu ruchu modelu oraz formy jego granic. Model badania podpory został wykonany w programie Rhinoceros Grasshopper i stanowi załącznik nr 5.H pracy.

5.5.2 Budowa modelu

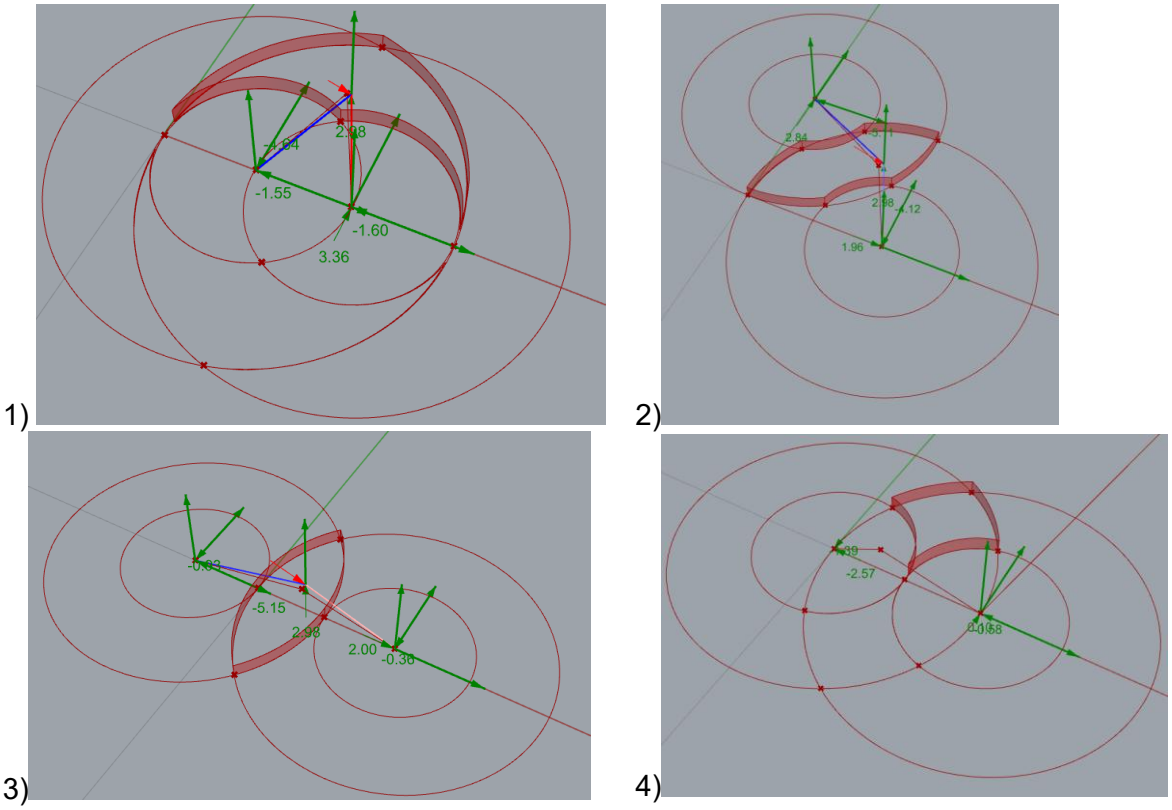
Model opracowany w programie Rhinoceros Grasshopper symulowany jak dla wcześniejszych badań pozostaje formą idealizacji nie uwzględniającej dokładnych geometrii elementów. Siłowniki uproszczono do prętów zmiennej długości oraz zdefiniowano maksymalne wartości teleskopowania. Model zbudowano w oparciu o trzy punkty. Dwa stanowiły miejsca mocowania nieprzesuwnego w żadnym kierunku. Były one rozdzielnymi końcami siłowników. Trzeci punkt stanowił miejsce połączenia siłowników, czyli jednocześnie stanowił miejsce występowania podpory struktury. Zdefiniowany jako nieprzesuwny wyłącznie w osi pionowej. W dalszej kolejności zamodelowano ruch siłowników. Określono granice wysuwów przedstawione schematycznie w postaci dwóch kolejnych pierścieni wokół centralnych punktów. Długości wysuwu tożsame z promieniami okręgów pozostają parametrami zmiennymi, które podlegać będą badaniu. Oba siłowniki podłączono w programie



Grafika 24.Schemat blokowy algorytmu sterowania ruchem podpory i analizy jej statyki. Algorytm zrealizowano w programie Rhinoceros Grasshopper.

do modułu obliczania naprężeń w formie MES wykorzystując nakładkę programową „Karamba 3D". Analiza przeprowadzana jest z użyciem modułu obliczeniowego analizy nieliniowej metodą Newtona-Rhapsona. Siłownikom nadano właściwości prętów stalowych dzielonych zawsze na dwie części. Część nr 1 zawsze równej długości jako tylny segment siłownika zdefiniowano przekrojem pierścieniowym o średnicy zewnętrznej 6cm i wewnętrznej 5cm, natomiast drugi segment odpowiadający wysuwanemu trzonowi siłownika określono przekrojem kołowym o średnicy 4,5cm. Podział ten pozwala na uwzględnienie wpływu zjawiska wyboczenia oraz zmniejszenia wytrzymałości wraz z teleskopowaniem podpory. Gdy nie występuje pełny wysuw siłownika oba elementy nakładają się na siebie wywołując zwiększenie sztywności układu. W wyniku uszczegółowienia modelu te same siły generują coraz większe naprężenia przy wzroście stopnia wysuwu. Do modelu dodano bloki tekstowe informujące o stopniu wysuwu każdego z siłowników. Reakcje podpory mierzone na początku badań podpór przykładane są w punkcie trzecim modelu i rozkładają się proporcjonalnie do kątów na oba siłowniki. Te dalej napierają na punkty mocowania. Osobna funkcja sprawdza poprawność wartości wysuwu prętów. Jeśli zostanie ona przekroczona model przestaje liczyć naprężenia i uznaje przypadek ułożenia podpory za nieosiągalny. W ten sposób struktura jest w stanie odfiltrować wszystkie nierealistyczne geometrie dopuszczając do analizy jedynie możliwe do uzyskania przypadki geometryczne. Dla uproszczenia sterowania modelem zdecydowano się, że dane na temat przemieszczeń będą wprowadzane w kartezjańskim układzie współrzędnych, a dalej następować będzie ich transformacja do układu biegunowego. Oznacza to, że ruch modelem odbywa się poprzez poruszanie punktem podporowym w osiach X oraz Y w rozdzielczości ruchu 0,05mm. Rozdzielczość ta tak jak i szybkość przemieszczania podpory nie jest jednakowa dla każdego ruchu. W obszarze roboczym modelu podpory możliwe jest wyznaczenie gradientów szybkości i precyzji ruchu ze względu na ciągłą zmianę

kątów padania sił reakcji na układ pary siłowników. Im bardziej równolegle ułożone są siłowniki tym szybciej przemieszczają się w osi Y, lecz uzyskują mniejszą precyzję i dodatkowo są podatniejsze na składowe reakcji podpory skierowane w osi X. Analogicznie im większa jest odległość między punktami indywidualnego mocowania siłowników do podłoża, tym wolniejsza jest zmiana pozycji w osi Y, lecz uzyskuje większą precyzję. Należy w obu przypadkach zwrócić uwagę na implikacje geometryczne skrajnych układów.



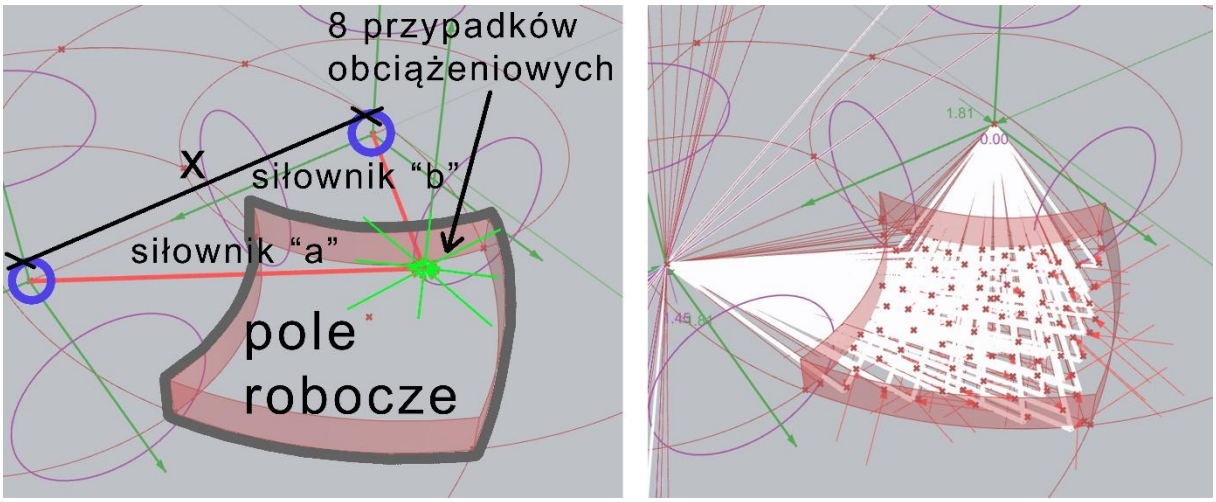
Grafika 25. Schematy 4 układów ograniczeń ruchu podpory dla 4 zróżnicowanych zestawów wartości parametrów doboru geometrii. Wszystkie układy podlegają badaniu jednolitości naprężeń w nich występujących.

Na schemacie graficznym Grafika 25 zestawiono wszystkie możliwe układy siłowników dla których uzyskiwane są zróżnicowane przestrzenie robocze. Dla układu nr 1 równoległość siłowników generuje znaczną podatność podpory. Jest ona sztywna w osi Y natomiast nie zapewnia porównywalnej wytrzymałości w osi X. Pole robocze podpory jest bardzo nieregularne, a skrajne strefy pola roboczego z lewej oraz prawej strony należy wykluczyć z analizy. Są one podatne na zjawisko przegięcia układu pod znacznym obciążeniem w osi Y podobnie jak układ nr 2 oraz nr 3 w obrębie centrum pola roboczego. Na obu grafikach zauważyć można rzeczywiste odkształcenie podpory w opisanej sytuacji. Prowadzi to do spadku dokładności przemieszczania podpory na dużym obszarze, a dalej zniszczenia podpory w mniejszej strefie krytycznej. Układ nr 4 zależnie od kierunku połączenia siłowników zarysowuje pole robocze w obszarze przedstawionym na grafice lub w układzie symetrycznym. Podczas pracy układ nie ma możliwości przemieszczania między polami roboczymi dlatego też na potrzeby analizy wydzielono tylko jedną przestrzeń. Cała strefa pola roboczego jest dostępna do ruchu podpory. Także narożne segmenty nie zakłada się, aby charakteryzowały się znacząco niższą sztywnością. Układ nr 4 jest równocześnie najbardziej zbliżony do kwadratowego pola roboczego pierwszego modelu podpory jak i pozwala na realizację wszystkich układów uzyskanych w toku badań modelu teoretycznego.

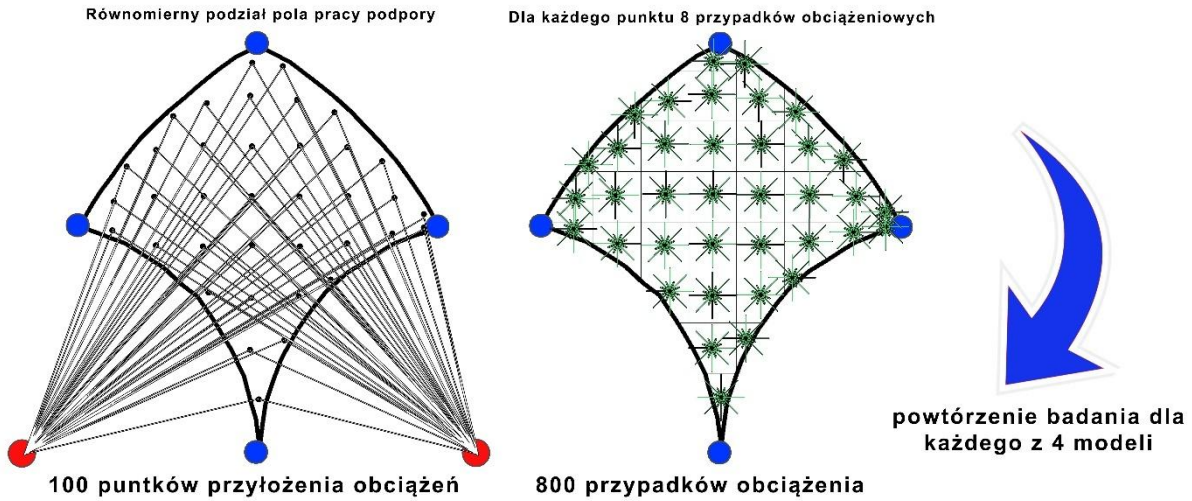
5.6 Badania symulacyjne naprężeń na podporze dla zróżnicowanych zakresów ruchu modelu

5.6.1 Koncepcja badań i przygotowanie przypadków obciążeń

W celu dobrania najefektywniejszego układu podpór przeprowadzono badanie. Dla każdego z modeli zbadano podatność w zróżnicowanych układach, w tym również dla skrajnych lokalizacji podpór. Zbadano odkształcenia i rozkład naprężeń tworząc matrycę użyteczności dla 4 opisanych układów w kilkunastu pozycjach zdefiniowanych zróżnicowanym kątem między siłownikami. W pierwszej kolejności z wykorzystaniem metody ***„Populate 2D”*** na polach roboczych wybrano 100 równo rozłożonych punktów rozmieszczonych na całej powierzchni roboczej. Dla każdego punktu zdefiniowano układ siłowników o niego zaczepionych analogicznie do pierwotnej budowy modelu. Jednocześnie model symulował wszystkie 100 układów oraz występujące na nich naprężenia jednocześnie. Dla każdego przypadku badaniu podlegał szereg składowych ocenianych według opracowanego schematu punktowego którego suma stanowiła efektywność badanego układu siłowników oraz ich pola roboczego. Układy obciążeniowe dla model nr 4 przedstawiono na Grafika 26.



Grafika 26.Schemat układu obciążeń na cele badania jednolitości rozkładu naprężeń.



Grafika 27. Formowanie przypadków obciążeniowych na cele ewaluacji jakości zakresów pracy podpór dla 4 kolejnych modeli.

Wzór łączył wszystkie istotne w funkcjonowaniu modelu parametry. Pierwszym była podatność na odkształcenia. Dla każdego punktu układ siłowników poddany był działaniu 8 sił ułożonych promieniście i osadzonych na punkcie. Siła zawsze miała wartość 5kN. Dla każdej z sił obliczane było odkształcenie modelu. Sumarycznie dla każdego punktu otrzymywano 8 odkształceń podawanych w centymetrach. Były one dalej sumowane osobno dla każdego przypadku. Podobnie zliczano naprężenia. Zestawienie przypadków obciążeniowych przedstawiono na Grafika 27. Największe prawdopodobieństwo zniszczenia siłownika występuje dla śruby jako elementu smukłego o małym momencie bezwładności. Dlatego też zliczano wszystkie naprężenia każdego z 8 przypadków dla wszystkich 100 punktów. Siłowniki zgodnie z założeniami geometrycznymi zawsze pracują osiowo ze względu na swobodę obrotu wszystkich zaczepów dlatego też nie badano wartości momentów zginających. Wszystkie siły porównywano z zadaną dopuszczalną wartością sił osiowych. Dla siłowników o śrubie długości maksymalnie 1m i średnicy 4cm wyznaczono wartość Eulerowskiej siły krytycznej jako równej 26kN. Granicę dopuszczalnego obciążenia określono jako równą 13kN. Wszystkie wartości sił osiowych w zakresie sił dopuszczalnych zaliczano do 1 kategorii, natomiast siły wartości wyższe do 2 kategorii. Jeśli dla któregoś z przypadków obciążenia przekraczano maksymalną wartość Eulerowską geometrię klasyfikowano jako niespełniającą podstawowych wymagań wytrzymałości. Dla odkształceń oraz naprężeń opracowano część wzoru formuły poszukiwania geometrii o postaci:

$$M_{N\mu} = \sum_{i=0}^{100} \sum_{j=0}^{8} \left(r_\mu + x_N\right) \tag{5.1}$$

$$x_N = \begin{cases} dla\ \ N < 50\% N_{max} & \frac{N}{1000} \\ dla\ \ 50\% < N < 100\% N_{max} & \frac{N}{500} \\ dla\ N > 100\% N_{max} & \infty \end{cases} \tag{5.2}$$

Gdzie:

-x_N-wartość składowej naprężeń dla pojedynczego przypadku obciążeniowego jednego badanego punktu [MPa]

N_{max}-określone z wartości siły Eulera maksymalne siły osiowe dla siłowników [MPa]

N-siły osiowe wyznaczone MES dla pojedynczego przypadku obciążeniowego siłownika o wyznaczonej większej sile osiowej [MPa]

r_μ-przemieszczenie punktu podporowego dla pojedynczego przypadku obciążeniowego [cm]

Dla pierwszego modelu podpory opracowany system ruchu zapewniał stałą prędkość zmian położenia niezależnie od aktualnej pozycji podpory. Dla opracowywanego alternatywnego jej modelu zależność jest bardzo wyraźna i nieliniowa. Na podstawie kąta między siłownikami a wektorem oczekiwanego ruchu określić można prędkość przemieszczenia. Będzie ona zmienna w funkcji trygonometrycznej dlatego też określona może być wyłącznie dla danego punktu. Ponadto maksymalna prędkość może być wyznaczona wyłącznie jako mniejsza z wartości prędkości przesuwu spośród obu siłowników. Dla fizycznego modelu podpory należałoby rozpisać program sterowania ruchem uwzględniający obie prędkości naraz i dobierający na ich podstawie ostateczną szybkość przemieszczeń. Na potrzeby badania wystarczy ocena symulowanych szybkości zmian pozycji. Dla każdego punktu badano szybkość przemieszczeń pionową oraz poziomą. Określano ją na podstawie kątów. Szybkości ruchu są wzajemnie powiązane dlatego tego należało ułożyć układ równań pozwalający na wyznaczenie prędkości w obu kierunkach.

Dla każdego siłownika punkt wspólny P może poruszać się tylko wzdłuż osi siłownika:

$$v_p \cdot \widehat{L_1} = i_1 \tag{5.3}$$

$$v_p \cdot \widehat{L_2} = i_2 \tag{5.4}$$

Gdzie $\widehat{L_n}$ oznacza wektor jednostkowy wzdłuż danego siłownika gdzie $\overrightarrow{L_n} = P - A_n$, z kolei $\widehat{L_n} = \overrightarrow{L_n}/|\overrightarrow{L_n}|$

Należy rozłożyć układ na składowe X oraz Y

$$\widehat{L_{1x}} \cdot v_x + \widehat{L_{1y}} \cdot v_y = i_1 \tag{5.5}$$

$$\widehat{L_{2x}} \cdot v_x + \widehat{L_{2y}} \cdot v_y = i_2 \tag{5.6}$$

5.6.2 Wyniki

Składowe v_x oraz v_y należy dalej wyznaczyć z przedstawionego wzoru. Uzyskane wartości w cm/s odejmowano następnie od bazowej szybkości teleskopowania siłowników równej 4,5cm/s. Wyniki włączono do funkcji efektywności. Dla 3 wartości parametrów zebranych w funkcję przeprowadzono badania pomiaru funkcjonalności przestrzeni roboczej. Funkcja modyfikacyjna przyjęła formę prostego sumowania opisanych wcześniej składowych v_x, v_y, $M_{N\mu}$. Dla 4 spośród przedstawionych wcześniej układów podpór dobrano po 10 wartości odległości między siłownikami, a następnie obliczono wartości funkcji efektywności na podstawie 100 dobranych punktów. Wyniki zebrano w macierzy.

Tabela 8. Wartość „x" odnosi się do odległości przedstawionej na Grafika 26. Pełne zestawienie wyników stanowi załącznik nr 6.D pracy.

	Zestawienie wyników rozkładu naprężeń w zależności od odległości "x" opisanego parametru.										
1	Odległość (x) [m]	0,5	0,55	0,65	0,7	0,75	0,8	0,85	0,9	0,95	
	Wartość funkcji	57,94+	52,19	48,12+	41,36+	38,14	35,73	34,06	33,7	33,56	
2	Odległość (x) [m]	1	1,05	1,1	1,15	1,2	1,25	1,3	1,35	1,4	1,45
	Wartość funkcji	46,82	53,03	57,22	68,1	74,09	77,62+	87,36	88,71	96,47	106,13+
3	Odległość (x) [m]	1,5	1,55	1,6	1,65	1,7	1,75	1,8	1,85	1,9	1,95
	Wartość funkcji	110,94	127,05	133,28+	159,75	192,84	232,71+	304,19+	471,04+	775,03+	1094,72 +

Wyniki pomiarów dla pełnego zakresu odległości między końcami siłowników (x) przedstawione w Tabela 8. Wartość „x" odnosi się do odległości przedstawionej na Grafika 26. Pełne zestawienie wyników stanowi załącznik nr 6.D pracy. jednoznacznie wskazują na ekstremum globalne funkcji zlokalizowane w otoczeniu 0,90<x<1,00. Różnice wartości pozostają minimalne w określonym otoczeniu z jego lewej strony, natomiast z prawej wartość rośnie w sposób dynamiczny. Uzyskana wartość 33,56 funkcji efektywności jest satysfakcjonująca i świadczy o dużej stabilności w całym zakresie pola roboczego oraz dobrej motoryce utrzymującej szybkie tempo teleskopowania. Część wartości oznaczono znakiem „+" oznaczającym wystąpienie minimum jednego przypadku obciążeniowego, w którym model nie spełniał podstawowych warunków nośności. Oznaczałoby to uzyskanie przez funkcję efektywności wartości dążącej do nieskończoności, lecz przy rozdzieleniu przypadków nie spełniających warunków od bezpiecznych układów uzyskiwano standardową wartość funkcji podawaną dalej w tabeli. Występowanie znaku „+" oznacza zupełne pominięcie danego układu z analizy. Dla wartości x=0,95 zauważa się brak znaku w najbliższym otoczeniu wartości świadcząc o wysokim stopniu bezpieczeństwa układu poprzez wywoływanie naprężeń w łatwym do oszacowania zakresie. Wyniki pokazują wykładniczą zależność spadku efektywności dla układów skrajnych. Wartość funkcji rosła wraz ze zmniejszaniem podobieństwa kształtu do kwadratu.

Nie badano wartości x>0,5m ze względu na ostre kąty między siłownikami w całym spektrum ruchu pola roboczego. Miejscowe nakładanie siłowników uniemożliwia usztywnienie podpory w danej pozycji dążąc naprężeniami dla tego przypadku do wartości znacząco przekraczających dopuszczalne zakresy. Na podstawie zebranych wartości do dalszych badań wybrano wartość x=0,95 dla wszystkich 4 podpór siłownikowych.

Ze względu na znacznie mniejszy stopień złożoności modelu przekładający się na prostszą obsługę, znacznie większą wytrzymałość i znikomą podatność na odkształcenia w kierunku pionowym do dalszych badań zdecydowano się wykorzystać drugą wersję podpory. Jej geometria pozwala na symulację rozkładu naprężeń w całej strukturze w czasie rzeczywistym co znacząco upraszcza proces weryfikacji skuteczności użycia nowych podpór.

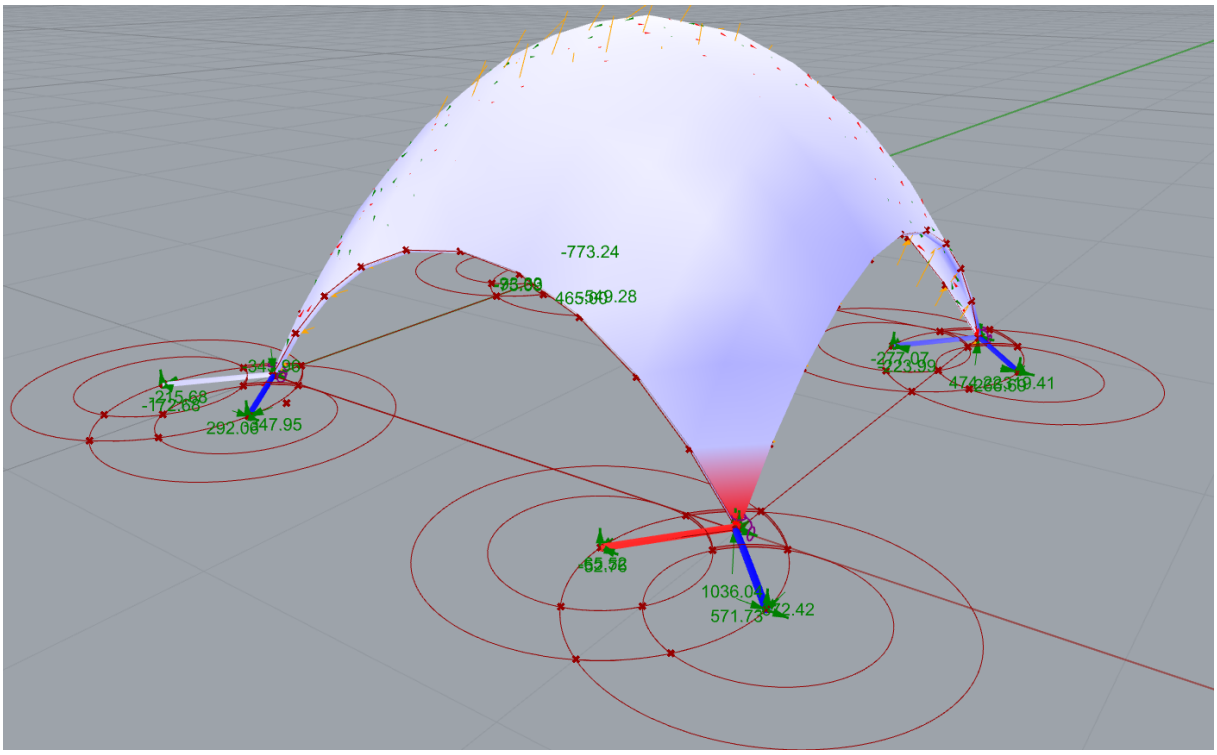
5.7 Badania kompleksowe symulacji ruchu powłoki przy zastosowaniu modeli podpór

5.7.1 Opis koncepcji modelu ruchu i pracy symulacji

W kolejnym etapie model responsywnej geometrycznie powłoki uszczegółowiono o dobraną geometrię podpory. Cały model budowy podpory wraz z modułami analizy i określenia geometrii, przekroju wraz z definicją materiału przekopiowano i podłączono do modelu powłoki zastępując prostą punktową podporę z początku badań. Dla każdej podpory zachowano wizualizację zakresu obszaru roboczego oraz zakresy ruchu indywidualnych siłowników. W celu ujednolicenia modelu połączono wszystkie elementy w jednym module obliczeniowym. Powłoka wraz z 8 siłownikami oraz 12 punktami podparcia przeliczana jest jako hybrydowa powłokowo-prętowa struktura o zmiennej geometrii. Naprężenia w dowolnym punkcie powłoki wpływają na rozkład reakcji na wszystkich podporach. Poprzez zmianę podpór model uzyskał inne pole robocze ruchu podpór i tym samym inne zdolności zmiany geometrii w wyniku ich przemieszczeń. Ostateczną formę modelu przedstawiono na Grafika 28. W celu zbadania funkcjonalności dobranych podpór przeprowadzono ponownie badanie zachowań modelu dla różnych przypadków obciążeń. W celu uzyskania wartości możliwych do porównania z poprzednimi wynikami badań dobrano przypadki obciążeniowe tożsame z pierwotnie przyjętymi dla koncepcyjnego modelu. Wyniki zebrano w Tabela 9.

Tabela 9. Wyniki badań przemieszczeń podpór dla 4-podporowego modelu powłoki. Pełne zestawienie badań stanowi załącznik nr 6.D pracy.

X [kN]	-3,89	-0,33	2,72	1,58	-0,67	-1,46	4,44
Y [kN]	-0,96	-3,34	4,85	-3,91	-1,93	3,02	-0,54
Z [kN]	1,98	3,65	-3,02	0,60	-3,19	-2,50	4,47
podpora 1 a [kN]	3,98	4,00	3,86	4,00	3,92	3,72	3,82
podpora 1 b [kN]	3,87	4,02	3,94	4,01	3,98	3,80	3,89
podpora 2 a [kN]	3,92	3,95	3,83	3,90	3,91	3,96	3,85
podpora 2 b [kN]	3,82	3,92	3,91	3,97	3,98	3,79	3,92
podpora 3 a [kN]	3,97	3,98	3,98	3,97	3,92	3,83	3,83
podpora 3 b [kN]	3,77	4,05	4,05	4,04	3,96	3,91	3,91
podpora 4 a [kN]	3,94	3,93	3,83	3,89	3,92	3,83	3,87
podpora 4 b [kN]	3,89	3,88	3,90	3,89	3,98	3,91	3,94



Grafika 28. Model powłoki z zaimplementowanymi modelami podpór opracowanych geometrycznie, analizowanych w sposób szczegółowy pod kątem statyki i zdolności ruchu. Model symulacji opracowany w programie Rhinoceros Grasshopper stanowi załącznik 5.G pracy.

Dla każdego przypadku obciążenia określonego składowymi X, Y oraz Z poszukiwano rozwiązań o efektywności co najmniej równej wynikom pierwszego badania. Dla używanego algorytmu ewolucyjnego określano każdorazowo efektywność po przekroczeniu której model poszukuje geometrii przez 3 iteracje zmian, a następnie przerywa pracę zapisując dane na temat najefektywniejszej z uzyskanych geometrii. Efektywność definiowana była jako średnie naprężenia, a algorytm zaprogramowano na pracę w celu poszukiwania najmniejszych możliwych wartości. Dla wszystkich 20 przypadków obciążeniowych ponownie przeprowadzono proces doboru efektywnej geometrii z wykorzystaniem analizy MES. Każde badanie trwało średnio 12minut, w każdym przypadku znajdowano geometrię o co najmniej równej efektywności względem wcześniejszych badań. Dla wszystkich najefektywniejszych geometrii zebrano dane na temat naprężeń powstających na podporach. Te podpisano numerami od 1 do 4, a siłowniki literami „a” oraz „b”. Dla każdego siłownika zbierano dane o naprężeniach. Przedstawione w formie tabeli prezentują rozkład sił osiowych i umiarkowaną homogeniczność zachowań podpór wraz z modelem.

Zakres sił osiowych wywoływanych przez obciążenia zewnętrzne powierzchniowe w czasie badania mieściły się w zakresie 3,77kN do 4,05kN. Bardzo wąskie spektrum wartości reakcji pozwala na precyzyjną kontrolę podpór i możliwość doboru małych zapasów bezpieczeństwa co skutkuje wzrostem efektywności struktury. Dla wszystkich przypadków odnotowano bardzo równomierny rozkład sił reakcji nawet dla ukośnych sił poziomych dążących do wywoływania nierównomiernych obciążeń na podpory. W żadnym przypadku nie przekroczono maksymalnych dopuszczalnych naprężeń a odkształcenia struktury pozostawały tożsame z uzyskanymi we wcześniejszych badaniach. Model finalnie uzyskał wzrost precyzji analizy dzięki włączeniu do modelu obliczeniowego dokładniejszego schematu zachowań podpór. Wszystkie przemieszczenia konieczne do realizacji wynikowych geometrii mieściły się w zakresie pól roboczych pozostawiając odnotowywalny margines przestrzeni. Dla zwiększenia nośności struktury możliwe jest wykorzystanie zjawiska poprzez restrykcyjniejsze określenie granic teleskopowania siłowników, lub poprzez dobór mniejszych siłowników o mniej wysmuklonej budowie w celu zwiększenia sił krytycznych wyboczenia.

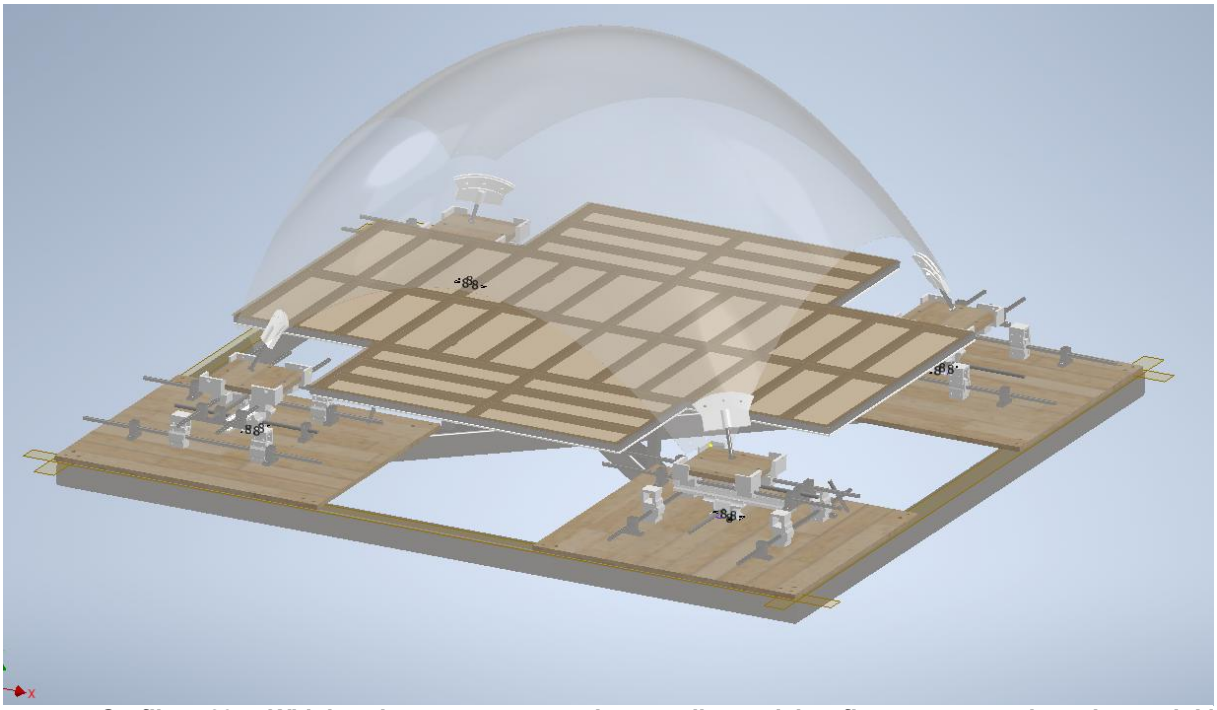
5.8 Koncepcja modelu badawczego wykorzystującego zjawisko elastooptyczne

5.8.1 Koncepcja modelu

Przejście z fazy koncepcyjnej do funkcjonalnego modelu przestrzennego struktury wiąże się z koniecznością rozwiązania szeregu problemów opisanych jako koncepcje ruchu analogicznie do formułowanych uprzednio węzłów przestrzennych struktur responsywnych. W pierwszej kolejności określono założenia fizyczne modelu. Stanowić będzie on przeskalowany obiekt w proporcji 1:10 względem modelu symulowanego komputerowo co oznacza powłokę o rozstawie między podporami równą 1,2m. Jej grubość zostanie przeskalowana względem modelu komputerowego. Wykonanie modelu nie obejmuje przygotowania podłoża dlatego też użycie konkretnego gruntu lub podstaw dla podpór nie stanowi części opracowania. Na potrzeby przeskalowanego modelu wykorzystano płytę sklejki klasy I o grubości 24 mm. Na niej umieszczony zostanie cały model struktury. Począwszy od podpór przez mocowania powłoki po samą strukturę skorupy. Połączony z nią zostanie stelaż dla siatek polaryzujących. Do jego wykonania dobrano profile v-slot aluminiowe serii 2020 o zwielokrotnionym przekroju dostosowanym do wymagań wytrzymałości i skali opracowywanego modelu. Nie będzie on wspierał, ani pozwalał na usztywnienie żadnych elementów strukturalnych modelu. Rozciągnięte będą na nim wyłącznie filtry oraz może stanowić mocowanie dla systemów pomiarowych.

5.8.2 Zjawisko elastooptyczne i sposób jego wykorzystania w pomiarowaniu struktury fizycznej

W celu umożliwienia analizy naprężeń na fizycznym modelu bez użycia specjalistycznej aparatury pomiarowej zdecydowano się na użycie pomiarów z wykorzystaniem zjawiska elastooptycznego opisanego w pracy [159]. Wymusza to wykonanie powłoki z akrylu lub litego poliwęglanu. Ze względu na sztywność i kruchość nie uwzględniono możliwości wykonania powłoki szklanej. Zasada działania elastooptyki opiera się o rozszczepienie światła przy przejściu kolejno przez materiał przezroczysty oraz filtr polaryzacyjny. Ukierunkowane przez filtr fotony reprezentują układ naprężeń na badanym obiekcie poprzez zróżnicowaną kolorystykę odbić w pełnym spektrum barw. Intensywność i barwa koloru nie informuje o konkretnej wartości naprężenia, lecz powstająca na powierzchni modelu płaska matryca kolorów swoim rozkładem informuje o ciągłości układu naprężeń i potencjalnych obszarach lub punktach kumulacji naprężeń. Oznacza to uzyskanie danych jakościowych zamiast ilościowych. Obszary o zwiększonej gęstości barw mogą być interpretowane jako miejsca występowania maksymalnych naprężeń, natomiast pojedyncze punkty lub linie załamania gdzie ustaje ciągłość informują o defekcie zarysowania lub skruszenia materiału. W celu zapewnienia poprawnego funkcjonowania wizualizacji elastooptycznej model musi spełniać kryterium kolejności układu elementów aktywnych i warstw. Na podstawie modelu umieszczone zostanie oświetlenie LED w formie łatwych w implementacji pasów o parametrach dobranych na podstawie dostępności rynkowej. Pod podporami rozciągnięta zostanie pierwsza warstwa folii polaryzującej, następnie umieszczona zostanie właściwa powłoka na którą skierowane zostanie światło LED. W celu wizualizacji zjawiska elastooptycznego należy światło przepuszczone przez powłokę ukierunkować również drugą warstwą folii polaryzującej. Aby uzyskać pełną dostępność modelu i zagwarantować obserwowanie zjawiska przez większą grupę osób możliwe jest wykonanie stelaża dla folii polaryzacyjnej. Alternatywą pozostają ręczne arkusze folii, lecz ze względu na istotność kąta między światłem, a drugą warstwą folii jest to rozwiązanie niepreferowane. Korelacja systemu czujników siły lub naprężeń z obrazem elastooptycznym rozszczepionego światła pozwoli na oszacowanie rozkładu wartości naprężeń na powierzchni modelu co powoli na weryfikację zgodności symulacji z modelem. Koncepcja modelu badawczego przedstawiona została na Grafika 29.



Grafika 29. Widok aksonometryczny koncepcji modelu fizycznego ruchomej powłoki wykorzystującej zjawisko elastooptyczne do wizualizacji naprężeń.

Geometria modelu jest trudna do wykonania. Należy ściśle odwzorować krzywiznę dla gęstej siatki punktów powłoki. W celu uproszczenia realizacji modelu i zwiększenia dokładności wykonania opracowano model systemu kratowych półszalunków. Wykonane z formatek o odpowiednim stopniu zaokrąglenia z płaskich elementów płytowych zakleszczanych wzajemnie pod kątem 90 stopni w formie rusztu kratowego. Gęstość siatki elementów zależy od żądanej dokładności wykonania. Dla opracowanej w programie Autocad Autodesk geometrii powłoki przygotowano kratę cięcia modelu wyznaczoną na podstawie wymaganej liczby punktów kontrolnych. Punktami tymi są miejsca przecięcia dwóch płyt definiujące punkt podparcia realizowanej powłoki. Każdy punkt połączony jest dzięki temu z sąsiednimi 4 punktami liniowym podparciem tworząc komórki o swobodnym zwisie powłoki. W środku komórki nie występują podparcia modelu dlatego też maksymalna wielkość komórek jest również zależna od sztywności materiału podczas deformacji. Jest to szczególnie ważne dla akryli i poliwęglanów, które do uzyskania żądanej geometrii muszą zostać uplastycznione w wyniku oddziaływania odpowiednio wysokiej temperatury. Podczas powolnego procesu ręcznego formowania należy unikać nadmiernego przegrzewania mogącego doprowadzić do utracenia krzywizny geometrii poprzez zatopienie fragmentu powłoki w komórce. Niebezpieczeństwo wystąpienia zjawiska można redukować poprzez rozciąganie naprężonego materiału pomagającego w utrzymaniu geometrii przy ogrzewaniu. Model jednak jak i sama forma w pracy opisane są wyłącznie jako rozwiązania modelowane. Realizacja modelu fizycznego nie stanowi zakresu opracowania badań.

5.8.3 System czujników wspomagający wizualizację elastooptycznego zjawiska

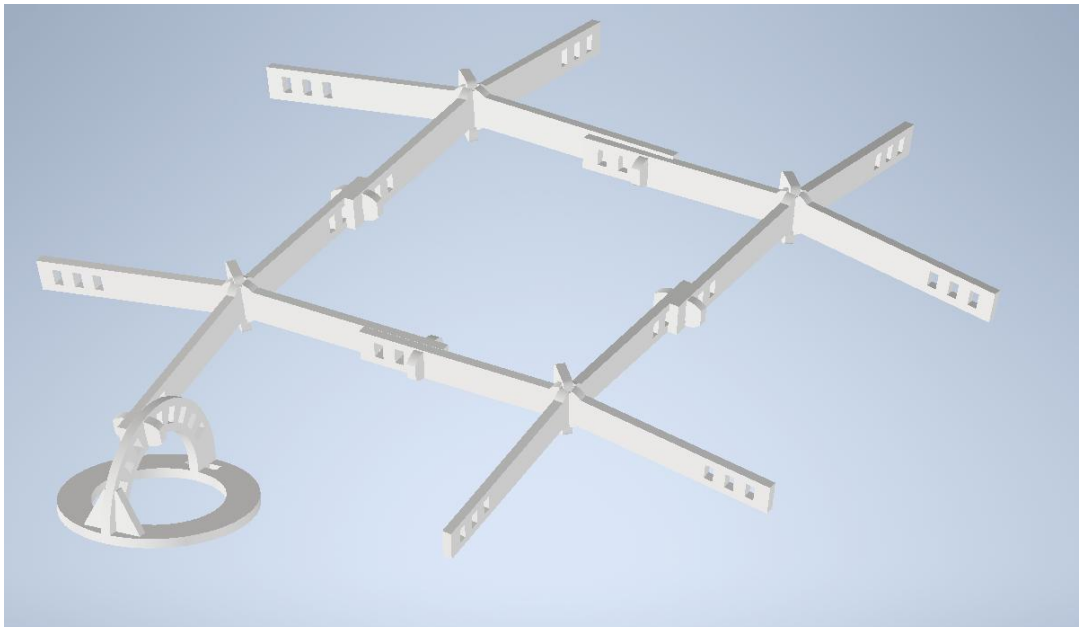
Podstawową informacją na temat modelu będzie rozkład naprężeń na powierzchni powłoki. Dane będę przedstawiane w postaci jakościowej bez wglądu w dokładne bądź przybliżone wartości liczbowe. Wyniki dotychczasowych badań świadczą, że dobrze dobrana geometria wywołuje maksymalne naprężenia w konkretnych strefach modelu co może być jednym z indykatorów pomyślnie przeprowadzanego procesu zmiany geometrii. Możliwe jest osadzenie czujników siły osiowo na osobnych końcach siłowników, lecz wartości mierzone obarczone będą znacznymi błędami sił tarcia i niedokładności wykonawczych modeli podpór. Pomiary geometrii poprzez pośrednie pomiary odległości od czujników do modelu w punktach referencyjnych z użyciem ultradźwiękowych czujników odległości dawać będą bardzo niedokładne wartości, lecz nie znajduje się alternatywy ze względu na trudności w mierzeniu parametrów materiału przenikalnego. Czujniki laserowe jak i kamery wyposażone w system DIC pozwalające na określenie geometrii oraz odkształceń i tym samym naprężeń w czasie rzeczywistym[101] nie uzyskają satysfakcjonującego poziomu interpretacji geometrii. Matowienie powłoki lub naklejanie punktów referencyjnych dla pomiarów skanerowych nie jest możliwe ze względu na zaburzenia odbioru danych elastooptycznych. Oznacza to, iż pomiar modelu może być jedynie pośredni. Dopiero pełnoskalową strukturę możliwe będzie wyposażyć w systemy umożliwiające zbieranie pełnych danych na temat powłoki. Pomiary elastooptyczne muszą zostać zastąpione pomiarami laserowymi lub wibrometrami działającymi w układzie matrycowym dla synchronizacji zbierania danych. Zależnie od założonego modelu zachowań struktury pomiarom podlegać będzie strzałka ugięcia lub wartości naprężeń. Oba badać można jednakowymi metodami, lecz zawsze będzie to pomiar bezpośredni jednej wartości oraz pośredni drugiej. Zawsze dostępne dane na temat lokalizacji podpór pozwolą na określenie geometrii i rozkładu naprężeń na strukturze bez uzyskania dokładnych danych liczbowych, a jedynie obraz analogiczny do zjawiska elastooptycznego. Opracowując system czujników siły na podporach możliwe jest określenie wartości reakcji podporowych co pozwala na dobranie skali wartości sił dla poszczególnych naprężeń i pośrednie uzyskanie informacji na temat rozkładu naprężeń na powłoce. Z kolei użycie technologii DIC umożliwia pełne spektrum danych z naciskiem na naprężenia i ich ciągłą zmianę. W celu uzyskania danych o pełnej geometrii należałoby system kamer połączyć z czujnikami odległości dla odpowiednio dobranych punktów pozwalających na pośrednie odtworzenie geometrii. Czujniki te dla zwiększenia precyzji w modelu pełnoskalowym mogą przybrać formę czujników inwazyjnych stycznych do modelu. Wykorzystując czujniki indukcyjne lub LVDT [102], [103] wykorzystujące zjawisko pola elektromagnetycznego mierzonego z dużą precyzją czujnikami Halla możliwe jest uzyskanie precyzji pomiaru odkształceń na poziomie 0,1μm co dla obiektu o wymiarach 10-12m jest dokładnością w pełni satysfakcjonującą.

5.9 Podsumowanie

W trakcie badań dowiedziono, że dla analizowanej struktury minimalizacja ugięć jest znacznie bezpieczniejsza niż minimalizacja naprężeń. Daje mniejsze wzrosty efektywności, a różnica ta wynosi 24% do 31% dla najlepszych wyników, lecz stabilnie generuje efektywne wyniki gwarantując znacznie wyższy minimalny wzrost efektywności. Uzyskany minimalny wzrost 12% zakresu ugięcia daje podstawy do dokładnej analizy opłacalności pełnoskalowej struktury. W ramach dalszych badań należy ocenić skuteczność stosowania różnych systemów pomiarowych i korelacji danych między nimi.

Uszczegółowienie modelu poprzez opracowanie 2 systemów ruchu podpór pozwoliło określić priorytety w modelowaniu takich elementów. Zwróciło to uwagę na kwestie ich sztywności i zgodności z symulacją, szybkości ruchu i jej istotności w kwestii obsługi struktury. Uwydatniło to problem skalowania poruszany we wcześniejszych rozdziałach. Ostatecznie opracowano model podpory spełniającej wymagania oraz opracowano model jej zachowań. Zbadano parametry jej pracy poprzez symulacje przypadków i dobrano zakres pola roboczego.

Wszystkie uzyskane wyniki umożliwiają opracowanie rzeczywistego modelu badawczego na potrzeby walidacji przeprowadzonych analiz. Badania wykazały, że wykorzystanie ruchomych podpór w strukturze ciągłej dla uzyskania zmienności geometrycznej obiektu pozwala na zwiększenie efektywności wykorzystania materiału. Dalsze badania powinny być skupione wokół sposobów wykorzystania efektywności, określenia na jakie parametry materiału lub całej struktury wpływają, określając scenariusze wykorzystania potencjalnego wzrostu trwałości elementów, zmniejszania wymogów konserwacji struktury, zwiększenia dopuszczalnych granic wytrzymałości lub uzyskania stopnia cyrkularności w procesie realizacyjnym poprzez modelowanie elementów, których okres użytkowania jest dłuższy niż zakładane użycie struktury, a które dzięki uzyskanej wiedzy mogą być zdemontowane lub rozebrane oraz ponownie wykorzystane bez obniżenia parametrów użytkowych i nośnych.



Grafika 30. Przedstawienie modularnego systemu elementów łączników tworzących szalunki dla deformacji płaskiej płyty poliwęglanowej. Model opracowany w programie Autodesk Inventor Professional i stanowi załącznik nr pracy.

Zbadano w pełnej skali model, który charakteryzował się znaczną dokładnością opracowania, co pozwoliło na uzyskanie wiarygodnych danych na temat ruchu modelu. Uzyskane wyniki potwierdzają słuszność dalszych badań responsywności struktur powłokowych. Model jednak nie zawsze generował wystarczająco efektywne wyniki. Bazowanie ruchu modelu wyłącznie na module głównym zachowań redukuje skuteczność do 12%, lecz przy zastosowaniu odpowiednio skuteczniejszych modeli preakcji i równoległych modułów sterowania możliwy jest wzrost co najmniej dwukrotny zgodnie z wynikami pierwszych badań w rozdziale. Oznacza to słuszność pierwszej tezy pracy mówiącej o konieczności użycia alternatywnych modeli zachowań niż te, stosujące algorytm ewolucyjny. Jednocześnie dostrzeżone tendencje zachowań efektywnych nie mają związku z modelarni dynamicznych relaksacji. Sposób reakcji modeli przybierał wyraźnie indywidualny charakter dla poszczególnych przypadków obciążeniowych co możliwe było do stwierdzenia dzięki zastosowaniu symulacji sterowanych algorytmem ewolucyjnym. Oznacza to potwierdzenie obu tez pracy.

6. Sposoby lokalnej zmiany układów naprężeń i ugięć w strukturach płytowych z zastosowaniem modyfikatorów punktowych

6.1 Wstęp

6.1.1 Koncepcja modyfikacji w strukturach powłokowych

Jak określono w poprzednim rozdziale zmiany geometrii w strukturach ciągłych są najbardziej kompleksowymi działaniami spośród zagadnień responsywności. Trudność ich realizacji polega na kompleksowości wpływu dowolnie małą zmianą na całą strukturę. Operowanie podporami nie daje możliwości sterowania stopniem wpływu na konkretne strefy modelu lub tym bardziej skupione naprężenia. Dowolna forma operowania strukturą ciągłą poprzez podpory wymusza zmiany w całej jej objętości. Generuje to największą część niedokładności spośród wszystkich parametrów i zjawisk mających na nie wpływ. Jednocześnie zmiana naprężeń w całej strukturze wymaga znacznych nakładów energetycznych oraz prowadzi do szybkiego zużycia materiałów i eksploatacji elementów strukturalnych. Uzyskanie bardziej precyzyjnej metody wpływu na układ naprężeń lub deformacje modelu pozwoliłby na generowanie znacznych oszczędności. Dla dotychczas analizowanej struktury powłoki zauważano przypadki obciążeniowe wywołujące naprężenia, dla których lokalne lub punktowe reakcje pozwoliłyby uzyskać znaczną redukcję naprężeń maksymalnych. Dotychczasowe analizy pokazywały liniową tendencję wzrostu efektywności zmian geometrii struktury przy zwiększaniu skali obiektu [87], [109]. W przypadku struktur ciągłych tendencja ta zostaje odwrócona. Skalowaniu w prosty sposób nie podlega rozkład naprężeń. Dla większych struktur zachowujących skalę występuje więcej fluktuacji w bryle naprężeń niż w mniejszym odpowiedniku struktury. Oznacza to, że operując wyłącznie podporami model responsywnej architektury ma górne granice wielkości będąc wyjątkiem w odniesieniu do dyskretnych struktur. Wciąż struktur tych dotyczy zagadnienie proporcji elementów ruchomych do statycznych. Przekroczenie pewnej proporcji przy realizacji zbyt małej struktury powoduje nieopłacalność, lecz skala nie pozostaje jedynym istotnym parametrem. Oznacza to, że pozostając w efektywnym zakresie skali obiektów zasadnym jest poszukiwanie rozwiązań dla punktowej modyfikacji geometrii dążącej do wpływu na strzałkę ugięcia lub dalej na rozkład naprężeń.

6.1.2 Stan badań sposobów wprowadzania ruchu w strukturach ciągłych

Dotychczasowe badania elementów powłokowych i masowych nie są wystarczające i pozostają ograniczone do Stuttgart Smartshell. Istnieją obecnie realizowane badania nad stężaniem struktur w sposób aktywny umożliwiając wpływ na rozkład naprężeń lub usztywnienie modeli, szczególnie w strefach połączeń między elementami gdzie dochodzi do największej utraty sztywności [72]. Elementy te nie pozostają w trwałym połączeniu co ułatwia sterowanie dystrybuując w naturalny sposób naprężenia rozciągające na cięgna i ściskające na strukturę masową. Badania na trwale łączonych elementach również prowadzono, lecz głównie w formie teoretycznej. Analizie podlegał system bardzo prostych systemów stężeń żelbetowych modułów mostowych, które na czas obciążenia przejazdem pociągu reagowały stężając odpowiednie fragmenty konstrukcji [152]. Analizowano również prefabrykowane moduły pod kątem implementacji cięgien o zmiennym stopniu sprężenia. Działanie oparte było o matrycę, gdzie rolę komórek pełniły punkty przecięcia cięgien. Sprężenie miejscowe polegało na naciągnięciu dwóch cięgien przecinających się w żądnym miejscu[73]. Dla modelu przeprowadzono proste analizy i zaproponowano model zachowań struktury, lecz nie podlegał on symulacjom i dalszej realizacji. Od kilku lat zauważa się tendencje do stosowania algorytmów ewolucyjnych w doborze stopnia sprężenia struktur [160]. Wszystkie te badania koncentrowały się na dwóch poruszanych dotychczas aspektach efektywności. Były

odpowiedzią na problemy statyki struktur. Znacznie szerszą grupę badań stanowi jednak dynamika struktur. Responsywność jest tu wymuszona w dowolnie małym, lecz niezerowym stopniu w celu uzyskania zmiany zachowań struktury pod obciążeniami dynamicznymi. Responsywność ta jest wynikiem blisko 6 dekad badań nad systemami zabezpieczającymi struktury podczas trzęsień ziemi [161], [162], [163]. Lepsze zrozumienie problemu częstotliwości modalnej i możliwość jej precyzyjniejszej analizy i modelowania w oparciu o jej wyniki pozwoliło na pochylenie się ku problemowi sztywności chwilowej [164], choć początki badań sięgają lat 80-tych [165]. Szeroki zakres badań w obu dziedzinach wykazuje duży potencjał naukowy w temacie. Możliwość przeniesienia ingerencji punktowej w strukturę responsywną, jak i ingerencja responsywna w strukturę statyczną należąc do wspólnej grupy problemowej nakreślają nowy dział nauki jakim są modyfikatory punktowe. W pracy nie porusza się zagadnień oddziaływania sił dynamicznych, lecz przytoczona droga ewolucji systemów tłumienia prezentuje na pewnym etapie historii związek struktur responsywnych z systemami tłumienia drgań.

6.1.3 Koncepcja sposobu działania modyfikatorów punktowych

W celu określenia celów badawczych należy ustalić zasady formułowania i modelowania modyfikatorów punktowych. Stanowić mają one integralne elementy strukturalne dlatego też składać się muszą z systemu modyfikacyjnego oraz połączeń ze strukturą. Połączenie to powinno być uniwersalne lub dążyć do takiej właściwości umożliwiając łączenie tak ortogonalnych elementów jak i znacznie bardziej dowolnych. Ze względu na brak badań dotyczących lokalizacji modyfikatorów wymagane jest określenie efektywnych miejsc, stref lub sposobów mocowania modyfikatorów. Rozwinięciem tej idei dalej może być zdefiniowanie siatki zaczepów na strukturze ciągłej pozwalającej na swobodne umieszczanie modyfikatorów w zróżnicowanych pozycjach. Mocowania te muszą charakteryzować się możliwością adaptacji stopni swobody do aktualnych wymagań modyfikatora. Ponadto ze względu na liczbę punktów mocowania należy zapewnić minimalizację wpływu elementów na całkowite zachowanie struktury. Nie mogą one modyfikować sztywności, ani wytrzymałości w sposób lokalny. Muszą samodzielnie usztywniać model w możliwie kontrolowany sposób.

Same modyfikatory powinny pozwalać na użycie jednostronne z możliwością zdwojenia dla pracy obustronnej w modelach powłokowych. Jednostronne działanie musi zapewniać pełne spektrum funkcjonalności co oznacza konieczność opracowania ściskania oraz rozciągania. Zakłada się, że wystarczy, aby modyfikator jednocześnie wykonywał tylko jedno zadanie wytwarzając naprężenia wyłącznie o jednym charakterze, lecz twierdzenie to podlega dalszej weryfikacji. Oznacza to możliwe uproszczenie modelu. Z kolei sama konieczność wytwarzania naprężeń wtórnych wymaga punktu podparcia, mocowania względem którego możliwe będzie jego generowanie. Nie jest możliwe, aby zapewnić dla każdego modyfikatora niezależny punkt mocowania niepowiązany z geometrią modelu. Oznacza to, że modyfikator musi generować naprężenia i odkształcenia poprzez zmianę odległości dwóch wybranych punktów na powłoce lub poprzez oparcie na dwóch punktach wytwarzając między nimi moment zginający. Zakłada się znaczną efektywność drugiej metody modyfikacji dla punktów położonych blisko siebie. Lokalne naprężenia powstające z obciążeń zewnętrznych na małej powierzchni lub generowane przez siły upraszczane do punktowych powinny być redukowane przez modyfikatory o odpowiednim zasięgu.

Po opracowaniu modeli zachowań dla pojedynczego modyfikatora, określeniu zakresu wymaganego teleskopowania lub innej formy zmienności należy przebadać potencjał stosowania układów modyfikatorów. Układy te złożone będą z co najmniej dwóch symultanicznie pracujących modyfikatorów. Ich liczba, układ, sposób implementacji, charakter pracy, precyzja teleskopowania i podział zadań w układzie powinny zostać dobrane w wyniku badań. Badania te pozwolą dopiero na ewaluację potencjału stosowania modyfikatorów jako integralnych stałych, zmiennych lub periodycznych elementów ruchomych struktur responsywnych zdolnych do zmiany geometrii w celu operowania naprężeniami lub odkształceniami. Należy opracować sposób badania wszystkich wskazanych parametrów, co

ze względu na obecny brak wiedzy w opisywanej dziedzinie wymusza rozpoczęcie ewaluacji od badań elementarnych.

6.2 Badania efektywności użycia modyfikatorów punktowych indywidualnych w strukturach powłokowych

6.2.1 Teoria i budowa modelu symulacyjnego operowania modyfikatorem punktowym

W celu przystąpienia do badań modyfikatorów punktowych, modyfikacji poddano wcześniej wykorzystywany model powłoki opracowany w oprogramowaniu Rhinoceros Grasshopper. Strukturę zdefiniowaną za pomocą 4 krawędzi stanowiących krzywe łańcuchowe osadzono na 4 podporach statycznych nieruchomych w pełni usztywnionych. Model w swojej najprostszej wersji nie może podlegać zmianom geometrii podporami, co pozwolić ma na wyekstrahowanie wpływu zjawiska responsywności na efektywność modyfikatorów. Uzyskaną powłokę zagęszczono punktami referencyjnymi. Dotychczas tworzona ze 121 punktów powłoka zyskała na dokładności zagęszczeniem do 1225. Punkty te rozłożone równomiernie na całej wewnętrznej powierzchni powłoki stanowią teoretyczne punkty zaczepu modyfikatorów. Ich liczba została przeszacowana względem możliwości wykonawczych fizycznego modelu jednak ze względu na konieczność przebadania zróżnicowanych układów modyfikatorów należało przygotować zagęszczoną siatkę. Cała powłoka na potrzeby obliczeń MES obliczana jest w sposób nieliniowy metodą Newtona-Rhapsona ze względu na konieczność uwzględnienia znacznych deformacji. Metoda obliczeniowa pozwala na określenie zachowań struktury również po przekroczeniu stanu granicznego nośności bez konieczności odwracania macierzy sztywności, lecz szacuje się, że funkcja ta nie będzie wykorzystywana. Cała powłoka zamodelowana jest ze stali S235, lecz przeskalowano ją do 15m rozpiętości dla osiągnięcia bardziej sprężystych zachowań poprzez zmniejszenie proporcji grubości do rozpiętości. Ostateczna powłoka waży 30548 kg. Podczas wszystkich badań obciążona jest siłą grawitacji, wywołującej na całej powierzchni dość jednolity rozkład naprężeń ściskających. Model ten nie jest samodzielnie obliczany. Na jego ostateczny rozkład sił wewnętrznych oddziałuje modyfikator punktowy stanowiący w programie Grasshopper fragment modelu przeliczany przed zachowaniem powłoki.

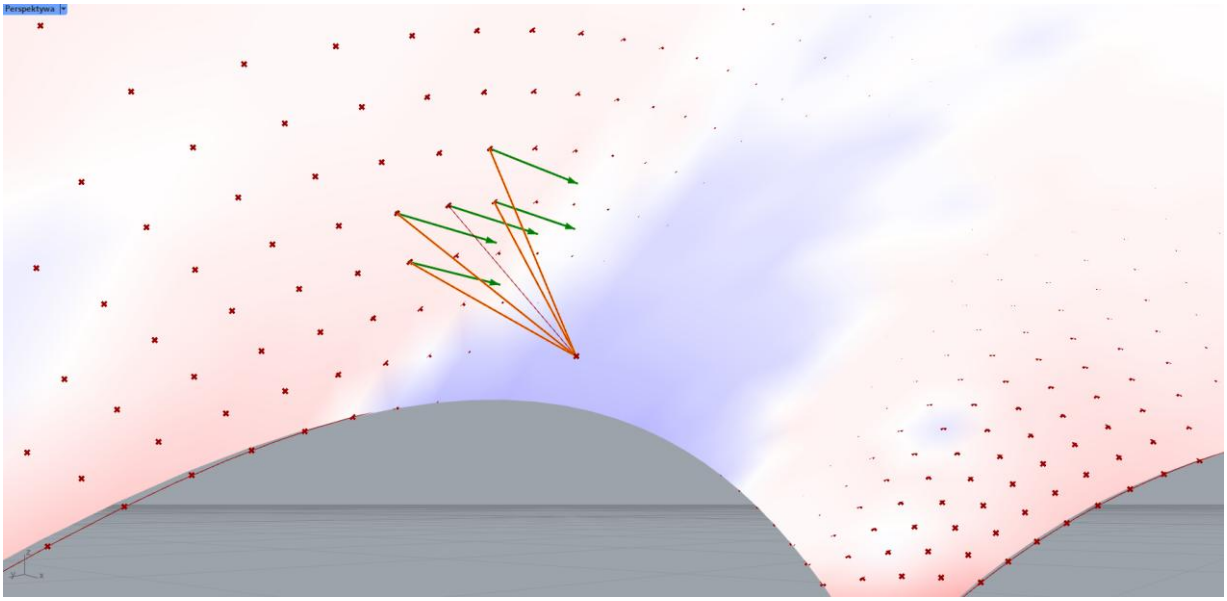
6.2.2 Sposób działania modelu modyfikatora

Mimo, iż jako pierwszy i główny element badań opracowano powłokę to ze względu na logikę kolejności przeliczania struktury pierwszeństwo obejmuje modyfikator. Dla pierwszego badania został on opracowany jako modyfikator momentów zginających. Koncepcja jego formy oparta jest o 4 siłowniki rozłożone promieniście wokół centralnego rdzenia będącego prętem o przekroju pierścieniowym i wytrzymałości dobranej w trakcie badań. Na potrzeby pierwszych analiz przyjęto uproszczenie pełnej sztywności i zerowej podatności na wyboczenia. Rdzeń centralny połączony jest przegubowo z każdym siłownikiem poprzez tarczę. Siłowniki z kolei bezpośrednio mocowane są do powłoki w miejscach mocowań na przecięciach siatki. Minimalna liczba siłowników pozwalająca na uzyskanie sztywności wynosi 3, lecz użycie nieparzystej liczby elementów ruchomych wiąże się z możliwością wywoływania bardzo prostych modyfikacji, które nie mogą być miejscowo równoważone. 3 siłowniki pozwalają na uzyskanie ściskania wokół wszystkich siłowników, natomiast rozciągania w części centralnej. Zawsze zachodzić będzie dysproporcja wielkości pól o danym charakterze pracy pod obciążeniem. Zawsze też modyfikator będzie poddawany znacznym momentom zginającym na tarczy ze względu na brak możliwości precyzyjnego równoważenia sił osiowych na siłownikach i rdzeniu. Zastosowanie minimum 4 siłowników pozwala na znacznie szerszą gamę zachowań. Możliwe jest uzyskanie równomiernego rozkładu pól naprężeń ściskających oraz rozciągających tak w układzie symetrycznym jak i biegunowym z naprzemiennymi

znakami naprężeń. W układzie 4 siłowników z 4 osiami symetrii układu elementów modyfikatora możliwa jest minimalizacja momentów zginających oddziałowujących na modyfikator co przekłada się bezpośrednio na jego trwałość oraz zmniejszenie podatności połączeń i mocowań. Ponadto poczwórny modyfikator znacznie podnosi bezpieczeństwo pracy modelu. W momencie utraty nośności lub awarii systemu teleskopowania jednego z siłowników możliwe jest wdrożenie awaryjnego trybu pracy pozostałych 3 siłowników umożliwiających nadal redukcję naprężeń z obniżoną skutecznością. Oznacza to, że poczwórny modyfikator zapewnia wyraźną sygnalizację awarii struktury. Nadmiarowością wprowadza do architektury responsywnej zabezpieczenia strukturalne. Dla większej liczby siłowników występować będzie podobna charakterystyka problemów i zalet rozwiązań parzystych i nieparzystych choć przez zwiększanie liczby sił w układzie dochodzić będzie do stopniowego ujednolicania pracy modelu co oznacza, że przy znacznej liczbie siłowników mogą one być sytuowane w układach nieparzystych wokół rdzenia. Problemem staje się wtedy sam rdzeń. Jest on głównym punktem oddziaływania na strukturę. Wzrost liczby siłowników oznacza wzrost punktowego, w uproszczeniu oddziaływania na strukturę w miejscu występowania rdzenia lub redukcję oddziaływań pojedynczych siłowników. Rdzeń poza siłami osiowymi przekazuje też na strukturę wszystkie momenty umożliwiające równoważenie układu modyfikatora z powłoką. Oznacza to konieczność doboru przekroju rdzenia oraz ograniczenia maksymalnych sił osiowych ze względu na wytrzymałość materiału powłoki zależnie od zakresu w jakim ma ona operować naprężeniami i deformacjami. Alternatywą pozostaje mocowanie przegubowe rdzenia do powłoki.

Modyfikator na potrzeby badania zdefiniowano stalą wzmocnioną o wytrzymałości na rozciąganie równe 650MPa. Wszystkie elementy podlegają odkształceniom włącznie z idealizowanymi sferycznymi przegubami łączącymi rdzeń z siłownikami. W pierwszej kolejności w Grasshopper zdefiniowano punkt mocowania rdzenia do powłoki jako wybieralny punkt z siatki punktów. Wzdłuż normalnej do powłoki w danym punkcie metodą ***„evaluate mesh”*** poprowadzono wektor na którym zaznaczono odcinek na którym dalej zamodelowano pręt rdzenia o sztywnej raz określonej długości. Ze swobodnego zakończenia rdzenia poprowadzono następnie 4 odcinki kolejno do 4 punktów siatkowych najbliższych punktowi mocowania rdzenia. Oznacza to, że siłowniki taką metodą nie mogą być obracane o 45 stopni, a jedynie o kąt prosty wokół rdzenia. Zamodelowany w ten sposób układ tylko pozornie jest styczny do powłoki. Dla symulacji stanowi osobny model zamocowany poprzez 5 podpór na końcach siłowników oraz na końcu rdzenia. Podpory te mają sztywność równą stali 650. Oznacza to, że skala deformacji podpór siłownika przekłada się na deformację powłoki która obciążona byłaby analogicznym modyfikatorem. Wszystkie 4 siłowniki mogą zmieniać swoją długość, lecz ich zmiana długości sterowana jest nie poprzez parametr wysuwu, a przez kontrolowane odkształcenie pręta. Oznacza to, że wydłużenie lub skrócenie siłownika wywołuje w nim naprężenia proporcjonalne do modułu Younga, które dalej dystrybuowane są na pozostałe siłowniki zakończone teoretycznymi podporami. Podpory te w wyniku zmiany sił osiowych w modyfikatorze oraz wartości reakcji podporowych ulegają przemieszczeniu. Przemieszczenie to jako wynik analizy nieliniowej MES jest dalej aplikowane na powłokę w miejscach teoretycznego połączenia siłowników z powłoką. W wyniku przemieszczeń wszystkich 5 punktów w powłoce wywoływane są naprężenia pochodzące teoretycznie z działania modyfikatora. To dalej powoduje powstawanie dodatkowych naprężeń na powłoce, które wraz z naprężeniami od grawitacji i poziomych obciążeń zewnętrznych punktowych i powierzchniowych przykładane są do struktury. Oznacza to, że model w sposób wirtualny odnosi działanie modyfikatorów na powłokę poprzez mocowania wirtualne w punktach siatkowych. W modelu modyfikatora można dowolnie ręcznie lub automatycznie sterować stopniem wysuwu poszczególnych siłowników poprzez zmianę wartości na suwakach przypisywanych konkretnym aktuatorom. Możliwa jest dowolna zmiana stopni sztywności poszczególnych połączeń wirtualnych co wpływa na rozkład naprężeń na powłoce. Możliwe jest również proste przemieszczanie modyfikatora po siatce punktów. Wraz ze zmianą punktu mocowania rdzenia automatycznie zmieniają się punkty mocowania przynależnych do niego siłowników. Możliwe jest lokalizowanie modyfikatora od strony wewnętrznej jak i zewnętrznej.

Ze względu jednak na wyniki badań rozdziału poświęconego poszukiwaniu form wybrano modyfikację wewnętrzną jako bardziej efektywną. Model na cele symulacji działania modyfikatora przedstawiono na Grafika 31.



Grafika 31. Perspektywiczne zobrazowanie symulowanego modyfikatora punktowego zamocowanego w 5 punktach do powłoki. Przedstawiono uproszczenia geometryczne odpowiadające złożoności obliczeniowej modelu. Model stanowi załącznik nr 6.G pracy.

Naprężenia powstające ostatecznie na powłoce pochodzące od obciążeń zewnętrznych oraz z sił przyłożonych modyfikatorem do modelu prezentowane są w formie bryły naprężeń. Model ten oparty jest o ręcznie modyfikowaną siatkę dla analizy MES. W otoczeniu podpór siatka ta jest zagęszczona do elementów o boku 0,5cm. Wraz ze wzrostem odległości od podpór rozmiar elementów ulega zwiększeniu do wymiaru boku długości 5cm w odległości 1,5m od podpory. Sumarycznie model powłoki na cele symulacji składa się z 107 438 elementów. Po przeliczeniu naprężeń na całej powierzchni i wygenerowaniu mapy rozkładu naprężeń Von Misses program przystępuje do obliczania średniej naprężeń, reakcji podporowych oraz strzałki ugięcia. Ponadto program zapisuje wartości teleskopowania siłowników na potrzeby budowy biblioteki zachowań dla zróżnicowanych przypadków obciążeniowych. Operowanie modyfikatorem przypisane jest do algorytmu ewolucyjnego. Odpowiada on za dobór odpowiednich długości teleskopowania, a w części badań steruje również umiejscowieniem modyfikatora. Parametry programowe algorytmu zdefiniowane są w następujący sposób:

Tabela 10. Zestawienie parametrów algorytmu ewolucyjnego na potrzeby symulacji działania modyfikatorów.

Max. stagnant	population	Initial boost	maintain	inbreeding
10	70	2	4%	65%

6.2.3 Przygotowanie przypadków obciążeniowych oraz sposobu działania modyfikatorów

W celu określenia efektywności użycia modelu modyfikatora badania rozpoczęto od elementarnych przypadków obciążeń punktowych na powłokę. Obciążenia te symulowane są w sposób analogiczny do obciążeń użytkowych przewidywanych oraz losowych, a także obciążeń wykraczających poza zakres wartości dopuszczalnych w celu zbadania sposobu zniszczenia struktury. Zakłada się największą skuteczność działania modyfikatorów dla sił

punktowych dlatego też rozpoczęto od ich badań. Na wyniki znikomy wpływ miała wielkość modyfikatora, badana na dalszych etapach. Ważnym czynnikiem pozostaje skala sił jakie musi modyfikator wygenerować oraz rozłożyć na powłoce przy powstawaniu momentów zginających.

Badania rozpoczęto od dobrania 10 przypadków obciążeniowych o losowych lokalizacjach na siatce punktów i losowych wartościach oddziaływania. Dla każdego punktu dobierano wartości składowych obciążeń X, Y oraz Z w zakresie -20kN do 20kN, tak aby kąt między kierunkiem siły, a normalną powłoki w danym miejscu był nie większy niż 15 stopni. Następnie dla każdego przypadku obciążeniowego badano parametry pracy modelu w 5 sytuacjach. W pierwszej sytuacji nie występuje modyfikator, nie wpływa on w żaden sposób na pracę powłoki. Jest to sytuacja kontrolna, względem której porównywane są wszystkie kolejne sytuacje. Nr 2 symuluje lokalizację modyfikatora na punkcie siatki najbliższym przyłożonej siły, tak aby rdzeń wyznaczał środek modyfikatora. Zakłada się, że układ ten przyniesie największy wzrost efektywności rozumiany jako redukcja naprężeń oraz strzałki ugięcia, a także wartości reakcji podporowych. Sytuacja nr 3 symuluje umiejscowienie modyfikatora w układzie symetrycznym względem osi biegunowej przechodzącej przez środek ciężkości powłoki. Założenie skuteczności oparto na twierdzeniu, że symetria układu sił zewnętrznych pozwoli zwiększyć sztywność i podnieść jednorodność rozkładu naprężeń poprzez wystąpienie symetrycznych kierunków i wartości sił znoszących się wzajemnie, tworząc na środku struktury pasmo obojętne o minimalnych naprężeniach. Układ nr 4 polega na losowym dobraniu miejsca mocowania modyfikatora w obszarze 1m od punktu wystąpienia siły. Jako, że największe naprężenia zlokalizowane są w otoczeniu podpór bezpośrednia ingerencja w rozkład naprężeń pod siłą zewnętrzną punktową może być mniej efektywna niż pośrednia przeciwna deformacja powłoki wywołująca usztywnienie w otoczeniu podpory nawet kosztem zwiększonych naprężeń w otoczeniu punktu wystąpienia siły. W sytuacji 5 od algorytmu ewolucyjnego oczekuje się dobrania efektywnego punktu spośród wszystkich dostępnych na matrycy i określenia sposobu teleskopowania wszystkich siłowników modyfikatora. W modelu tym algorytm ma znacznie liczniejszą grupę przypadków do przeanalizowania poprzez zwiększenie puli parametrów o lokalizację dlatego też dla sytuacji nr 5 badania prowadzone będą z odpowiednim wydłużeniem czasu poszukiwania efektywnych geometrii względem wszystkich pozostałych przypadków.

6.2.4 Przebieg badania operowania modyfikatorem w celu redukcji naprężeń maksymalnych

Dla pierwszych 4 sytuacji symulacja trwała do momentu przebadania minimum 1500 geometrii. Wszystkie iteracje wykorzystują taką samą część mocy obliczeniowej jednostki centralnej dlatego też każdorazowo obliczenia pojedynczego przypadku w pojedynczym układzie trwały 20minut. Dla sytuacji nr 5 założono czas poszukiwania form jako równy 33 minuty w czasie których program badał średnio 2200 geometrii. Między kolejnymi pomiarami ręcznie resetowano układy modyfikatora i stopnie teleskopowania, aby algorytm ewolucyjny rozpoczynał zawsze pracę przy jednakowych parametrach początkowych. Pomiarom podlegały naprężenia oraz ugięcia, a także reakcje podporowe, finalne pozycje siłowników modyfikatorów, naprężenia na modyfikatorach oraz odległość modyfikatorów od punktu przyłożenia siły.

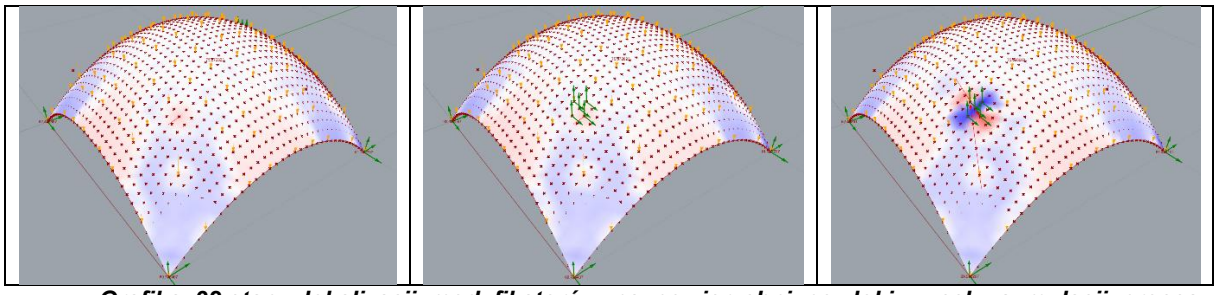
6.2.5 Wyniki badań

Podczas testów przebadano 40 sytuacji i przypadków obciążeniowych, dla których zauważono wyraźne schematy i tendencje. We wszystkich sytuacjach udało się uzyskać wyniki lepsze w przypadku obecności modyfikatora niż dla struktury statycznej. W dowolnym ułożeniu dla dowolnej siły uzyskiwano zmniejszenie naprężeń maksymalnych podnosząc tym samym wytrzymałość struktury. Oznacza to, że modyfikatory pozwalając uzyskać redukcję naprężeń mogą być efektywnymi elementami strukturalnymi. Trudności ich użycia związane są jednak ze skalą. Dla większości pomiarów uzyskany wzrost efektywności był na granicy pomijalności. Oznacza to, że najczęściej modyfikatory mogą stanowić rozwiązanie wspomagające duże

obiekty o wyraźnym stopniu równomierności rozkładu naprężeń, gdzie efektywne będą również porównywalnie małe różnice. Wynik wskazuje, że dowolna lokalizacja pozwoli na zmniejszenie naprężeń dlatego też należy przed kolejnym badaniem określić próg efektywności. Nakłady na przygotowanie modyfikatora, mocowań na powłoce, konserwacja, sterowanie modelem muszą zawierać się w granicy opłacalności co możliwe jest do wyliczenia poprzez analizę nakładów na przygotowanie modelu i porównanie ich z referencyjną statyczna strukturą. Analiza taka stanowi znacznie bardziej miarodajny wskaźnik, niż opisywano to w poprzednich rozdziałach, gdy operuje na rzeczywistych zrealizowanych i przebadanych modelach. Zauważa się największe wzrosty efektywności dla sytuacji nr 5, gdy algorytm ewolucyjny operował również parametrem lokalizacji modyfikatora. W żadnym innym przypadku nie odnotowywano niższych naprężeń maksymalnych. Spadek ten zawierał się w przedziale 8%-21%, co pozwala określić modyfikatory działające w ten sposób jako funkcjonalne. Największe spadki odnotowywano dla największych naprężeń co oznacza, że modyfikator każdorazowo zwiększał jednorodność rozkładu naprężeń. Nie znajduje się jednak na podstawie próby badawczej zależności pozwalającej określić efektywne lokalizacje modyfikatorów. W badaniach ułożenie siły względem modyfikatora cechuje znaczna losowość. Przyjmuje się teorię tłumaczącą zjawisko jako dobór miejsca mocowania modyfikatora, gdzie występują wystarczająco małe naprężenia w odpowiednio małej odległości od punktu przyłożenia siły pozwalające na znaczny lokalny wzrost naprężeń, które rozkładem w formie podobnym do fali oddziałują na maksymalne naprężenia, lecz nie wygenerują naprężeń większych w miejscu występowania modyfikatora. Podobny mechanizm tłumaczy wzrosty efektywności w sytuacji nr 4 dla modyfikatorów znajdujących się w otoczeniu. Zauważono jednak trudności w doborze odpowiedniego punktu mocowania modyfikatora. Zmodyfikowano więc na początku badania model dodając moduł oznaczania grupy elementów skończonych odznaczających się największymi naprężeniami spośród puli całej struktury. W miejscu występowania grupy lokalizowano każdorazowo modyfikator dla sytuacji nr 2 umieszczania „w sąsiedztwie siły punktowej”. Modyfikator każdorazowo odciążał najmocniej wytężony fragment powłoki ujednolicając naprężenia, lecz wywoływał większe naprężenia w dalszym sąsiedztwie przesuwając najbardziej wytężony element z dala od swojej strefy wpływu naprężeń. Daje to podstawy twierdzenia, że najefektywniejsze w redukcji naprężeń mogą być systemy modyfikatorów, a pojedynczy element nie jest w stanie zapewnić odpowiednio złożonej modyfikacji w układach naprężeń struktur powłokowych. Układy „przeciwległe” sytuacji nr 3 dawały na zmianę z oddziaływaniem „na punkt” nr 2 najniższą efektywność. System funkcjonował zgodnie z założeniami, lecz aby podnieść jego efektywność należałoby rozszerzyć jego działanie do postaci modyfikatora liniowego w miejsce punktowego. Lokalizowanie modyfikatora w znacznej odległości od punktu przyłożenia siły wymusza operowanie wyłącznie dużymi deformacjami lub deformacjami na całej linii styku naprężeń od podpór z naprężeniami od siły. Na powierzchni powłoki bardzo łatwo jest wyróżnić poszczególne strefy dlatego też lokalizacja hipotetycznego modyfikatora liniowego mogłaby stanowić zagadnienie inżynierskie. Podczas opisywanych badań jednak nie wykorzystano przedstawianego systemu, a modyfikatory osadzane w sztywno dobranych miejscach nie przyniosły korzyści porównywalnych z innymi metodami umiejscawiania modyfikatorów.

Wskaźnik średnich wartości naprężeń przedstawia tendencję modyfikatorów do podnoszenia energii wewnętrznej całego układu. Struktura powłokowa jako aktywnie wyginana podczas modyfikacji badanymi rozwiązaniami ma trudności w redukowaniu energii wewnętrznej. Dla wszystkich sytuacji średnie naprężenia wzrastają od 4% do 30%. Jest to wartość znaczna, lecz zakłada się znikomy wpływ na parametry trwałości i wytrzymałości ze względu na podnoszenie naprężeń szczególnie w miejscach ich dotychczasowych pomijalnie małych wartości. Oznacza to, że modyfikator, aby być efektywnym aktywuje i włącza do pracy elementy i strefy struktury nie biorące udziału w przenoszeniu sił analogicznego statycznego modelu. Należy jednak zwrócić uwagę, że dla sytuacji nr 5 odnotowano każdorazowo spadek wartości naprężeń średnich. Taki spadek energii układu tłumaczy się przeniesieniem części energii na modyfikator. Wartości redukcji wahają się od 5% do 12%, co pozostaje stałym zakresem zapewniającym każdorazową redukcję. Takie zjawisko ma pozytywny wpływ na

trwałość struktury ponieważ w pierwszej kolejności modyfikator redukuje naprężenia maksymalne oraz ich otoczenie. Oznacza to, że zmniejsza on wytężenie elementów i prowadzi do wydłużenia żywotności poprzez zmniejszenie przeciążeń poszczególnych obszarów powłoki. To daje podstawy twierdzenia, że modyfikatory punktowe stanowią rozwiązanie pozwalające na wydłużenie trwałości otwierając nowy kierunek dalszych badań. Czas reakcji systemu modyfikatorów jest niezerowy co oznacza, że przy każdym przypadku obciążeniowym następuje okres przeciążenia struktury, po którym wywoływana jest reakcja systemu responsywnego i obniżenie maksymalnych naprężeń. Ten opisany we wcześniejszych etapach pracy sposób działania systemu wyklucza badania materiałów o niskiej i średniej elastyczności. Wyłącznie materiały charakteryzujące się dużą sprężystością mogą charakteryzować się wydłużonym okresem użytkowania. Sztywniejsze materiały ze względu na większą sumaryczną pracę i zmiany energii wewnętrznej szybciej ulegną degradacji.



Grafika 32.etapy lokalizacji modyfikatorów na powierzchni powłoki w celu symulacji procesu aktywnego wyginania[13]

Odległości między punktem przyłożenia siły i lokalizacją modyfikatora również analizowane w badaniu pokazują w sytuacjach użycia algorytmu ewolucyjnego brak korelacji między redukcją naprężeń, a dystansem. Implikuje to przedefiniowanie istotności parametrów poszukiwania efektywnych lokalizacji. Priorytetyzowana minimalizacja odległości zgodnie z wynikami badań pozostaje mniej istotna, niż osadzenie modyfikatora w miejscu z którego uzyskuje się największe oddziaływanie na naprężenia maksymalne dla więcej niż jednego przypadku obciążeniowego. Wymusza to dalsze poszukiwanie indykatorów efektywnych lokalizacji modyfikatorów. Zgodnie z opisaną hipotezą wpływów należy skupić się w dalszych badaniach na umieszczaniu systemów w miejscach o największej krzywiźnie wtórnej liczonej według metody krzywizny Gaussa której zasady użycia i potencjalne rezultaty opisywano w [166].

[13] Na prawej grafice widać sposób działania modyfikatora. Zawsze sąsiednie siłowniki mają przeciwne znaki sił oddziaływania na powłokę. Niezachowanie tej zasady wywołuje znaczne momenty zginające. Mogą być one korzystne, lecz należy operować nimi bardzo precyzyjnie. Dlatego też przy znacznych deformacjach i siłach oddziaływania modyfikatora pomija się użycie momentów gnących do redukcji naprężeń na powłoce co tworzy wytyczne modelowania wszystkich połączeń mechanicznych modyfikatora jako przegubowych w co najmniej jednej płaszczyźnie. Pozwoli to uniknąć zginania. Dla 4-punktowego modyfikatora determinuje to możliwość powstania tylko jednego układu naprężeń w sensie jakościowym – naprzemienne ściskanie i rozciąganie w układzie biegunowym. Dla przedstawionego przypadku modyfikator zlokalizowany był „w otoczeniu" punktu przyłożenia siły na styku wpływów podpory i iły zewnętrznej wyróżnionej na mapie naprężeń strefą obojętną reprezentowaną białym kolorem na grafice.

Tabela 11. Zestawienie wyników pomiarów dla struktury referencyjnej oraz przypadku nr 5. Pełne zestawienie wyników stanowi załącznik nr 6.C pracy.

statyczy model referencyjny										
X punkt przyłożenia siły [m]	-11,216	-9,0986	-14,1697	-9,84377	-14,4512	11,38546	10,53098	-0,83061	7,972686	-4,55086
Y punkt przyłożenia siły [m]	9,68102	2,638143	13,78986	-1,30606	3,608207	6,341374	-11,5468	19,23677	12,92136	10,19919
Z punkt przyłożenia siły [m]	-9,42197	14,37489	1,749378	7,231661	-18,3324	1,297286	6,375512	-0,69586	17,87002	-15,0508
siła X [kN]	7,428571	1,428571	2,285714	8,571428	4,571429	3,714286	0,857143	9,428572	0,571429	4,571429
siła Y [kN]	2,285714	8	7,428571	5,714286	2	1,714286	3,142857	5,142857	6	2,285714
siła Z [kN]	3,673469	2,82449	3,673469	3,673469	4,081633	3,755102	2,938776	3,036735	2,938776	4,244898
odległość punktu mocowania	8,852718	1,043686	2,213871	8,359474	7,198612	6,927405	4,624394	9,252081	1,828717	7,017413
naprężenia maksymalne [kNm]	19,59095	17,57517	18,80098	14,896	18,43802	16,86717	17,49916	17,82434	18,99288	16,60785
naprężenia średnie [kNm]	1,54059	1,722506	1,578178	1,149219	1,571591	1,333751	1,484388	1,634122	1,740446	1,521199
strzałka ugięcia [cm]	0,741128	0,9455	0,796157	0,478148	0,814943	0,636781	0,838861	1,070734	1,0866	0,61373
reakcja podpory 1 [kN]	61,15271	69,32611	67,65068	56,50995	63,8282	70,41783	61,11554	66,43785	73,9273	68,98413
reakcja podpory 2 [kN]	69,72541	52,31546	52,72712	58,62058	67,61535	63,93799	71,16359	63,29813	56,62665	66,24779
reakcja podpory 3 [kN]	62,49257	70,57528	67,73439	66,41259	78,77381	59,83189	57,5493	56,88106	56,29604	71,8006
reakcja podpory 4 [kN]	75,87282	48,0696	67,35893	65,90165	71,87241	61,25466	59,45776	72,07621	46,7682	70,49669
punkt dobierany algorytmen ewolucyjnym										
odległość punktu mocowania	11,32203	3,744137	5,033002	10,26309	10,07758	9,825974	9,120037	11,0323	10,32831	9,921054
naprężenia maksymalne [kNm]	13,99061	15,00803	14,19099	14,41503	17,91456	16,34402	16,56176	16,21196	13,45464	15,31725
naprężenia średnie [kNm]	1,494614	1,65039	1,513981	1,099265	1,514272	1,299558	1,530596	1,578576	1,711725	1,464827
strzałka ugięcia [cm]	0,677561	0,857514	0,712428	0,432917	0,766987	0,696194	0,859027	1,019199	1,0631	0,511749
reakcja podpory 1 [kN]	60,45323	68,04875	66,48865	55,30987	62,52017	69,10552	61,62111	65,11659	74,57135	67,66942
reakcja podpory 2 [kN]	70,45318	53,64243	53,93438	59,8793	68,98522	65,31258	70,53214	64,666	56,09095	67,62134
reakcja podpory 3 [kN]	61,79193	69,2977	66,57257	65,20962	77,45754	58,52657	58,05959	55,57086	56,84842	70,48103
reakcja podpory 4 [kN]	76,7066	49,59828	68,74347	67,3369	73,43709	62,81759	58,92459	73,64735	46,2312	72,06548
teleskopowanie 1 ramienia [m]	0,03923	0,04177	0,038	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,00178	0,1
teleskopowanie 2 ramienia [m]	0,00171	0,08082	0,05579	0,00653	0,0116	0,09643	0,00103	0,1	0,032569	0,1
teleskopowanie 3 ramienia [m]	0,00119	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,099996	0,1
teleskopowanie 4 ramienia [m]	0,1	0,1	0,08518	0,08518	0,1	0,1	0,1	0,1	0,035269	0,1
siła na siłowniku 1 [kN]	15,29727	28,757	20,3475	32,84732	31,90951	38,92061	9,827019	39,16537	18,07793	39,16537
siła na siłowniku 2 [kN]	16,46121	36,71434	21,43353	13,75814	14,83406	41,74074	30,44543	43,0115	12,95748	43,0115
siła na siłowniku 3 [kN]	12,51031	32,5012	43,4761	31,89538	34,66124	24,85238	51,72213	24,54164	33,81597	24,54164
siła na siłowniku 4 [kN]	31,78623	47,19231	29,61452	37,19704	40,22203	49,96587	27,742	50,30619	17,84099	50,30619

Mimo, że jej minimalizacja nie stanowiła celu modyfikacji, strzałka ugięcia była parametrem stale odnotowywanym. Dla wszystkich przypadków referencyjnych powłoki niewyposażonej w modyfikatory przyjmowała wartości zawierające się w zakresie odkształceń sprężystych, nie zbliżając się do granicy określonej w sposób uproszczony dla materiału wykazującego cechy jednorodności. Z tego też powodu do pierwotnego algorytmu modyfikacyjnego nie stosowano sztucznych ograniczeń maksymalnych ugięć. Podczas wszystkich badań zauważano bardzo proporcjonalny spadek wartości ugięcia przy redukcji naprężeń, lecz dla każdej z 5 sytuacji korelacja ta przyjmowała inny współczynnik proporcji co zauważalne jest w zestawionych wynikach przedstawionych w Tabela 11. Różnica ta zauważalna jest równie wyraźnie w wynikach stanowiących załącznik do badań. W badaniach referencyjnych strzałka ugięcia przyjmowała wartości w zakresie 0,48cm do 1,09cm tworząc drugi najszerszy zakres wartości zaraz po scenariuszach „na punkcie". Dla wszystkich pozostałych scenariuszy zakresy te były proporcjonalnie mniejsze od uzyskiwanych wartości. Najbardziej ujednolicone wartości uzyskano w scenariuszu z użyciem algorytmu ewolucyjnego. Należy zwrócić uwagę, że w badaniu referencyjnym bez modyfikatora uzyskiwano kilkukrotnie ugięcie mniejsze niż podczas pracy badanego systemu. Gdy modyfikator montowano w miejscu o znacznych wartościach naprężeń powłoki i poddawano ją w wyniku pracy modyfikatora zginaniu zmieniającemu charakter naprężeń dokonywano znacznej deformacji struktury mimo uzyskiwania naprężeń o wartości bezwzględnej minimalnie mniejszej niż wartość referencyjna. Ten model zachowania tłumaczy wstępowanie większych wartości strzałki ugięcia. Z kolei dla scenariusza wykorzystującego algorytm każdorazowo uzyskiwano znacznie mniejszą strzałkę ugięcia. Argumentuje to teorię mówiącą o zasadności lokalizacji modyfikatorów w miejscu występowania maksymalnych ugięć. Jednocześnie konsolidując wyniki strzałki z naprężeniami uwidocznieniu podlega sposób oddziaływania modyfikatorów na strukturę, wywołując lokalną redukcję ugięć i globalną

redukcję naprężeń. Daje to podstawy formułowania dalszych modeli zachowań algorytmów lokalizacji modyfikatorów. Spośród wszystkich badanych scenariuszy przypadki używające algorytmu ewolucyjnego charakteryzowały się największą pewnością uzyskania efektywnych wyników.

Model wyposażony jest w 4 podpory zlokalizowane w narożach. Są one sztywno połączone z powłoką i przenoszą dowolnie duże siły reakcji na symulowane idealnie sztywne podłoże. Badano, czy i w jakim stopniu użycie modyfikatora wpłynie na redystrybucję naprężeń i zmianę wartości reakcji podporowych. Podczas badań dążono do wzrostu ujednolicenia sił podporowych wpływających na maksymalne naprężenia. Zauważa się, że dla każdego przypadku w każdym scenariuszu wpływ ten był odnotowywalny, lecz rzadko wykraczał poza granicę błędu pomiarowego. W scenariuszu referencyjnym wszystkie reakcje miały zbliżone wartości. W wyniku działania modyfikatora często zmianie ulegała najbardziej wytężona podpora. Wartość pozostawała zbliżona, lecz zamianie uległy wartości często przeciwległych podpór. Szczególnie zauważa się opisywane zjawisko dla scenariusza „przeciwległego" nr 3. Modyfikator tym wyraźniej redystrybuuje siły im bliżej jednej z podpór jest zlokalizowany. Dla pojedynczego modyfikatora zjawisko to pozostaje pomijalnie małe, lecz zakłada się wzrost istotności do efektywnych wartości w przypadku użycia systemu większej liczby modyfikatorów.

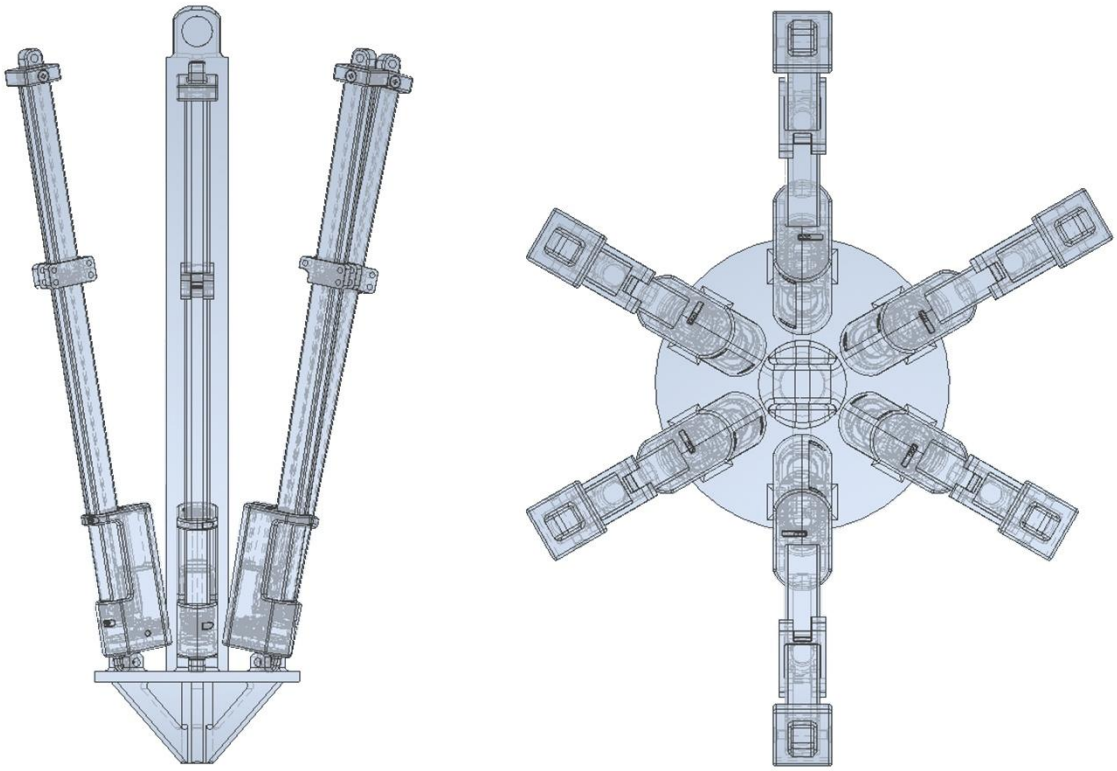
Zakresy teleskopowania oraz naprężenia występujące na siłownikach zebrano wraz z pozostałymi danymi w układach tabelarycznych osobno dla każdego scenariusza. Zakres teleskopowania wynosił do 3cm w każdym kierunku. Nie uwzględniano wyboczenia siłowników co znacznie upraszczało symulację i analizę. Zauważa się, że dla różnych scenariuszy uzyskiwano różne zakresy efektywne pracy siłowników. Największy przedział wartości wysuwu lub skrócenia odnotowano dla scenariusza" modyfikatorów lokalizowanych przeciwlegle do punktu występowania siły. Aby uzyskać wpływ na naprężenia w innej części struktury deformacje musiały osiągać znaczne wartości. Często dla przypadków scenariusza osiągano wysuw graniczący z limitem 1cm. To z kolei wywoływało proporcjonalne siły wewnętrzne równoważone przez samą powłokę. Maksymalne naprężenia osiągające wartości ponad 650MPa wskazują na zasadność prowadzenia symulacji nieliniowych. Wyłącznie dla scenariuszy z algorytmem ewolucyjnym zakres zmienności jest znacznie mniejszy. Większość sił i długości teleskopowania jest o rząd wielkości mniejsza od przypadków w pozostałych scenariuszach. Model nie wymagał użycia teleskopowania o wartość większą niż 0,1cm w każdym kierunku co z kolei implikuje konieczność używania siłowników o odpowiedniej dokładności działania. Dla scenariusza tego jednak maksymalne naprężenia proporcjonalnie do teleskopowania są mniejsze i wynoszą do 51MPa. Pozwala to operować w zupełnie innej skali materiałów. Możliwe jest korzystanie z rozwiązań mechatronicznych bez konieczności operowania wyłącznie w skali architektonicznej. Dobrze przebadaną technologią dostępną powszechnie do wykorzystania mogą być aktuatory piezoelektryczne opisywane w [167] odznaczające się innym charakterem pracy, znacznie mniejszym zakresem działania choć wystarczającym na potrzeby scenariusza, lecz również szybką reakcją w formie ruchu. Implementacja takiego rozwiązania nie została jednak dotychczas przebadana i wymaga badań elementarnych potwierdzających satysfakcjonujący poziom skuteczności.

Na podstawie sumy sił przekazywanych na powłokę przez siłowniki wyznaczano wypadkową sił. Sumowano osobno siły na parzystych i nieparzystych siłownikach. Następnie wyniki odejmowano wzajemnie uzyskując wypadkową, która była w pełni równoważona przez rdzeń modyfikatora. Osobnym zagadnieniem pozostaje wytrzymałość powłoki. Punktowe oddziaływanie modyfikatorów sprzyja występowaniu zjawiska perforacji materiału. Jest to zjawisko nagłe mogące nie dawać sygnałów strukturalnych o przekraczaniu dopuszczalnych sił punktowych. Trudność w zapobieganiu wystąpieniu zjawiska indukowana jest możliwością występowania mikropęknięć i imperfekcji wykonawczych znacznie obniżających wytrzymałość na opisywane zjawisko. Wymusza to pogłębione analizy ciągłości materiału z jakiego wykonana na potrzeby walidacji zostanie powłoka analogicznie do metodologii opisywanej w [168].

6.2.6 Modelowanie modyfikatora oraz ewaluacja jego działania

6.2.6.1 Kształtowanie elementów ruchomych

Badania zachowań powłoki odnoszące się do jej zachowania w makroskali wyznaczają wymagania fizyczne, statyczne i dynamiczne dla modelu modyfikatora poprzez określenie warunków brzegowych pracy modelu. Jego kształt i dobór połączeń oraz materiałów należy dobrać na podstawie analiz doświadczalnych lub symulacyjnych. Przyjęto, że dla prostej motoryki i sposobu działania, który daje się sprowadzić do skwantyfikowanych pozycji statycznych wystarczające będą symulacje nieliniowe MES. W celu zamodelowania



Grafika 33.Model modyfikatora wraz z 6 siłownikami oraz rdzeniem centralnym. Model opracowany w programie Autodesk Inventor 2024.

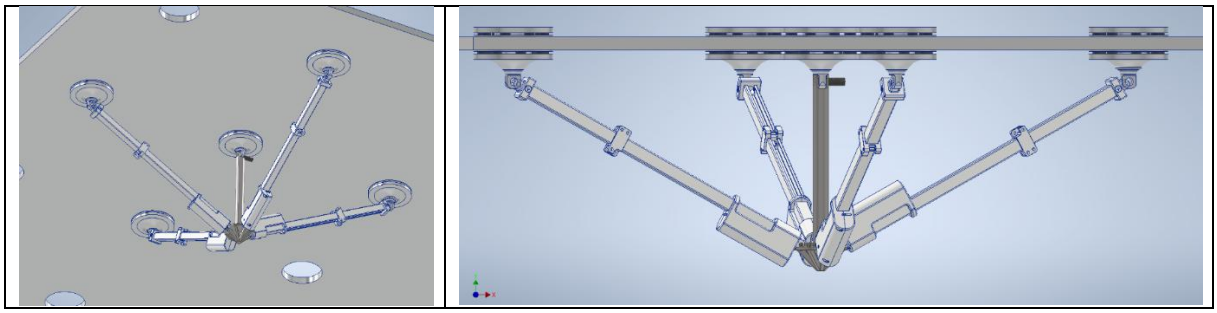
modyfikatora wykorzystano oprogramowanie Autocad Autodesk 2024, gdzie wykonano modele wszystkich elementów, lecz bez uwzględnienia dokładności i wykończeni elementów. Następnie przeniesiono wszystkie elementy modelu do programu Autodesk Inventor Professional 2024 gdzie nadano właściwości materiałowe wszystkim modelom modyfikatora. Jego ostateczną formę przedstawiono na Grafika 33. Zgodnie z warunkami ustalonymi dla pierwszej symulacji modyfikator składa się z rdzenia oraz 4 siłowników. Rdzeń pozwala na podłączenie do 8 teleskopowanych elementów, określono dla niego jako materiał stal S235. Zakończony jest łącznikiem obrotowym dla śruby utrzymującej połączenie z mocowaniem na powłoce. W dolnej części wyposażony jest w tarczę ze wspornikami, na której promieniście rozłożone są mocowania siłowników. Grubość tarczy i wymiary wsporników dobrano tak, aby dla kątów nachylenia siłowników między 30 stopni względem podłoża, a 75 stopni skutecznie zabezpieczać strukturę przed skręceniem modyfikatora. Zgodnie z warunkami symulacji opracowano połączenia zachowujące stopnie swobody. Wszystkie siłowniki łączone są w sposób umożliwiający obrót w jednej płaszczyźnie pionowej przechodzącej przez oś rdzenia.

Szacowany przedział długości siłowników jakie mogą współpracować z modyfikatorem zawiera się między 1,05m, a 1,85m. Granice przedziału wynikają z kątów powstających między siłownikiem a tarczą rdzenia. Dla każdego kąta w określonym przedziale połączenia mogą przenosić pełne spektrum sił rozciągających jak i ściskających. Wszystkie siłowniki po stronie teleskopowanej zakończone są w sposób analogiczny do rdzenia pozwalając na

swobodę zmiany kąta nachylenia aktuatora. Model waży 15,3 kg i mierzy 1,03m wysokości. Tarcza ma średnicę 22cm, a dla minimalnego kąta rozwarcia siłowników ich teleskopowane mocowania rozłożone są na okręgu o średnicy 38cm.

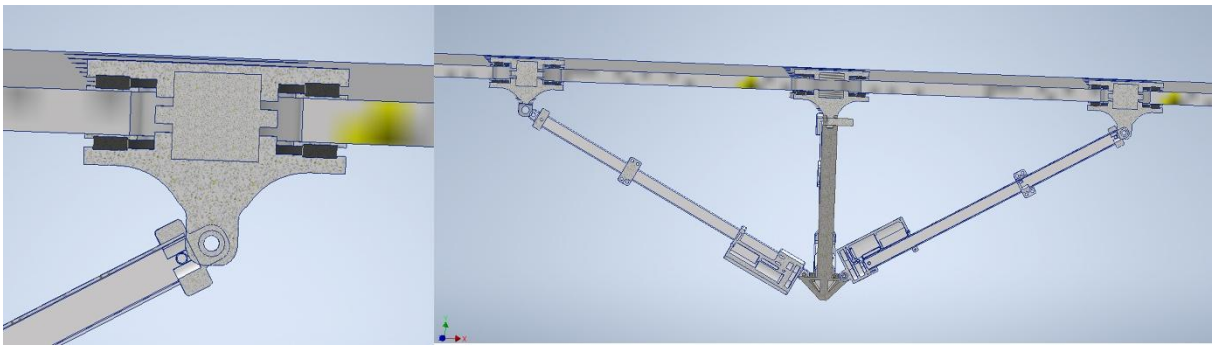
6.2.6.2 Kształtowanie połączenia modyfikatora z powłoką

Ze względu na skalę przenoszonych sił istnieje ryzyko perforacji materiału powłoki o zbyt niskiej wytrzymałości. Zakłada się połączenie rozbieralne wielokrotnego użytku, dlatego też w celu przenoszenia sił o dowolnym charakterze należy założyć perforację powłoki w miejscu wystąpienia łączników. To z kolei wymusza opracowanie sposobu rozkładania naprężeń z połączeń na większą powierzchnię struktury. Rozkład nie tylko powinien zapewniać maksymalną powierzchnię styku, lecz również możliwość zachowania równoległości i tym samym efektywności styku podczas zmian kąta między powłoką, a siłownikiem. Każda perforacja w miejscu połączenia szczególnie dla materiałów izotropowych, z których możliwe jest wykonanie powłoki generuje zagrożenie nagłego zniszczenia powłoki poprzez uplastycznienie struktury ciągłej, które wystąpi najpierw prostopadle do krawędzi otworu i wywoła jego nagłą propagację w kierunku drugiej najbliższej perforacji. W celu uniknięcia tego zjawiska należy całkowicie odciążyć otwór przenosząc wszystkie naprężenia bezpośrednio na zewnątrz jego otoczenia, na materiał powłoki, skąd dystrybucja naprężeń odbywać się będzie w kierunku zewnętrznym.



Grafika 34. Model siłownika 5-punktowego połączonego z powłoką. Przedstawiono sposób wykorzystania łączników rozkładających naprężenia. Model opracowano w programie Autodesk Inventor Professional 2024 i stanowi załącznik nr 6.E pracy.

Drugim zagadnieniem opisywanym w pracach [65], [68], [125] jest wpływ drgań elementów ruchomych na powłokę. W przywołanych pracach zwracana jest uwaga, że teleskopowanie siłowników w zakresie częstotliwości modalnej ze względu na mniejsze wymagania energetyczne na realizację ruchu i szczególnie podczas podnoszenia energii potencjalnej struktury jest wydajne pod względem nakładów na ruch, niemniej jest to założenie prawdziwe dla struktur dyskretnych, gdzie stopień sztywności pozwala na uzyskanie wpływu drganiami na strukturę. Dla modelu powłoki symulowanej jako monolityczny jednomateriałowy element założenie to nie jest prawdziwe. Drgania jak opisano w [53] stanowią niepożądane zjawisko, które należy możliwie redukować. Oznacza to, że struktury ciągłe należy modelować tak, aby zakres częstotliwości modalnych znajdowały się bezpiecznie poza skalą drgań wywoływanych zwykłą pracą struktury. W programie Grasshopper dla zamodelowanej powłoki dodano modyfikator perforacji w odstępach 30cm między kolejnymi otworami w siatce kwadratowej na całej powierzchni jak przedstawiono to na Grafika 34. Następnie podłączono moduł obliczania częstotliwości modalnej. Wartość mieściła się w zakresie 1,52-7,04 Hz. Jest to zakres w jakim zakłada się operowanie siłownikami modyfikatora. Niezerowa część wspólna obu przedziałów częstotliwości drgań oznacza, że konieczne jest opracowanie sposobu tłumienia wibracji. W tym celu wszystkie systemowe połączenia modyfikatora z powłoką opracowano w formie sprzęgła z tłumikiem drgań. Pozwala ono na modyfikację sztywności połączenia, dając możliwość modyfikacji drgań wywoływanych pracą modyfikatora.



Grafika 35. Przekroje przez łącznik. Widoczna jest śruba środkowa pozwalająca na uzyskanie sprężenia połączenia.

Siłownik z tłumikiem połączony jest w sposób łożyskowany obrotowy w jednej płaszczyźnie. Obliczenia nośności na rozciąganie wykazały, że dla śruby M10 zachowany jest bezpieczny zakres wytrzymałości. Łożysko połączenia jest częścią wspólną z wiekiem spodnim połączenia z powłoką. Nakładane jest ono na otwór w powłoce, następnie przez otwór wkręcana jest dwustronna śruba M30 symetryczna z półką pośrodku. Wkręcana jest do uzyskania oporu i trwałego połączenia. Następnie na jej wierzchnią część od drugiej strony otworu w powłoce nakładane jest wieko górne, po czym zostaje dokręcone do uzyskania sprężenia na obwodzie otworu. Sprężenie uzyskiwane jest odpowiednim dociśnięciem blach pierścieniowych do struktury poprzez skręcenie obu wiek. Każde wieko po obwodzie ma 8 żłobień na osadzenie tłumików gumowych lub sprężynowych. Te na potrzeby symulacji zostały zamodelowane jako poliwęglan obłożony 3mm gumy z każdej strony. Pozwala to na uzyskanie miękkiego przeniesienia momentów zginających przy stałym równomiernym nacisku na powłokę podczas zmian kątów nachylenia siłowników. Opisany tłumik znajduje się z obu stron otworu tworząc połączenie siłownik-powłoka jako 16 półsprężystych klocków przekładek. W celu zwiększenia równomierności przeniesienia sił i naprężeń podkładki połączone są stalowym pierścieniem o grubości 5mm. On dalej bezpośrednio styka się z powłoką. Opisany łącznik przedstawiono na Grafika 35.

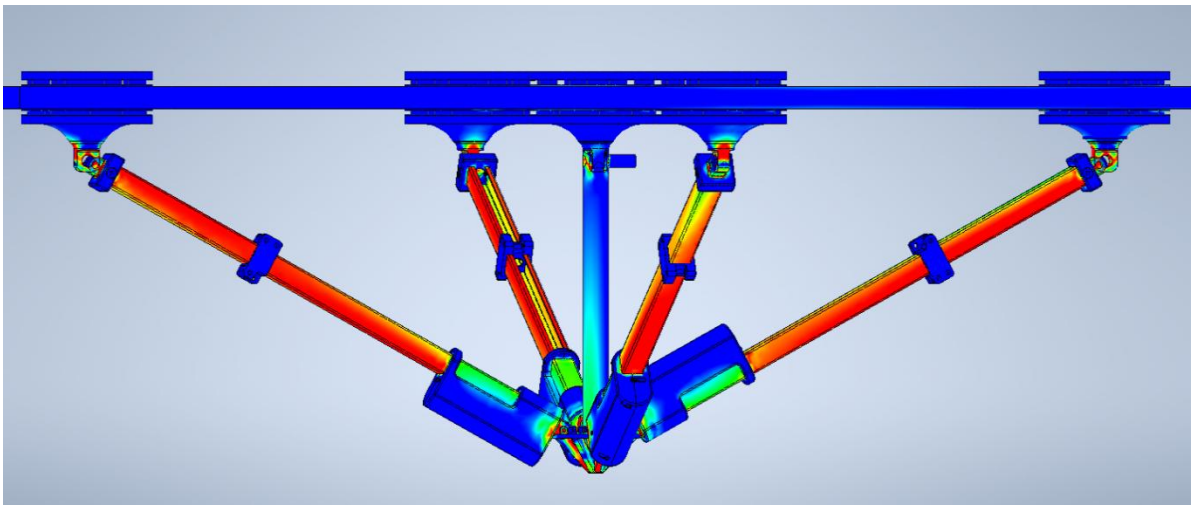
Poprzez zastosowane rozwiązanie model ma znacznie zmniejszyć amplitudę drgań oraz wyprowadzić ich częstotliwości poza zakres częstotliwości modalnych powłoki. Sprawia to jednak, że interfejs modyfikator-powłoka nie jest idealnie sztywny jak miało to miejsce w symulacji ogólnej. Zakłada się, że stopień sprężystości materiału liczony jako moduł Younga równy E=2,27MPa wymusza zwiększenie zakresu teleskopowania siłowników z 1cm do 9cm, aby zachować maksymalne wartości oddziaływania modyfikatora na strukturę. Jednocześnie zmiana sztywności połączenia sprawia, że siły nie będą transmitowane przez interfejs połączenia w sposób nagły, lecz narastający, bardziej obojętny dla modelu. Szacuje się zmniejszenie zużycia połączeń. Oznacza to jednocześnie budowanie biblioteki zachowań modyfikatora wyłącznie w oparciu o wymagane do uzyskania siły osiowe siłowników, bez wykorzystania informacji o długościach teleskopowania, które mogą uzyskiwać zróżnicowane wartości przy zastosowaniu zróżnicowanych twardości interfejsów powłoka-mocowanie. Wymusza to dla fizycznej realizacji modyfikatora stosowanie czujników nacisku umieszczanych wzdłuż siłowników.

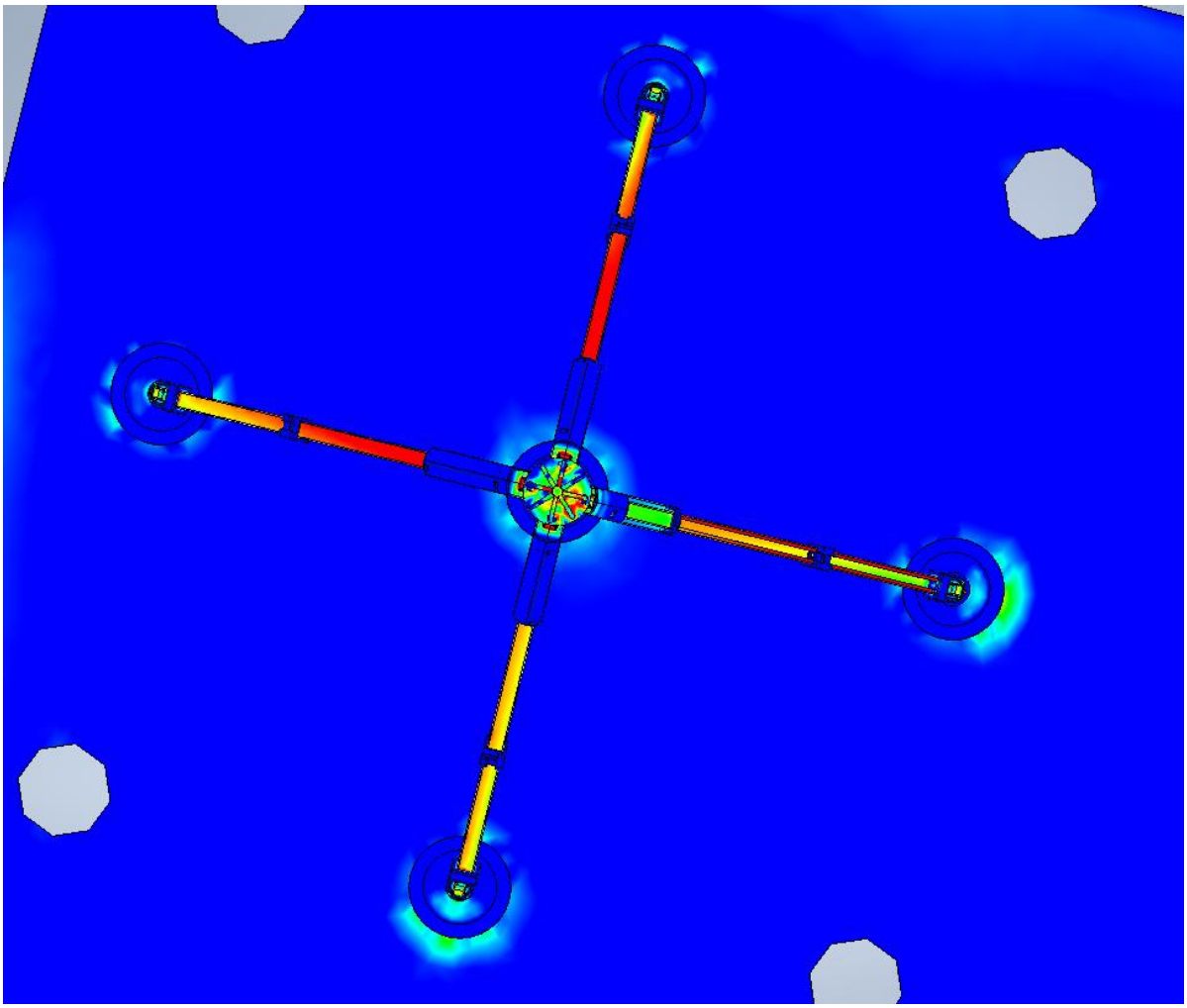
6.2.6.3 Badania oraz geometryczna analiza modyfikatora

W celu wyznaczenia granicy wytrzymałości i scenariuszy zniszczeń modyfikatora w celu określenia stopnia bezpieczeństwa jego użytkowania przeprowadzono badania symulacyjne. Zamodelowany w Inventor Professional 2024 Autodesk modyfikator połączono na potrzeby symulacji z modelem perforowanej powłoki. Do badania wykorzystano 4-siłownikową wersję modyfikatora określaną również jako 5-punktową. Badanie przeprowadzono z wykorzystaniem dostępnej w programie nakładki analizy MES. Wykorzystano moduł analizy nieliniowej ze względu na spodziewane znaczne odkształcenia modeli. W analizie uwzględniono stopnie swobody wszystkich elementów i połączeń oraz

ciężar własny struktury. Model modyfikatora osadzono na płaskiej formie powłoki, która stanowi wyekstrahowany fragment większej powłoki. Dlatego też usztywnienie zdefiniowano wszędzie po obwodzie modelu struktury. Dalej zamodelowano połączenia mocowań z powłoką. Zgodnie z opisem ich działania stanowią połączenie sprężane o sile ścisku 2kN na środkowej śrubie symetrycznej sprężającej. Sprężenie to nie zostało zdefiniowane bezpośrednio, lecz poprzez dobranie parametrów tarcia między materiałami przy zadanym docisku. Określono współczynnik tarcia jako równy 0,62. Wartość została wyznaczona na podstawie interpolacji między wartościami tarcia drewna o drewno oraz stali o stal (0,48 i 0,75). Zakłada się pełną sprawność połączenia co upraszcza analizę wyłącznie do tarcia statycznego. Podczas badania nie są uwzględniane procesy starzenia materiałów, które dla gumy i analogicznych elastycznych materiałów będą miały wpływ dopiero na wyniki badań trwałości. Model podzielono na elementy skończone generując siatkę elementów złożoną z 2 063 463 elementów oraz 1 420 762 węzłów. Siatka bazowa o regularnym układzie elementów jednakowej wielkości musiała zostać poddana modyfikacjom ręcznym w celu podniesienia dokładności obliczeniowej szczególnie w miejscach otworów, zagięć i występowania cienkich ścian materiału. Do modelu modyfikatora przyłożono siłę osiową wzdłuż osi rdzenia skierowaną w dół o wartości 1000N. Siła ta zgodnie ze zdefiniowaną sztywnością rozkłada się regularnie na wszystkie siłowniki. Po przygotowaniu modelu przystąpiono do symulacji deformacji modelu badawczego i obliczeń naprężeń zredukowanych. Generowanie wyniku zajęło 4minuty 20sekund po czym uzyskano pełny raport z analizy z uwzględnieniem naprężeń oraz odkształceń.

6.2.6.4 Wyniki badania modyfikatora

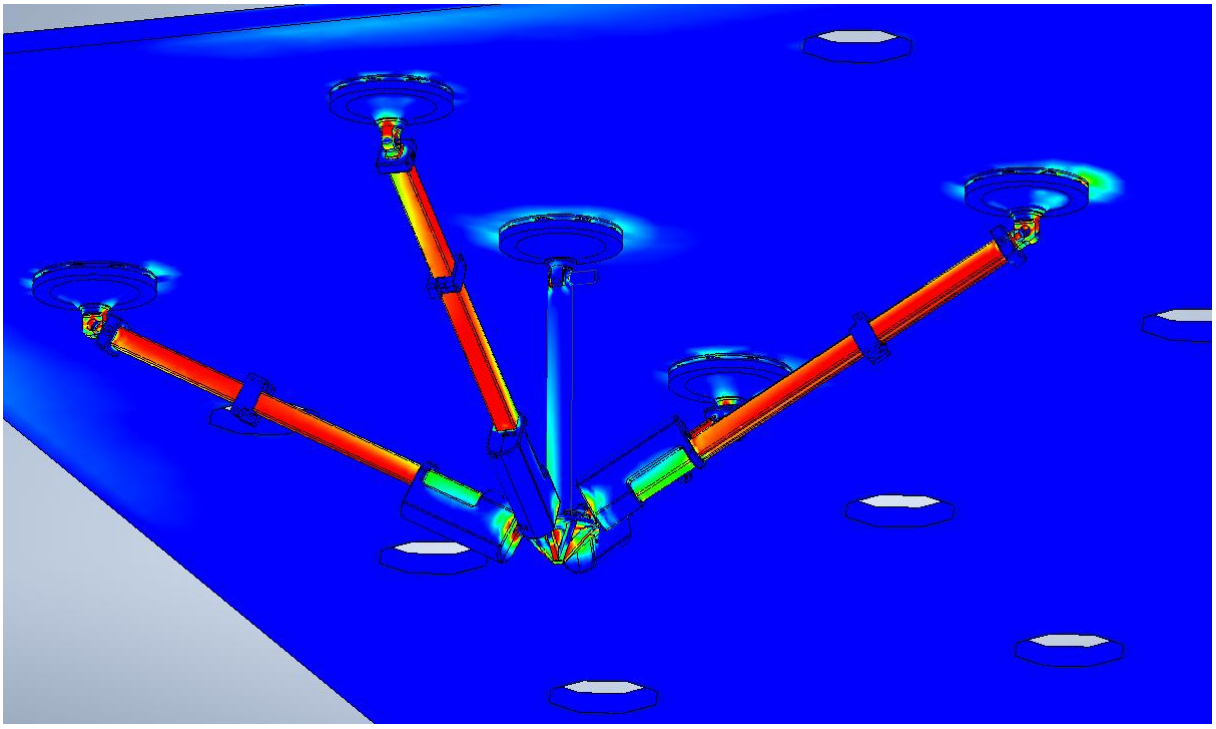




Grafika 36.Analiza MES wykonana na pojedynczym modelu modyfikatora przedstawia niejednorodność naprężeń na powierzchni siłowników. Analiza przeprowadzona z wykorzystaniem oprogramowania Autodesk Inventor Nastran.

Wyniki badania przedstawiono w formie graficznej na Grafika 36. Wszystkie prezentowane mapy naprężeń przedstawione są dla naprężeń Von Misses w skali od 0MPa do 3,5MPa. Maksymalna wartość naprężeń odnotowana w modelu wynosi 12,3MPa i przypada na połączenie między łącznikiem powłoki, a siłownikiem. Łożysko w tym miejscu jest zamodelowane jako wąskie wywołując duże naprężenia przy stosunkowo małych wartościach sił. Wartość maksymalna w tym miejscu jest w znacznym stopniu zależna od długości rdzenia i tym samym kąta między siłownikiem oraz powłoką. Połączenie to nie jest wystarczająco odporne na zginanie, aby pozwalać na uzyskanie maksymalnych sił osiowych siłowników jakie wyznaczono w badaniach w oprogramowaniu Grasshopper. Dopuszczalny stopień wytężenia materiałów modelu pozwala na przyłożenie do modelu badawczego maksymalnej siły o wartości 26,3kN. Siły takie pozwalają na efektywne operowanie powłokami elastycznymi

wykonanymi z drewna lub pochodnych rafinacji, lecz dla badanej stalowej powłoki wartość ta jest zbyt niska.



Grafika 37. Aksonometryczny widok wyników graficznych analizy MES. Strefy wokół punktów mocowania modyfikatora do powłoki charakteryzują się niskimi naprężeniami.

Drugim najmocniej wytężonym elementem modyfikatora jest teleskopowana śruba. Ze względu na swoją smukłość i wykonane z profili cienkościennych odznacza się naprężeniami na poziomie 4,18kN przedstawionymi kolorem czerwonym na Grafika 37. Jest to wartość znacznie niższa, lecz pierwsze mikropęknięcia, bądź utrata osiowości śruby siłownika może nastąpić szybciej niż zerwanie mocowania. Połączenie samo nie będzie więc wzmacniane przez sztywność śruby, co pozwala na wnioskowanie wystąpienia potencjalnie dwóch alternatywnych scenariuszy zniszczeń. Pierwszym byłoby wygięcie połączenia z powłoką i wyrwanie łożyska z wieka spodniego mocowania powłoki. Drugim byłoby wyboczenie siłownika. Nie jest możliwe zredukowanie długości wyboczeniowej odmiennymi warunkami podporowymi ponieważ na podstawie analizy jej uplastycznienia należy zakładać brak jakichkolwiek form usztywnień na końcach siłownika. To znacząco zmniejsza nośność modyfikatora. Wytrzymałość zmniejsza się tym bardziej im dłuższy jest wysuw siłownika. Efektywne więc ze względu na wytrzymałość mogłoby być operowanie siłownikami w ich dolnym przedziale wysuwu tak aby maksymalne skrócenie siłownika pokrywało się z maksymalnym wymaganym skróceniem w symulacji.

Znaczne naprężenia wystąpią również na wspornikach talerza rdzenia modyfikatora. Ażurowe ustawione pod kątem zbliżonym do kąta pracy siłowników poprzeczki schodzące się do rdzenia od spodniej strony odznaczają się trzecią najwyższą wartością naprężeń równą 2,31MPa. Naprężenie to występuje w miejscu styku wszystkich 8 poprzeczek. Jest to naprężenie ściskające o bezpiecznym zakresie wartości. Grubość elementów zapobiega wystąpieniu zjawiska skrzywienia rdzenia lub zwichrzenia poprzeczek. Pozostałe naprężenia pozostają w zakresie błędu pomiarowego. Na powierzchni styku łączników z powłoką naprężenia osiągają wartości nieprzekraczające 0,9MPa co pozwala na bardzo efektywny rozkład naprężeń na element ciągły. Wyniki analizy potwierdzają poprawność opracowania modelu połączenia jako spełniającego wszystkie zakładane funkcje. Modyfikator w analizowanym przypadku siły o wartości 1000N umożliwił odgięcie powierzchni powłoki o 0,2cm w punkcie szczytowym, a wartość deformacji >0,1cm pozwolił uzyskać na powierzchni

okręgu o średnicy 50cm wokół mocowania rdzenia. Wartość ta w odniesieniu do poprzednich badań prezentujących między innymi wymagany zakres odkształceń struktury świadczy o wystarczającej nośności i skuteczności pracy modyfikatora.

6.2.7 Wnioski

Wyniki badań prezentują bardzo wysoką skuteczność działania modyfikatora, który przy uwzględnieniu zmian najsłabszych elementów jakie zostały przedstawione spełniać będzie stawiane na początku wymagania co do skali zmienności struktury ciągłej, wytrzymałości i bezpieczeństwa użytkowania. Modyfikacja wysokości modyfikatora powinna być analizowana w oparciu o materiał powłoki. Dla sztywniejszych materiałów wysokość modyfikatora powinna być większa, a maleć powinna dla elastyczniejszych struktur. Dobór układu perforacji na powłoce musi być opracowywany w oparciu o minimalizację wpływu na całkowitą wytrzymałość struktury oraz wielkość modyfikatora, który podlega zjawisku wyboczenia siłowników. Zakres optymalnych rozstawów perforacji powinien stanowić opracowanie osobnych badań. Przebadane symulacyjnie tłumiki nie wykazywały tendencji do przeciążeń, zniszczenia lub nagłego zerwania dlatego też ocenia się je jako wystarczające na potrzeby poprawnej pracy modyfikatora, niemniej w ciągu dalszych prac należy przebadać alternatywne formy tłumienia lub materiały pozwalające uzyskać redukcję drgań. Dla przebadanego przypadku obciążeniowego model ogólny i szczegółowy wykazują dużą zbieżność wyników prowadząc do podobnych form geometrycznych uzyskiwanych w wyniku odkształcenia. Dla podobnych skal sił na poszczególnych siłownikach uzyskiwane są analogiczne naprężenia. Niewystarczającym stopniem badań charakteryzuje się jednak nadal użycie większej liczby modyfikatorów jednocześnie. W trakcie dalszych badań przeprowadzone zostaną analizy potencjału wykorzystania systemów modyfikacyjnych w miejsce pojedynczych modyfikatorów.

6.3 Systemy modyfikatorów punktowych – koncepcje oraz symulacje

6.3.1 Wstęp

Dowiedziono, że dla przebadanych przypadków modyfikatory punktowe mogą być efektywne, szczególnie przy spełnieniu wymagań pracy i wytrzymałości. Zauważono jednak potrzebę precyzyjniejszego operowania geometrią modelu ciągłego w celu zwiększenia wpływu na punktowe naprężenia. Zmiana geometrii może pozwalać na działanie dwutorowe. W pierwszym przypadku odpowiada na ugięcia wywołane obciążeniami zewnętrznymi. W drugim przyjmuje charakter prewencyjny zwiększając sztywność struktury poprzez zmianę geometrii zmniejszając odkształcenia, które pojawią się w momencie przyłożenia siły. W obu przypadkach do rozwiązania problemu można wyznaczyć dualistyczne podejście. Punktowe pojedyncze modyfikacje odpowiednio zlokalizowanym modyfikatorem zgodnie z przeprowadzonymi badaniami pozwalają na uzyskanie wymiernych zysków rozumianych jako zmniejszenie odkształceń. Z kolei skoordynowane działanie szeregu modyfikatorów może pozwolić na uzyskanie precyzyjnej geometrii kompensującej bardziej złożony układ sił zewnętrznych lub niwelujący odkształcenia powłoki o skomplikowanej geometrii. Modyfikatory systemowe powinny bazować na tych samych założeniach fizycznych co jednostkowe. Muszą pozwalać na ściskanie i rozciąganie, stale ścisłe połączenie z powłoką i tłumienie drgań. Powinny jednak również charakteryzować się pewnymi cechami koordynacji ruchu. Większa liczba modyfikatorów pozwala na liniowe zginanie powłoki znacznie zaburzając jej pracę. Odpowiedni układ modyfikatorów pozwala na dwukierunkowe zginanie liniowe oraz bardziej kompleksowe układy tworzące formy przeplotów modyfikatorów. Sama możliwość przecinania elementów ruchomych musi podlegać badaniom skuteczności. Analizie podlega efektywna liczba modyfikatorów lub sama metoda wyznaczania liczby, ponownie fizyczne warunki brzegowe jak i sposób łączenia modyfikatorów z powłoką. Wymagana jest analiza odpowiednich sposobów planowania ruchu. Teleskopowanie może generować różne wyniki

geometryczne lub inną historię zmian naprężeń zależnie od kolejności pracy siłowników prowadząc do powstawania lub niwelowania potencjalnych pików wartości. Dobór odpowiedniego sekwencjonowania powinien stanowić część osobnego opracowania nie poruszanego w elementarnych badaniach na jakich skupiona jest praca. Należy ponownie zbadać potencjał redukcji naprężeń i ugięć. Głównym zagadnieniem badawczym pozostaje jednak nadal sposób lokalizacji i zarządzania teleskopowaniem systemów. Szersza pula ruchów pozwala na bardziej złożone sterowanie powłoką, lecz jest ściśle związana ze stopniem zależności parametrów ruchu jak proporcje teleskopowania poszczególnych siłowników, czy kolejność ich pracy. Przekłada się to ostatecznie na konieczność przeprowadzenia dłuższych badań parametrów w celu zwiększenia prawdopodobieństwa wyszukiwania kompleksowych zachowań całego systemu. Ramy czasowe i ilościowe badań muszą zostać dobrane eksperymentalnie ze względu na brak referencyjnych badań o odpowiednim stopniu podobieństwa badanego zagadnienia.

6.3.2 Koncepcja ruchu i koordynacji

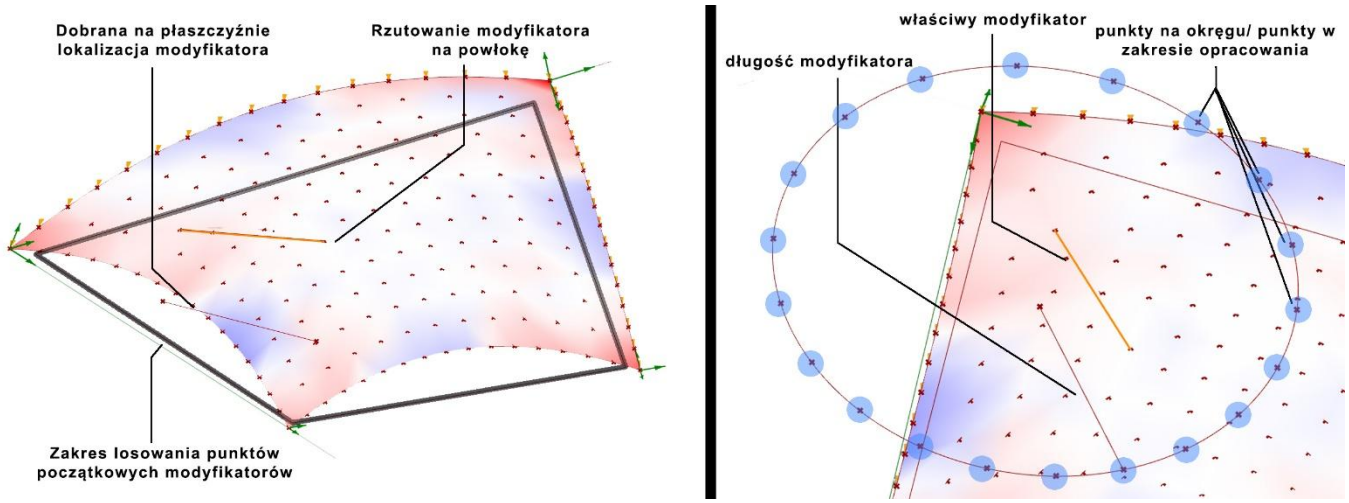
Modele systemowe ze względu na zakładaną liczbę minimum kilku modyfikatorów współpracujących jednocześnie powinny mieć możliwie prostą budowę. Sposób działania modyfikatora powinien być odmienny od dotychczas przebadanego. Musi się on składać z pojedynczego siłownika o adaptacyjnym połączeniu z powłoką. Dopiero użycie większej liczby teleskopowanych elementów ma pozwalać na wzrost stopnia skomplikowania uzyskiwanych geometrii. Liczba modyfikatorów wzrastać może z dwóch głównych powodów wykonawczych. Pierwszym jest stopień złożoności układu topologicznego siłowników wymaganego do ruchu strukturą. Drugi natomiast odnosi się do uzyskania sztywności na dłuższych prostoliniowych odcinkach , gdzie niemożliwe jest użycie pojedynczego długiego siłownika. Należy określić maksymalną długość jednego elementu równą 1,5m lub 5 długości między punktami mocowania. W celu uzyskania sztywności na długości prostego odcinka przekraczającego ten wymiar konieczne jest grupowanie elementów w odpowiednio przygotowane wzory układów siłowników. Przykładem może być uzyskanie odcinka ściągającego powłokę na całej długości. Nadal założenie lokalizacji siłowników wyłącznie po wewnętrznej stronie pozostaje jedyną formą mocowania. Umieszczanie modyfikatorów o prostej budowie proponowanej w badaniu wywoływałoby od strony zewnętrznej rozciąganie lub alternatywnie wyginanie powłoki bez uzyskania naprężeń ściskających. Zakłada się uzyskanie pełnej funkcjonalności wyłącznie przy wewnętrznym rozmieszczaniu siłowników dla modelu powłoki zakrzywionej w każdym kierunku jednostronnie.

6.3.3 Badania efektywności pracy systemu modyfikatorów

W celu określenia skuteczności działania proponowanej metody oddziaływania na strukturę przygotowano model badawczy oparty w znacznym stopniu na dotychczas badanej strukturze powłokowej o ustalonej geometrii wycinka sfery. Powłokę dwupłaszczyznowo zakrzywioną rozciągniętą między 4 podporami nieprzesuwnymi sztywnymi podzielono na 625 segmentów. Zmniejszenie liczby płaszczyzn aproksymujących złożoną powłokę wynika z faktu mniejszej potrzeby precyzyjnej lokalizacji poszczególnych siłowników. Dotychczasowy modyfikator łączony 5-punktowo z powłoką umożliwiał wyłącznie pojedynczy sposób mocowania do powłoki tworząc układ krzyżowy w rzucie. Systemowe modyfikatory pozwalają na znacznie szerszą gamę układów z wykorzystaniem tej samej liczby modyfikatorów i punktów mocowań. Zakłada się, więc możliwość zmniejszenia liczby punktów mocowania co dalej mieć będzie pozytywny wpływ na jednorodność pracy powłoki o zmniejszonej liczbie perforacji. Jednocześnie zmniejszy to liczbę topologii do przeszukania przed znalezieniem efektywnego układu. Model obciążono bazową siłą grawitacji, a następnie opracowano moduł odpowiedzialny za dobór geometrii i ilości modyfikatorów. Model liczył 10m rozpiętości. Oparty był na układzie kwadratu w rzucie.

System modyfikatorów opracowany został, aby umożliwiać lokalizowanie ich tak ręcznie poprzez określenie punktu mocowania jak i automatycznie poprzez dobór losowej topologii Model na cele symulacji przygotowano w programie Rhinoceros Grasshopper. W celu umożliwienia ręcznego określania punktów mocowania przygotowano moduł obsługujący do 16 zestawów dwóch numerów, gdzie położenie każdego końca modyfikatora określa się poprzez dobór odpowiedniego numeru punktu mocowania. Alternatywą pozostaje dobór losowy analizowany w jednym ze scenariuszy badań. Przygotowano moduł odpowiadający za poszukiwanie układów siłowników nie podlegających deterministycznym topologiom. Na obszarze obrysu powłoki w rzutowaniu pionowym zamodelowano losowy dobór określonej liczby punktów poprzez formułę programu Grasshopper ***„populate 2D”***. Podlegają one pewnemu równomiernemu rozkładowi w zadanym obszarze. Liczba punktów pozostaje zawsze parzysta i przyjmuje wartości od 1 do 16 punktów zachowując maksymalną liczbę modyfikatorów jakie mogą podlegać analizie. Każdy punkt stanowi jeden z końców modyfikatora jednocześnie określając punkt mocowania do powłoki. Funkcją ***„Circle”*** Dla każdego punktu wyznacza się okręg o promieniu zdefiniowanym przez użytkownika. Promień ten wyznacza długość modyfikatora i może być dobierany tak indywidualnie dla każdego modyfikatora jak i globalnie dla wszystkich siłowników w zunifikowany sposób. Dla określonej średnicy każdego okręgu program rozkłada na niej równomiernie 8 punktów funkcją podziału krzywej ***„divide”***. Każdy odcinek kończy się punktem z którego następuje automatyczne wyszukiwanie najbliższego punktu mocowania na powłoce z użyciem funkcji ***„closest 3d”***. Dzięki temu dla każdego początku modyfikatora istnieje możliwość doboru do 8 punktów jego zakończenia. Uzyskane w ten sposób układy pozwalają na zachowanie pewnych granicznych wartości długości modyfikatorów, które wraz ze wzrostem długości charakteryzują się coraz mniejszymi siłami krytycznymi. Jednocześnie gwarantuje to możliwość uzyskania równomiernego rozkładu modyfikatorów na całej powierzchni powłoki jak i na wybranym obszarze na przykład podczas badania reakcji na siły asymetryczne.

Między komplementarnymi punktami funkcją ***„line”*** rozciągnięto linie stanowiące idealizacje modyfikatorów. Rysowane przez program nadal na płaszczyźnie pod powłoką są następnie rzutowane w kierunku pionowym na powłokę funkcją ***„project”***. Funkcja ta umożliwia rzutowanie w dowolnym kierunku. Ze względu na duża liczbę parametrów do przebadania podczas pojedynczego procesu badawczego zdecydowano się na badania przy domyślnej wartości kierunku projekcji pionowo w górę wzdłuż osi Z. Oznacza to, że program nie zna kąta nachylenia siłownika do momentu przeprowadzenia procesu rzutowania. Zakłada się jednak brak wpływu kąta nachylenia na skuteczność teleskopowania i wpływu na powłokę. Każdy modyfikator przymocowany jest do powłoki połączeniem obrotowym. Symulowanym w Grasshopper jako idealny wirtualny sposób nieprzesuwnego doskonale sztywnego połączenia. Modyfikator i sposób jego modelowania przedstawiono na Grafika 38 .



Grafika 38.Uproszczona geometryczna budowa siłownika i sposób doboru punktu mocowania drugiego końca wraz z rzutowaniem siłownika na powłokę.

Każdy siłownik sterowany jest indywidualnym parametrem zmiany długości określonym w module funkcji rozciągania elementów nośnych w programie Grasshopper parametrem ***„epsilon”*** dla modułu ***„displacement loads”***. Zmiana ta realizowana jest poprzez użycie funkcji rozciągnięcia elementu strukturalnego za który określono wszystkie siłowniki w symulacji. Zmiana długości sama nie wywołuje zmiany układu naprężeń co odpowiada zachowaniu siłownika w rzeczywistych strukturach, lecz wywołuje rozrywanie lub ściskanie powłoki proporcjonalnie do jej wytrzymałości. Ze względu na prostszy sposób łączenia i pracy modelu modyfikatora w porównaniu do wcześniej analizowanego modelu symulacji, struktura hybrydowa powłokowo-prętowa podlega równoległym obliczeniom oddziaływania powłoki na modyfikatory oraz modyfikatorów na powłokę. Oznacza to, że program w jednym module oblicza tak zachowanie podpór, powłoki oraz jej interakcje z modułami. Pozwala to na uzyskanie bardziej realistycznych zachowań ze względu na lepiej dobrane warunki brzegowe. W każdym badaniu może być symulowane działanie do 16 modyfikatorów, które mogą aktywnie brać udział w modyfikacji naprężeń, usztywniać strukturę, bez wprowadzania własnych odkształceń, lecz zapewniając stałość geometrii przy zmianach układu sił wewnętrznych, bądź też pozostawać bierne nie wpływając w żadnym przypadku na dystrybucję naprężeń w modelu.

6.3.4 Przygotowanie, parametry badania

Struktura symulowana jest przy użyciu MES. Dobrano analizę nieliniową analogicznie do wcześniejszego badania modyfikatorów. W celu wprowadzania zmian i poszukiwania efektywnych układów i zachowań modyfikatorów użyto algorytmu ewolucyjnego. Steruje on wszystkimi długościami teleskopowania modyfikatorów osobno.

Na potrzeby wstępnych badań skuteczności metody zmian geometrii dobrano zakres teleskopowania jako równy 5cm w obu kierunkach z dokładnością równą 0,1cm. Dla części badań algorytm steruje również lokalizacją modyfikatorów w obszarze prezentowanym na Grafika 38. W celu wstępnego oszacowania efektywności działania modyfikatorów dobrano badania z użyciem obciążeń powierzchniowych zorientowanych jednokierunkowo na całej powierzchni powłoki. Dobrano w sposób losowy 10 wartości obciążenia tworząc tyle osobno analizowanych przypadków obciążenia. Wartości wahały się w granicach od -20kN/m^2 do 20kN/m^2.

6.3.5 Przebieg i wyniki badania

Podczas badań dobierano czas poszukiwania form struktur zależnie od zakresu grupy parametrów. Kolejno algorytm ewolucyjny dobierał wartości teleskopowania siłowników oraz losowego układu ich punktów mocowania dla dwóch, czterech, ośmiu i szesnastu modyfikatorów. Zależnie od liczby elementów ruchomych liczba możliwych do uzyskania przypadków wynosiła $100^{2^x} * y$, gdzie:

x-liczba modyfikatorów

y-liczba arbitralnie określonych układów modyfikatorów

Zgodnie ze wzorem niemożliwe jest dobranie równych warunków poszukiwania geometrii we wszystkich przypadkach. Użycie algorytmu ewolucyjnego wiąże się z niebezpieczeństwem nieuzyskania informacji o ekstremum globalnym funkcji jakim w przypadku badanej struktury jest minimalna wartość naprężeń. Zdecydowano się więc na przeprowadzenie większej liczby prób badawczych dla liczniejszych grup modyfikatorów. W tabeli zebrano dane na temat prób badawczych i warunków zakończenia pracy algorytmu.

Tabela 12.Zestawienie parametrów badania pozwalających na wyrównanie szans uzyskania istotnych wyników w każdym z pomiarów. Dobór wartości pozwala niwelować rosnącą liczbę rozwiązań geometrycznych do przeszukania podczas każdej próby badawczej.

Rodzaj badania	Liczba pełnych prób badawczych według parametrów kolumny „3” oraz „4”	Minimalna liczba przebadanych geometrii	Warunek zakończenia badania przy nieuzyskaniu efektywniejszych geometrii po określonej liczbie iteracji
2 modyfikatory	1 próba	500	14 iteracje
4 modyfikatory	2 próby	1 500	10 iteracje
8 modyfikatorów	6 prób	4 500	8 iteracji
16 modyfikatorów	12 prób	12 000	5 iteracji

Ze względu na zmniejszenie liczby elementów w analizie MES uzyskano znaczny wzrost wydajności obliczeniowej modelu. Średni czas potrzebny na przebadanie jednego przypadku obciążeniowego wyniósł 0,07s co pozwoliło na włączenie do analizy algorytmu ewolucyjnego w układzie hybrydowym wraz z symulowanym wyżarzaniem stanowiącym alternatywny dla algorytmu ewolucyjnego sposób heurystycznego dążenia programu do uzyskiwania wartości określanych jako efektywne. Warunki poszczególnych badań dobrane tak, aby każdorazowo uzyskiwać zbliżone szanse osiągnięcia efektywnych wyników przedstawiono w Tabela 12.

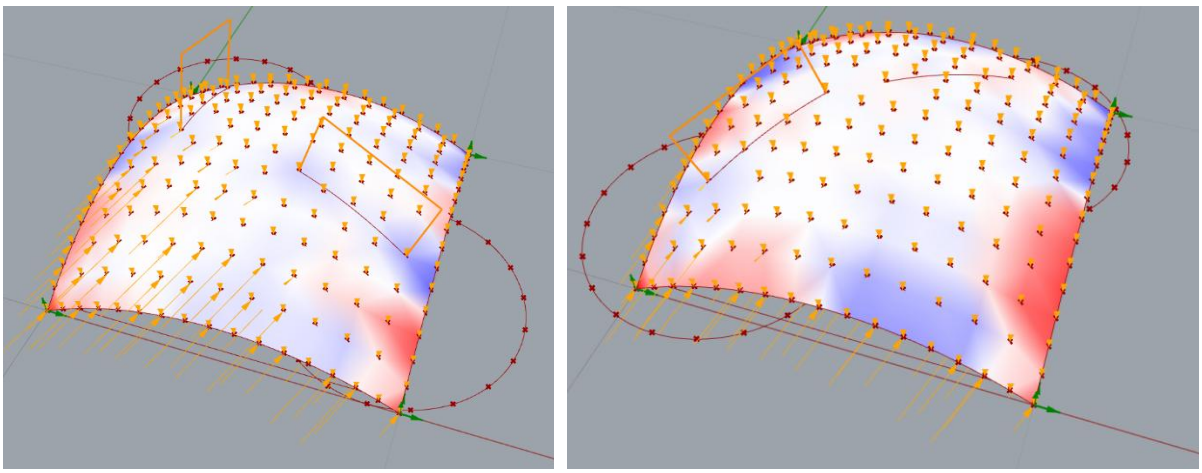
6.3.6 Wyniki badania

Algorytm ewolucyjny jednocześnie poszukuje efektywnych wartości dla wszystkich biorących w badaniu udział modyfikatorów. Każda ścieżka zmian wartości jest osobno monitorowana przez program i charakteryzuje się mniejszym wpływem wzajemnym wartości. Zmiany wartości przeprowadzane są w iteracjach. Podczas iteracji każdy alternatywny zestaw wartości parametrów ulega pojedynczej zmianie po czym następuje ewaluacja wszystkich modyfikatorów. Algorytm wyżarzający skupia się na doborze efektywnych wartości tylko dla jednego zestawu parametrów. Naraz analizowany jest tylko jeden gen i jeden jego parametr. W wyniku działania tego modelu tylko najefektywniejszy gen podlega zmianie, a po uzyskaniu wzrostu efektywności nowo dobrany zestaw parametrów zastępuje poprzedni. Pozwala to na uzyskanie znacznie większej liczby zmian jeśli analiza powinna skupić się tylko na jednym rozwiązaniu. Algorytm ten jest znacznie podatniejszy na zjawisko błędnego określenia ekstremum lokalnego za globalne. Oba algorytmy postanowiono włączyć do badania zgodnie z kolejnością pierwszeństwa algorytmu ewolucyjnego dobierającego tak wartości teleskopowania jak i układ siłowników, a następnie dokończenia doboru geometrii i topologii

algorytmem wyżarzającym. Średnio dla każdego z badanych przypadków program badał 14 geometrii na sekundę.

W pierwszej kolejności dla losowo dobranych przypadków obciążenia zapisano wartości naprężeń oraz ugięć referencyjnych uzyskanych bez użycia systemów modyfikacyjnych, lub z biernym ich udziałem w strukturze. Następnie przystąpiono do poszukiwania układów i zachowań efektywnych systemu z losowym doborem rozkładu siłowników. Kolejno określono dwie grupy dla każdej liczby siłowników. W pierwszej dążono do minimalizacji naprężeń maksymalnych w dowolnej strefie struktury. W drugiej skupiono się na minimalizacji strzałki ugięcia pionowego równoległego do osi Z. Wraz z wartościami wynikowymi funkcji modyfikacyjnej zapisywano dane dotyczące modyfikatorów w zakresie ich stopnia teleskopowania oraz wyindukowanego na nich naprężenia. Dane te następnie posłużą do analizy wymagań fizycznych, geometrycznych i zabezpieczenia pracy elementów podczas użytkowania struktury. Wszystkie wyniki badań i ich analizę zebrano w Tabela 12.

Dla wszystkich przypadków we wszystkich układach siłowników uzyskano wartości znacznie niższych naprężeń. Wzrost efektywności we wszystkich przypadkach rozumiany jako spadek wartości analizowanych parametrów wahał się w zakresie od 25% do 44%. Zauważono szereg tendencji w dobranych próbach badawczych. Znacznie wyższą skutecznością charakteryzowały się badania redukcji strzałki ugięcia, generując średnio 14% większy zysk wartości zakresu bezpieczeństwa niż parametr naprężeń maksymalnych. Tak znaczący wzrost efektywności świadczy o znacznym potencjale wykorzystania systemów w architekturze. Dobór układu topologicznego modyfikatorów był losowy co pozwala założyć, że podczas żadnego badania nie dobrano optymalnego układu siłowników. 100% skuteczność wzrostu nośności dla dobranych przypadków obciążeniowych pozwala założyć, że istnieje szereg układów dla których możliwe jest podniesienie efektywności struktury. Implikuje to fakt znacznej redukcji czasu poszukiwania form przestrzennych. Dla wszystkich prób czas badania wyniósł od 24 sekund do 438 sekund co kwalifikuje algorytm jako moduł główny wymagający do efektywnego zarządzania strukturą asystujących modułów reakcji natychmiastowych oraz awaryjnych. Zauważa się, że w większości przypadków przy redukcji wartości jednego z parametrów drugi również podlegał zmniejszeniu. Finalnie dla szesnastoelementowego systemu uzyskiwano najefektywniejsze zestawy obu parametrów. Należy jednak zauważyć, że redukcja nie następowała zawsze czego przykładem jest para przypadków nr 4 z obu badań (naprężeń i strzałki ugięcia) dla modelu szesnastoelementowego co przedstawiono w Tabela 13. Jeden z przypadków uzyskał maksymalną redukcję obu parametrów natomiast drugi, operujący naprężeniami miał wartość zbliżoną do wyniku układu ośmioelementowego z tego samego przypadku obciążeniowego. Tłumaczy się to przede wszystkim losowością w doborze układów siłowników. Zakłada się, że możliwość swobodnej zmiany położenia poszczególnych punktów mocowania modyfikatorów przyczyni się do uzyskiwania wyników o znacznie wyraźniejszych tendencjach.



Grafika 39.Wynikowe układy modyfikatorów wraz z rozkładem naprężeń na powierzchni powłoki.

Znaczne zróżnicowanie efektywności koreluje się ściśle z liczbą badanych modyfikatorów. Na Grafika 39 przedstawiono przykładowy rozkład naprężeń dla przypadku obciążeniowego nr 8 przy dwóch siłownikach. W przypadku losowego doboru punktów mocowania przy długości siłowników arbitralnie określonej na 1,5m wraz ze wzrostem liczby modyfikatorów proporcjonalnie wzrastała efektywność systemu. Dla dwóch modyfikatorów wzrost ten był średnio na poziomie 26% uzyskując podobne wartości dla naprężeń jak i strzałki ugięcia. W każdym kolejnym badaniu zauważa się średnio dwukrotną redukcję obu kluczowych parametrów przy dwukrotnym wzroście elementów systemu. Zwiększenie stopnia skomplikowania systemu wywołuje korzystny efekt. Taki liniowy wzrost tłumaczy się niską zależnością efektywności od rozkładu elementów na strukturze. Układ losowy dla żadnego przypadku nie wykazywał cech zorganizowanego powtarzalnego schematu stosowanego w powszechnych systemach stężających dla analogicznych obiektów wykorzystujących ściągi. Wraz ze wzrostem liczby modyfikatorów wszystkie wartości maksymalnych naprężeń ulegały ujednoliceniu. Początkowa znaczna zależność naprężeń od wartości siły przyłożonej do struktury ulegała redukcji z amplitudy wartości równej 430% do 230%. Potwierdza to wyraźne dążenie modelu do unifikacji stopnia sprężenia całej struktury przy odpowiednio dużej liczbie modyfikatorów. Wyznaczona liniowa zależność argumentuje uwzględnienie opłacalności użycia systemu do badań efektywności. Opłacalność ta powinna obejmować dynamikę zmian kosztów wykonania, użycia i zarządzania modyfikatorami, jak i wzrost naprężeń spowodowany dodatkowymi obciążeniami struktury.

Tabela 13.Zestawienie wyników parametrów statycznych struktury w zależności od liczby modyfikatorów składających się na jednolity system ruchu. Pełne zestawienie wyników badań stanowi załącznik nr 6.B pracy.

badanie z użyciem losowego doboru punktów mocowania										
nr badania	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
składowa X [kN	18,02	10,06	10,32	7,70	8,84	-8,09	-4,54	-1,64	-11,41	18,45
składowa Y [kN	14,43	3,11	18,48	13,55	16,60	12,09	3,77	-1,91	8,79	-0,55
składowa Z [kN	-10,05	-15,57	-1,32	10,86	6,30	-2,69	-5,84	17,75	-15,95	5,70
pozycja X [m]	7,91	4,34	3,04	10,00	6,96	5,00	7,50	0	0,83	4,11
pozycja Y [m]	2,93	0,00	0,00	0,00	0,00	45784,00	9,17	6,96	5,83	9,69
pozycja Z [m]	2,24	1,47	1,27	0,00	1,27	2,63	1,58	1,27	1,92	1,63
naprężenia [kN	38,51	19,95	30,36	23,83	26,20	19,10	9,91	8,64	24,24	23,19
ugięcie [mm]	803,82	431,99	818,42	586,32	721,77	485,19	175,26	132,55	436,59	668,78
dwa modyfikatory										
naprężenia [kN	34,74	18,64	27,47	20,10	25,14	19,92	9,88	8,72	24,82	22,19
ugięcie [mm]	720,73	380,60	760,19	576,14	683,65	429,22	170,18	103,39	419,26	624,36
naprężenia [kN	33,28	16,95	28,93	18,81	21,39	17,59	8,31	7,77	18,19	19,65
ugięcie [mm]	804,28	411,82	791,18	560,42	704,86	463,67	185,41	126,22	409,29	653,67
cztery modyfikatory										
naprężenia [kN	32,34	16,81	26,70	17,28	22,55	17,32	8,29	7,27	22,15	21,58
ugięcie [mm]	680,49	333,27	737,60	508,63	634,93	394,64	164,03	87,16	391,96	590,59
naprężenia [kN	28,89	15,37	25,61	15,85	19,19	16,13	7,88	7,06	17,48	17,08
ugięcie [mm]	758,89	386,52	732,19	522,91	676,09	419,19	177,75	119,79	406,08	628,19
osiem modyfikatorów										
naprężenia [kN	27,64	17,46	26,45	18,33	21,26	16,84	8,65	5,56	18,39	20,36
ugięcie [mm]	619,34	291,50	630,16	453,53	560,92	329,58	133,44	71,03	345,94	541,85
naprężenia [kN	26,00	13,25	22,80	13,72	16,83	13,40	6,62	5,04	15,96	15,12
ugięcie [mm]	699,21	340,42	651,76	502,02	624,68	377,59	150,71	103,91	382,68	612,91
szesnaście modyfikatorów										
naprężenia [kN	25,22	14,46	22,13	16,74	19,24	16,32	5,69	5,03	16,49	18,17
ugięcie [mm]	557,19	245,83	528,73	396,55	510,59	286,49	115,23	65,41	321,67	497,85
naprężenia [kN	21,04	11,43	18,82	11,90	14,86	12,64	4,92	4,02	14,31	14,99
ugięcie [mm]	647,34	291,42	592,61	465,17	570,74	344,04	135,64	94,60	357,70	516,09

Odnotowywalny jest znacznie wyższy wskaźnik redukcji ugięć dla przypadków większych obciążeń. Dla wartości początkowych strzałek ugięcia powyżej 500mm średnio redukcja strzałki dla ostatniej próby badawczej 16 modyfikatorów wynosiła 75%, podczas gdy pozostałe przypadki uzyskiwały redukcję strzałki na poziomie 41%. Wiąże się to z zauważalnym w zestawieniu wyników wzrostem naprężeń na modyfikatorach. Dla dwóch oraz czterech siłowników widać znacznie większe naprężenia na modyfikatorach gdy model orientowany jest na redukcję naprężeń, niż gdy redukcji ulega strzałka ugięcia. W pojedynczych przypadkach wartości naprężeń dochodzą do 334 MPa gdy rozpatrywany jest wpływ sił wewnętrznych, natomiast przy ugięciach nie występują podobne piki wartości zamykając zakres na wartościach maksymalnie 123MPa. Trzykrotna różnica wartości może być w prosty sposób skompensowana użyciem bardziej podatnej powłoki lub znacznie masywniejszym przekrojem modyfikatora. Wynik ten prezentuje potrzebę dostosowania systemu i jego fizycznej realizacji do skali obiektu. To czyni rozwiązania systemów modyfikatorów znacznie bardziej zindywidualizowanymi. Algorytm nie uwzględniał maksymalnych naprężeń jakie modyfikator jest w stanie bezpiecznie wyindukować lub przenieść, aby uniknąć nagromadzenia badanych parametrów podczas jednego badania. Należy parametr ten uwzględnić w dalszych badaniach. Dla większej liczby modyfikatorów zachowują one bardzo nierównomierny rozkład naprężeń wewnętrznych. Przeważnie dla każdego przypadku obciążeniowego występuje szerokie spektrum wartości od pomijalnie sprężonych siłowników po pojedyncze przejmujące większość naprężeń. W zdecydowanej większości najintensywniej pracującymi siłownikami pozostają te zlokalizowane na krawędzi struktury. Prowadzone wzdłuż obrzeża, równolegle lub prawie równolegle odpowiadają za sztywność w największym stopniu. Podczas prób ręcznego usuwania poszczególnych modyfikatorów zauważono ich stopień istotności w podnoszeniu efektywności systemu. Ich usunięcie najczęściej powoduje wzrost strzałki ugięcia o 40-60%. Pozostają one usztywnieniami, dla których analogiczne w strukturach membranowych stężenia opisywał Frei Otto po realizacji obiektu stadionu w Monachium [157]. Nie zauważa się zmniejszenia średniej naprężeń poszczególnych modyfikatorów przy zwiększaniu ich liczby. Nierówny rozkład pozostaje zachowany i nie stwierdza się zależności między lokalizacją siłownika, a wartością naprężenia. Dane reprezentatywnych wyników zebrano w Tabela 13.

6.3.7 Wnioski

Najczęściej algorytm ewolucyjny rozpoczynał poszukiwania od odrzucenia szeregu modyfikatorów, które nie przecinały się wcale lub były skrzyżowane w mniej niż 35% przypadków. Po około 15 sekundach algorytm zauważał potencjał wzrostu efektywności dla przypadków o większej liczbie przecięć. Finalnie poszukiwania algorytmem kończone były doborem układu o bardzo dużej wzajemnej zależności między modyfikatorami. W naturalny sposób wywoływało to zagęszczenie modyfikatorów w pewnej środkowej strefie powłoki z pojedynczym modyfikatorem w bliskim otoczeniu krawędzi. Przy niskim zagęszczeniu zauważano znacznie większą równomierność naprężeń modyfikatorów. Im silniejszej agregacji podlegały tym większe różnice były zauważalne nawet między sąsiednimi siłownikami. Program bardzo dobrze wyszukiwał zależności między modyfikatorami co sprzyjało takim złożonym układom. Najczęściej krzyżujące się modyfikatory przyjmowały przeciwne znaki naprężeń. Wywoływało to znaczne deformacje modelu co dalej wpływało pozytywnie na wartość strzałki ugięcia.

Każdy przypadek obciążenia dla każdej sytuacji obliczeniowej podlegał dwuetapowej modyfikacji zgodnie z wcześniej przedstawionym schematem. Zauważa się znaczną zależność czasu działania poszczególnych algorytmów zależnie od liczby modyfikatorów. Dla dwóch siłowników 90% efektywności wyniku końcowego dobierane było na podstawie poszukiwań algorytmu ewolucyjnego, a pozostałe minimalne zwiększenie tej wartości następowało w wyniku poszukiwania algorytmem wyżarzającym. Dla układów czteromodułowych podział podnoszenia efektywności był równy 70% do 30% nadal z większą wartością przypadającą na algorytm ewolucyjny. Przy badaniach ośmiomodułowych podział pozostawał na równym poziomie, natomiast przy 16 modyfikatorach dominował algorytm

wyżarzający, który odpowiadał za 60-80% efektywności. Wzrost istotności drugiego z algorytmów wymuszał stopniowe zwiększania czasu trwania badania i jego drugiego etapu. Tak zauważalną zmianę proporcji udziału algorytmów tłumaczy się rosnącą pulą możliwych do uzyskania rozkładów naprężeń. Każdy kolejny modyfikator pozwala na wykładniczy wzrost liczby dostępnych układów. To z kolei zwiększa szanse na uzyskanie efektywnych zachowań systemu dla większej liczby układów topologicznych modyfikatorów. Na podstawie opisywanego parametru wnioskuje się więc, że najważniejszym parametrem wraz ze wzrostem liczby elementów systemu staje się dobór naprężeń aniżeli układ elementów ruchomych.

Zakresy pracy wszystkich siłowników na podstawie pierwszych wyników określono jako równe 50mm w obu kierunkach. Skok wartości następował co 0,1cm pozwalając na precyzyjny dobór stopnia teleskopowania. Na podstawie wyników badania i uzyskiwanych końcowych wartości wydłużeń zauważa się poprawność pierwotnie dobranego zakresu. Wyłącznie 5% przypadków teleskopowania modyfikatorów uzyskało efektywny wynik dla maksymalnej wartości wysuwu lub skrócenia. Wraz ze wzrostem liczby badanych jednocześnie modyfikatorów zauważa się zmniejszenie udziału elementów podlegających pełnemu wysuwowi lub skróceniu. Mimo braku spadku średnich wartości naprężeń zmniejsza się skala zmian długości modyfikatorów co świadczyć może o dużym stopniu oddziaływania modyfikatorów wzajemnie na siebie.

W badanej grupie przypadków obciążeniowych znajdowała się zbliżona liczba obciążeń skierowanych w dół, wywołujących generalne ściskanie w modelu oraz sił orientowanych przeciwnie symulujących podciąganie powłoki generując w znacznej części naprężenia rozciągające. Podział ten zauważalny był w proporcjach siłowników poddawanych skracaniu oraz rozciąganiu. Zgodnie z globalną tendencją badania podczas ściskania powłoki, większość siłowników podlegała rozszerzaniu kontrując naprężenia rozciąganiem i dalej rozsadzaniem powłoki. Z kolei w przypadkach działania siły orientowanej ku górze większość siłowników operowała w zakresie skracania.

6.3.8 Podsumowanie

Dla badanego modelu operującego na losowo dobieranych lokalizacjach modyfikatorów i zróżnicowanych liczbach elementów systemu uzyskano bardzo wyraźną poprawę efektywności. Wykracza ona znacząco poza skalę błędów pomiarowych i niedokładności wykonawczych argumentując dalszy proces badawczy kolejnych parametrów sterowania ruchem systemu. Dla każdego z badanych przypadków obciążeniowych występuje znaczna grupa układów topologicznych siłowników, pozwalających na uzyskanie bardzo efektywnych zachowań systemu. Wyniki wskazują na znaczną efektywność tak w przypadku redukcji strzałki ugięcia, jak i dla redukcji maksymalnych naprężeń.

W dalszej kolejności należy badać zdolność systemu do samodzielnego doboru punktów mocowania na powłoce, długości siłowników oraz stopnia ich teleskopowania, określić tendencje systemu do uzyskiwania konkretnych układów topologicznych w celu określenia zdolności do syntezy zachowań i w konsekwencji przyspieszenia pracy systemu. Redukując liczbę efektywnych topologii klaruje się pewna biblioteka zachowań predefiniowanych. Zakłada się, że możliwa jest redukcja puli efektywnych układów do stopnia pozwalającego na stworzenie bazy preakcji lub grupy gotowych zachowań. Znacznie upraszczałoby to proces sterowania strukturami umożliwiając ograniczenie się do wyłącznie jednego modelu zachowań.

6.4 Badanie efektywności redukcji naprężeń oraz ugięć przy użyciu parametryzowanych pozycji elementów systemu modyfikatorów

6.4.1 Wstęp i przygotowanie badania

Udowodniono, że wykorzystanie systemu modyfikatorów pozwala na uzyskanie wymiernych korzyści. W dalszym etapie, badaniu podlegać będzie zdolność systemu do samodzielnego sterowania elementami. Z modelu zdjęto ograniczenie maksymalnej długości modyfikatora. Działanie to prowadzi do generowania wyników ze znacznie większej puli dostępnych układów, lecz pozwala uzyskać wiedzę o preferowanych przez system układach siłowników bez wpływu sztucznych ograniczeń. Badanie zostanie przeprowadzone na tej samej grupie przypadków obciążeniowych co poprzedni zestaw pomiarów. Zmianie ulegnie czas badania każdego z przypadków ze względu na znacznie większą liczbę parametrów sterowanych przez algorytm ewolucyjny. Ponownie jako kompensację nierówności liczby przypadków z puli zdecydowano się na przeprowadzenie większej liczby kolejnych powtórzeń badania dla liczniejszych systemów.

W celu przeprowadzenia badania dokonano koniecznych zmian w modelu w programie Grasshopper. Moduł programu odpowiedzialny za losowy dobór punktów mocowania zastąpiono ręcznym sterowaniem koordynatami punktów poprzez suwaki wartości w zakresie od 0 do 10,0 umożliwiając przyjęcie 100 różnych wartości w każdym kierunku. Jest to dokładność wystarczająca na potrzeby precyzyjnego doboru układów. Zwiększenie gęstości gradacji punktów powodowałoby wykładniczy wzrost przypadków w puli zaburzając wyniki badań.

6.4.2 Wyniki badania

Sumarycznie przeprowadzono pomiary dla 80 przypadków badania. Zebrano dane w zakresie analogicznym do wcześniejszego badania. We wszystkich próbach pomiarowych uzyskiwano wyniki znacznie wyższe niż dla referencyjnej struktury statycznej. Spadek wartości naprężeń maksymalnych zawierał się w przedziale 32% do 47%. Z kolei dla ugięć redukcja ta wynosiła od 27% do 39%. Wzrost efektywności w przypadkach obu parametrów jest wyższy niż dla układów losowych. Charakteryzuje się znacznie wyższą efektywnością minimalną i bardzo dużą stałością wyników dla najbardziej kompleksowych układów szesnastoelementowych. Największy jednak spadek wartości parametrów następuje w przypadku systemów czteroelementowych. Ich wyniki w największym stopniu zależne były od algorytmu wyżarzającego, lecz nie uzyskały najwyższych wyników w każdym przypadku. Uzyskanie efektywności znacznie wyższej od zakładanej w tym przypadku tłumaczy się przeznaczeniem odpowiedniego czasu i mocy obliczeniowej na dokładną analizę zakresu parametrów. Ich liczba mieściła się w granicach możliwości kalkulacyjnych komputera symulacyjnego. To również potwierdza tezę o znacznej liczbie efektywnych geometrii i wzroście jej liczby wraz ze wzrostem liczby modyfikatorów. Algorytm często nie dobierał najlepszych układów topologicznych, lecz efektywność uzyskiwana była doborem odpowiednich długości teleskopowania.

W badaniu z użyciem precyzyjnego sterowania punktami mocowania modyfikatorów zauważono znacznie większą zależność między liczbą elementów ruchomych, a skutecznością stosowania dwóch algorytmów obliczeniowych. Znacznie wyraźniej dywersyfikują się role poszczególnych algorytmów. Pierwszy, ewolucyjny pełni funkcję poszukiwania efektywnych topologii. Badając jednocześnie znaczną liczbę układów pozwala na znalezienie efektywniejszych układów. Po każdym znalezieniu nowego układu o najwyższym parametrze wydajności algorytm przystępuje do minimalnej modyfikacji stopnia teleskopowania elementów w celu podniesienia wyniku. Operacja ta zwiększa szansę na wybór rzeczywiście najefektywniejszego układu topologicznego, zamiast efektywnego

zachowania niskoefektywnej topologii. Nadal jednak głównym zadaniem algorytmu ewolucyjnego pozostaje poszukiwanie efektywnych topologii. W drugim etapie o zróżnicowanym czasie realizacji zależnym od liczby modyfikatorów używano algorytmu wyżarzającego, którego głównym celem pozostawał dobór długości teleskopowania poszczególnych siłowników. Algorytm naraz zmienia tylko jedną wartość parametru, dopiero stopniowo wraz z odnajdywaniem bardziej złożonych zależności między parametrami poszukiwał efektywności w zmianach dwóch lub więcej parametrów jednocześnie. Pozostaje on więc odpowiednim algorytmem do doboru stopnia teleskopowania. W wyniku działania algorytmu wyżarzającego model podlega 30-500 zmianom podczas jednej próby badawczej.

Dla większej liczby modyfikatorów przeprowadzano większą liczbę powtórzeń badania analogicznie do wcześniejszych pomiarów układów losowych. Do zestawienia wyników włączono wyłącznie dane z każdej najefektywniejszej próby pomiarowej. W większości przypadków najefektywniejszą wartość model uzyskiwał podczas drugiego badania. Kolejno procent prób zakończonych najwyższym wynikiem efektywności w pierwszej próbie wynosił 27%, w drugiej 36%, w trzeciej 19%, czwartej 11% oraz w dalszych sumarycznie 7%. Wszystkie powtórzenia prób badawczych wykonywane były w jednej sekwencji powtórzeń pomiarów. System automatycznie resetował dane i wartości parametrów po przebadaniu modelu z odpowiednią dokładnością rozpoczynając nową próbę badawczą. Zapamiętywał jednak powiązania między parametrami. Oznacza to, że każda kolejna próba bazowała na większej liczbie informacji o zachowaniach modelu. Pozwala to wnioskować wzrost skuteczności systemu podczas ciągłej pracy jako stały moduł obliczeniowy modelu zachowań.

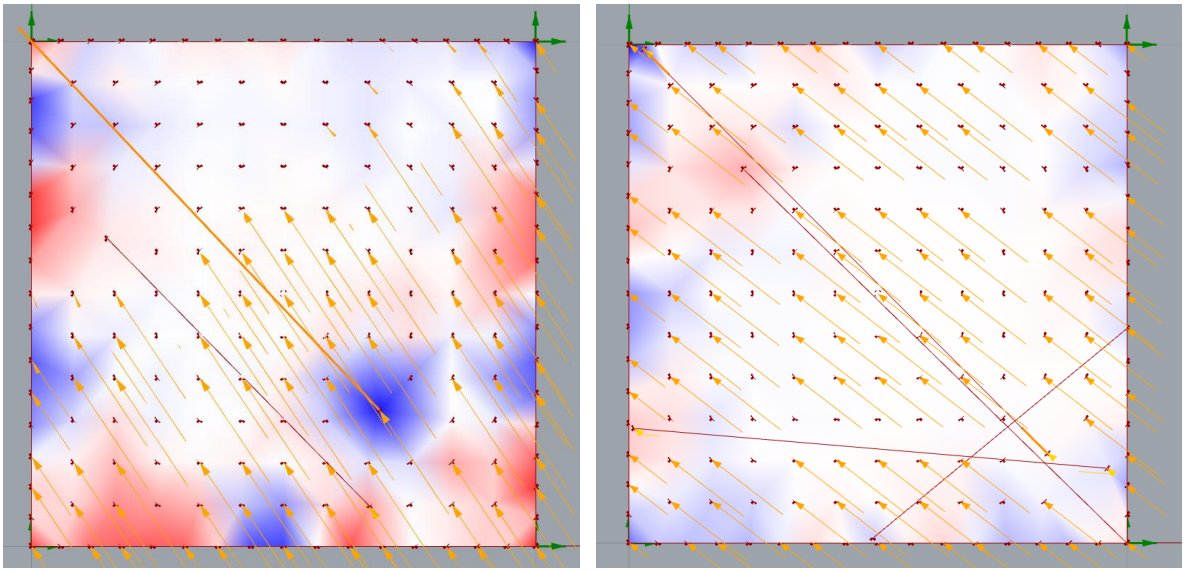
Tabela 14. Wyniki badania efektywności użycia precyzyjnie sterowanego pozycjonowania siłowników modyfikatorów punktowych. Pełne zestawienie wyników stanowi załącznik nr 6.B pracy.

badanie z użyciem doboru punktów mocowania przez algorytm ewolucyjny										
nr badania	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
składowa X [kN]	18,0	10,1	10,3	7,7	8,8	-8,1	-4,5	-1,6	-11,4	18,4
składowa Y [kN]	14,4	3,1	18,5	13,6	16,6	12,1	3,8	-1,9	8,8	-0,6
składowa Z [kN]	-10,1	-15,6	-1,3	10,9	6,3	-2,7	-5,8	17,8	-15,9	5,7
pozycja X [m]	7,9	4,3	3,0	10,0	7,0	5,0	7,5	0	0,8	4,1
pozycja Y [m]	2,9	0,0	0,0	0,0	0,0	2,9	9,2	7,0	5,8	9,7
pozycja Z [m]	2,2	1,5	1,3	0,0	1,3	2,6	1,6	1,3	1,9	1,6
naprężenia [kNm]	43,85726	25,8478	36,9475	28,68547	29,45632	22,85833	11,75854	10,74684	26,58356	27,4886
ugięcie [mm]	715,7	389,8426	798,05813	565,8425	703,58142	469,8345	165,27432	124,96684	415,18453	642,4857
naprężenia [kNm]	38,5	19,9	30,4	23,8	26,2	19,1	9,9	9,6	24,2	23,2
ugięcie [mm]	803,8	432,0	818,4	586,3	721,8	485,2	175,3	132,5	436,6	668,8
naprężenia [kNm]	41,8657	23,2	35,8	26,5	26,3	19,5	10,5	10,0	24,3	23,7
ugięcie [mm]	698,5	365,1	745,2	527,9	671,8	429,1	138,6	112,0	398,3	604,2
naprężenia [kNm]	34,7	17,6	27,9	21,6	25,0	16,4	8,4	8,3	21,1	21,2
ugięcie [mm]	764,2	417,5	794,3	543,0	705,2	460,8	152,1	130,0	417,4	642,6
naprężenia [kNm]	37,7	21,5	31,3	22,5	24,7	17,5	9,4	8,6	21,4	21,5
ugięcie [mm]	652,8	327,6	693,7	495,5	603,2	399,7	107,2	103,4	362,5	573,1
naprężenia [kNm]	30,6	16,6	23,6	18,6	22,0	14,1	7,7	6,9	19,9	18,7
ugięcie [mm]	703,1	385,6	736,1	511,4	649,4	411,5	130,0	108,9	395,9	599,3
naprężenia [kNm]	35,1	20,3	29,3	19,6	21,4	15,2	7,8	8,3	19,7	19,9
ugięcie [mm]	594,6	29,1	641,2	419,8	547,9	353,9	96,3	95,1	313,2	532,7
naprężenia [kNm]	29,2	14,0	20,2	17,2	18,3	12,9	6,5	6,2	16,8	16,5
ugięcie [mm]	640,2	355,1	669,8	486,1	597,5	387,2	109,5	99,7	346,0	577,4

6.4.3 Wyniki i tendencje doboru układów przez system

W wyniku badań uzyskiwano nierówne wzrosty efektywności. Część prób badawczych zachowywała bardzo liniowy spadek naprężeń lub strzałki ugięcia podczas zwiększania liczby siłowników, lecz występowały wyjątki wykazujące znaczną redukcję wartości nawet dla dwóch oraz czterech modyfikatorów. Ich wyniki układów topologicznych przedstawiono na Grafika 40. Dla dwóch modyfikatorów w układzie prezentowanym z lewej strony uzyskano 44% spadek wartości maksymalnych naprężeń oraz 43% spadek wartości strzałki ugięcia. Zestawienie

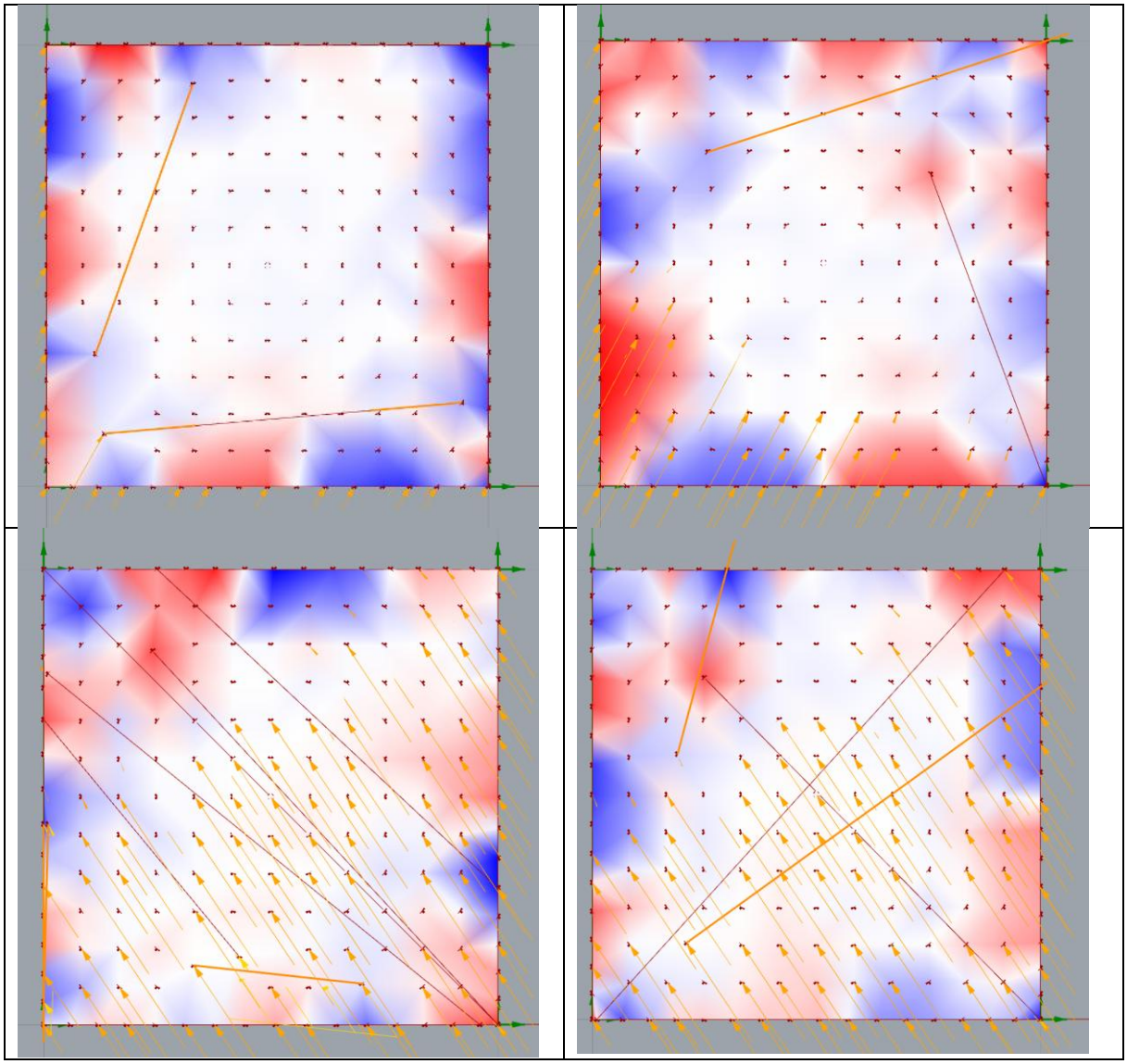
wartości przedstawiono w Tabela 14. W wyniku doboru wartości skrajnego rozciągnięcia modyfikatora wygenerowano na nim znaczną wartość naprężeń 54,7MPa. Charakterystyczna pozostaje znaczna długość modyfikatora rozpiętego dokładnie na osi łączącej przeciwległe podpory. W wyniku działania siły równoległej do osi powłoka uległa wygięciu i wyniesieniu wierzchołka struktury wraz ze zwiększeniem krzywizny w strefie centralnej. Poprzez pokazany układ dwóch współpracujących siłowników uzyskano usztywnienie analogiczne do tężników stosowanych w strukturach ramowych. Modyfikator przekracza znacząco długość umożliwiającą łatwą dystrybucję większych naprężeń, lecz jednocześnie nakreśla tendencje lokalizacji stałych siłowników systemów modyfikatorów. Ponadto w celu uproszczenia realizacji modeli stosowanie modyfikatorów o uzyskanych długościach należy zastępować w efektywny sposób szeregiem mniejszych elementów. Należy opracować minimalny zakres strategii doboru krótszych elementów. To Argumentuje konieczność przeprowadzenia dalszych badań w kierunku układów ręcznych według opracowanych schematów co jednak dla badań elementarnych nie stanowi zakresu pracy.



Grafika 40.Tendencje modyfikatorów do uzyskiwania układów analogicznych do ściągów struktur powłokowych w celu redukcji sił poziomych w modelu. Układy takie ze względu na znaczne długości modyfikatorów uzyskują bardzo nieefektywne topologie.

Dla podobnego przypadku obciążeniowego przeprowadzono badanie doboru zachowań z wykorzystaniem systemu czterech siłowników. Uzyskano mniejszą redukcję naprężeń oraz ugięć niż dla przypadku dwóch siłowników, lecz zauważa się bardzo podobne schematy rozkładu modyfikatorów. W układzie czteroelementowym również występuje identycznie zlokalizowany przekątny modyfikator, lecz charakteryzuje się większą długością i większymi naprężeniami. Dodatkowe dwa siłowniki nie powielają zasady ukośnej lokalizacji, lecz stężają strukturę poprzecznie. Usunięcie prostopadłego siłownika zwiększa naprężenia o 140%, co nadal stanowi redukcję wartości względem struktur statycznych. Siłownik ten łączy dwie sąsiednie krawędzie przez co największe ugięcia zlokalizowane są w miejscu występowania punktów mocowania siłownika. Krawędzie pozostają więc najbardziej wrażliwymi na odkształcenia fragmentami struktury. Dla obu przypadków widać skuteczność usztywnienia struktur na krawędziach, choć dla modelu systemu czteroelementowego powłoka zachowuje bardziej jednolity rozkład naprężeń, a wartości maksymalne ciśnienia nie występują w miejscach podpór, lecz w obszarze punktów mocowania modyfikatorów do powłoki.

Oba przypadki obliczane były zgodnie z założeniami liczby prób badawczych poprzedniego badania. Układ czteroelementowy uzyskał finalną geometrię w drugiej próbie, natomiast oba układy w największym stopniu korzystały z obliczeń algorytmu wyżarzającego. W przypadku pierwszego modelu przebadano 4500 układów i zachowań, natomiast dla drugiego układu efektywną formę uzyskano po 9700 próbach.



Grafika 41. Najwyraźniejsze tendencje w postaci sprężeń krawędzi powłoki oraz układów równoległych i prostopadłych. Dla dowolnego przypadku obciążeniowego model uzyskiwał jeden z wymienionych układów.

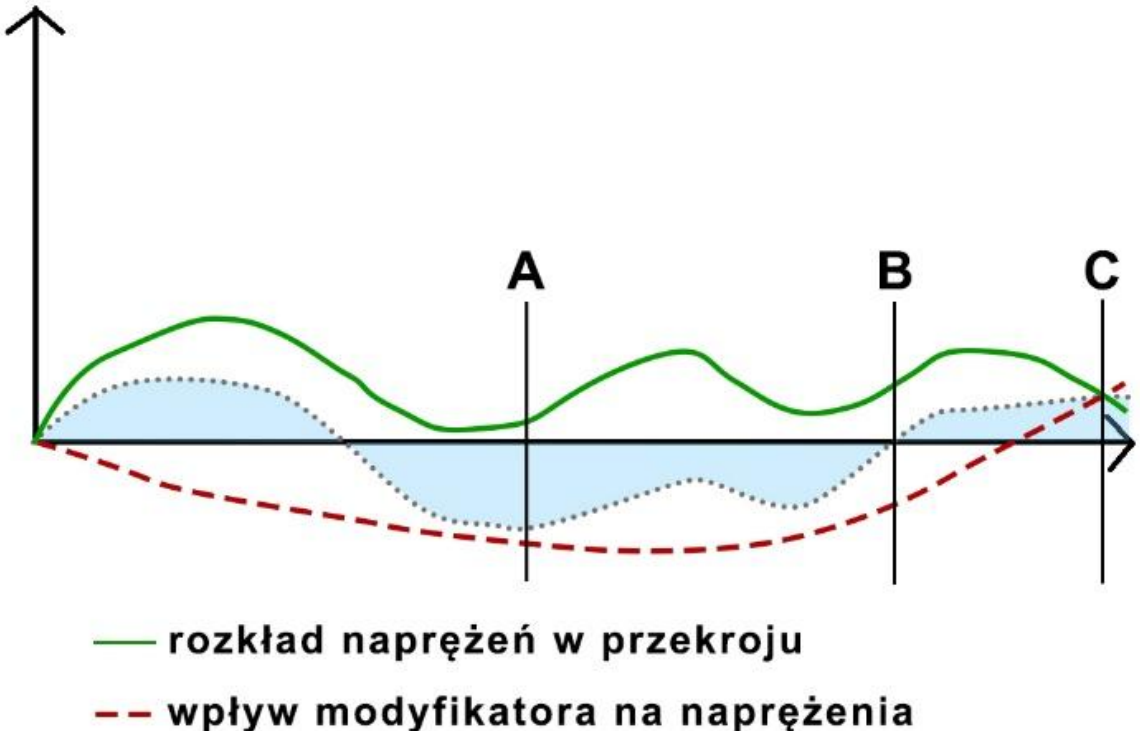
Większość układów topologicznych można przypisać do jednego z 4 schematów. Dla większych wartości obciążenia powierzchniowego wyraźniej układy wpisują się w opisywany schemat. Grafika 41 prezentuje najczęstszy układ dwu- oraz czteroelementowych systemów, gdzie wszystkie modyfikatory zlokalizowane są wzdłuż krawędzi. Redukują one naprężenia skupione samą geometrią struktury w miejscach mocowania. Obszary wokół tych punktów najczęściej charakteryzują się zredukowanymi naprężeniami w porównaniu do szerszego otoczenia punktów.

Drugi często generowany układ również występujący najczęściej w systemach dwuelementowych wyróżnia się punktami mocowań w ścisłym otoczeniu podpór. Modyfikatory te odciążają podpory redystrybuując ich naprężenia z powrotem do centrum struktury skąd część z nich redystrybuuje się w inne obszary modelu. Szacuje się, że taki układ modyfikatorów obsługujący wszystkie podpory może pełnić funkcję stałego układu topologicznego dla sterowania zachowaniami modelu, lecz przyjmuje on cechy ściągów, które nie stanowią zakresu opracowania. Pewną trudnością w rozwiązywaniu problemów realizacyjnych struktury pozostaje ścisłe sąsiedztwo podpory i mocowania. Minimalne

niedokładności wykonawcze jednego z połączeń wywoływać mogą wyginanie powłoki połączone ze ścinaniem. Zjawisko to prowadzić może do niesygnalizowanych przeciążeń struktury i scenariuszy nagłych zniszczeń obiektu. Mocowanie należy opracować zgodnie z założeniami symulacji gdzie sąsiedztwo punktu mocowania nie miało wpływu na zachowanie podpory.

6.4.4 Problematyka działania systemów modyfikatorów o zróżnicowanym stopniu złożoności

Dla pojedynczego modyfikatora w prosty sposób uzyskać można minimalną redukcję naprężeń. Przy wzroście liczby modyfikatorów oddziałują one wzajemnie tworząc złożone reakcje. Stopień ich kompleksowości zwiększa szanse na wystąpienie sytuacji przeciążenia struktury. System podczas pojedynczej iteracji algorytmu wyżarzającego modyfikuje zachowanie jednego bądź dwóch siłowników. Oznacza to, że pozostałe modyfikatory pozostają nieczynne, lecz wpływają na rozkład naprężeń w strukturze. Działanie modyfikatorów można uprościć do superpozycji naprężeń siłowników z naprężeniami rozłożonymi w strukturze, pochodzącymi z zewnętrznych obciążeń. Wystąpić mogą trzy różne zjawiska przedstawione na Grafika 42. Zachowanie „B" do którego dąży system to redukcja naprężeń na strukturze. Powłoka przenosi pewne naprężenia z sił zewnętrznych, a zadaniem modyfikatora jest wytworzenie na dokładnie takim samym obszarze odwrotnych naprężeń które prowadzić będą do zniesienia wartości ciśnienia w całej objętości fragmentu struktury. Wynikowe naprężenia w sytuacji idealnej powinny wynieść 0MPa Jest ono możliwe w każdej sytuacji, lecz nie na dowolnie dużej powierzchni. Uzyskanie i utrzymanie takiej wartości na większej powierzchni nie jest możliwe bez 100% skutecznego algorytmu zachowań oraz systemu predykcji naprężeń, lecz przy określeniu pewnej nieprzekraczalnej granicy naprężeń uzyskuje się zapas czasowy potrzebny do policzenia reakcji systemu i wykonania odpowiedniego ruchu modyfikatorów. Najczęściej jednak zmiana wartości teleskopowania jednego siłownika prowadzi do wystąpienia sytuacji analogicznej do „A", lub „C" na pozostałych siłownikach. Gdy siłowniki nie są kontrolowane, naprężenia generowane z ich udziałem



Grafika 42.Interpolacja wynikowych naprężeń z różnych źródeł oraz interpretacja wartości dla różnych przypadków geometrycznych.

znacząco rosną. Jest to szczególnie zauważalne gdy najpierw siłownik znacząco zmienił swoją długość dostosowując się do znacznie zdeformowanej powłoki, a następnie w wyniku działania innych modyfikatorów przywracających bardziej równomierną geometrię przestał być efektywny. Znacznie odkształcając model doprowadza się do sytuacji „A" kiedy to niewymagający interwencji modyfikatorów fragment struktury poddawany jest znacznym naprężeniom generując skrajnie nieefektywne zachowania. W sytuacji „C" z kolei pozostałe siłowniki redukują istotność swojego udziału w redukcji naprężeń, a struktura w danym miejscu ulega naprężeniu jak dla statycznej referencyjnej powłoki co oznacza nieistotność siłownika w danym miejscu.

Opisane złożone zależności wymuszają podejście iteracyjne w poszukiwaniu efektywnych układów i zachowań systemów oraz wymuszają jednoczesność poszukiwania obu parametrów. Jednocześnie wymuszają wprowadzenie dodatkowych filtrów zachowań przed ich implementacją w strukturze. W najprostszej formie operowania ruchem podczas działania algorytmu ewolucyjnego każda kolejna efektywna forma powinna być natychmiast wdrażana w strukturze w celu jak najszybszej i jak największej redukcji naprężeń. Oznacza to zmiany geometrii ze średnią częstotliwością 1,7 Hz, czyli wartością częstotliwości modalnej wyznaczonej wcześniej w badaniu. Wśród wszystkich uzyskiwanych geometrii znajdować się będą również takie, które naruszą maksymalne dopuszczalne naprężenia i ugięcia. Wymusza to każdorazowy test nowo implementowanej geometrii przez moduł weryfikujący. Jego zadaniem ma być analiza, czy nowa geometria nie powoduje wzrostów naprężeń, przekroczenia dopuszczalnych ugięć, bądź czy na dowolnym siłowniku zmiany naprężeń nie będą zbyt dynamiczne, aby przekroczyć jego dopuszczalne wartości nacisku, bądź, czy żaden z siłowników nie utracił swojej istotności w rozkładzie naprężeń oraz czy jego usunięcie nie prowadziłoby do zwiększenia efektywności systemu.

6.5 Badania zdolności przygotowania modelu dla pojedynczego modyfikatora systemowego

6.5.1 Wstęp

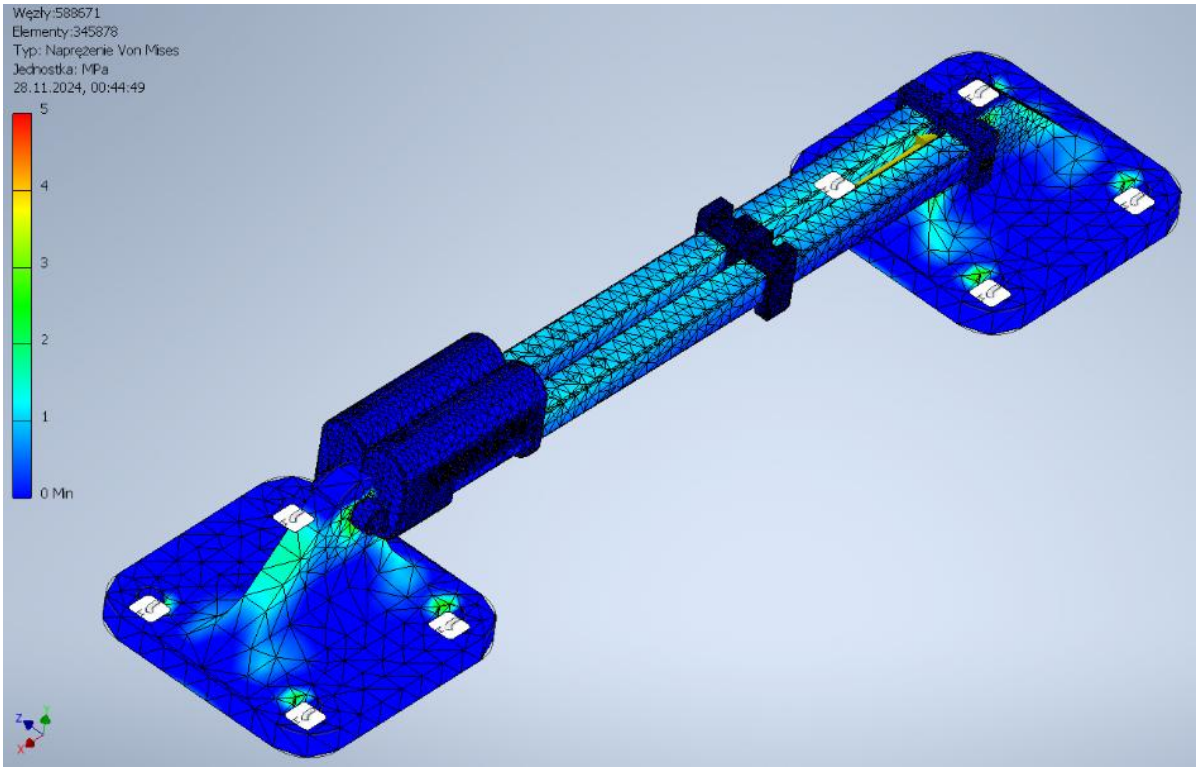
Przedstawione dotychczas modyfikatory punktowe stanowiły rozwiązania co najmniej pięciopunktowe. W badaniach powłoki z użyciem systemowych modyfikatorów siłowniki mocowane były dwupunktowo, a ich sposób działania uległ znacznemu uproszczeniu na rzecz kompleksowości zachowań całego systemu. W celu uszczegółowienia koncepcji rozwiązania systemowego opracowano model pojedynczego modyfikatora z uwzględnieniem właściwości fizycznych materiałów i wzajemnych połączeń.

Modyfikator opracowano w oparciu o założenie wytrzymałości 90% maksymalnych naprężeń uzyskanych podczas badania układów ręcznych. Szacuje się zdolność redukcji maksymalnych wartości o ponad 10% poprzez zastosowanie opisanych wcześniej rozwiązań multiplikacji siłowników. Jednocześnie określa się konieczność uzyskania wytrzymałości modelu na wszystkie zjawiska odnotowane podczas dotychczasowych prób badawczych, w tym wyboczenia, skręcenia przekroju, rozerwania oraz zmiażdżenia. Badaniu nie podlega podatność połączenia, ani zachowanie struktury podczas obciążeń dynamicznych.

6.5.2 Budowa modelu

Geometrię modelu opracowano w oprogramowaniu Autocad Autodesk. Jego budowa stanowi znaczne uproszczenie względem opracowanych wcześniej modyfikatorów 5-punktowych. Każdy modyfikator stanowi pojedynczy lub zdwojony siłownik mocowany przegubowo do powłoki. Połączenie ze strukturą odbywa się poprzez opracowany wcześniej łącznik lub poprzez uproszczone 4-punktowe połączenie śrubowane wykorzystujące płytę stalową dystrybuującą naprężenia co przedstawiono na Grafika 43, uzyskując redukcję skręcania w układzie. Modyfikatory pozwalają na swobodne wydłużanie oraz skracanie w zakresie zdefiniowanym we wcześniejszych badaniach wynoszącym 5cm wysuwu. Zależnie

od liczby siłowników połączenie z łącznikiem powinno przyjmować układ centralny z siłownikiem na osi symetrii modyfikatora lub dla dwóch siłowników symetrycznie względem osi. Układ ten przedstawiono na grafice Grafika 43. Modelowi w programie Autodesk Inventor nadano parametry fizyczne, a następnie przystąpiono do kształtowania siatki na potrzeby analizy MES. Wszystkie proste, płaskie powierzchnie uzyskiwały minimalną gęstość elementów skończonych z długością boku do 2cm. Zakrzywienia powierzchni szczególnie na łącznikach wymuszały zagęszczenia. Następnie w okolicach otworów, łożysk, fazowań materiałów zwiększano zagęszczenie dodatkowo. Same siłowniki ze względu na złożoną geometrię wymuszają zamodelowanie najdokładniejszej siatki MES, która przyjmuje najgęstszą siatkę w otoczeniu łożysk. Sumarycznie model zbudowany jest z 588 671 węzłów oraz 345 878 elementów skończonych.



Grafika 43. Model siłownika z przedstawieniem graficznych wyników analizy MES. Model przygotowano w oprogramowaniu Autodesk Inventor Professional 2024, a następnie przebadano w Autodesk Inventor Nastran z użyciem nieliniowej analizy statycznej. Plik modelu modyfikatora stanowi załącznik nr 6.A pracy.

Wszystkie miejsca połączeń śrubowanych z powłoką uzyskały usztywnienie naśladujące zachowanie powłoki o znacznej sztywności. Zamodelowano obciążenie własne siłą grawitacji, a następnie przygotowano moduł obciążeń wywoływanych przemieszczeniami kontrolowanymi podpór. 4 usztywnienia pierwszego łącznika pozostają nieruchome, natomiast 4 usztywnienia przeciwległego są przemieszczane w kontrolowany sposób symulując skracanie, bądź wydłużanie modelu. Wygenerowane naprężenia podlegają analizie pod względem wpływu na funkcjonalność modyfikatorów i zdolność przenoszenia maksymalnych sił przez opracowany model.

6.5.3 Badania geometrii modyfikatorów pod obciążeniami modelowymi

Przeprowadzone badania orientowane były na naprężenia generowane kompleksowo w całej strukturze. Skutkowało to znaczną redukcją siatki modelu na potrzeby badań MES. Opracowana według opisu siatka poddana została obciążeniom przemieszczeniowym usztywnień. Dla kolejnych wartości przemieszczenia uzyskiwano informacje o historii zmian naprężeń na poszczególnych częściach modyfikatorów.

W pierwszej kolejności, dla minimalnych przemieszczeń największe naprężenia zlokalizowane były w miejscu połączenia siłownika z mocowaniem do powłoki. Strefa połączenia dla deformacji równej 2mm wzdłuż osi modyfikatora charakteryzowała się maksymalnymi naprężeniami na poziomie 5MPa. Wraz ze wzrostem przemieszczeń do 5mm znacznie wyższe wartości naprężeń generowane były na ramieniu siłownika. Powstawały na nim zauważalne odchylenia o wartości do 0,17mm od osi środkowej, a maksymalne naprężenia wynosiły 15MPa. Powyżej przemieszczenia 5mm odchylenie to rosło nieliniowo osiągając wartość 1mm dla maksymalnego wydłużenia obu siłowników. Dla identycznego procesu obciążania pojedynczy siłownik pozwolił na uzyskanie przemieszczeń maksymalnych 7mm ze względu na wyboczenie powyżej tej wartości. Dwa siłowniki uzyskując znacznie większy moment bezwładności niespełna trzykrotnie podniosły wartość dopuszczalną. Przy przekroczeniu wartości przemieszczenia 32mm następuje zerwanie pierwszych połączeń śrubowanych między modyfikatorem oraz powłoką. Zniszczenie to wywołuje reakcję kaskadową prowadząc do nagłego zniszczenia połączenia.

6.5.4 Wnioski

Model uwzględniający geometrię modyfikatora systemowego pozwala na uzyskanie responsywności w strukturze. Jest ona ograniczona maksymalną wytrzymałością połączenia z powłoką, lecz pozostaje trwała w zakresie dopuszczalnych odkształceń modelu. Wpływ modyfikatora pozostaje zbliżony do wyników pełnego modelu uproszczonego, co wskazuje na zasadność wyposażenia struktury w indywidualnie dobierany system modyfikatorów na cele wprowadzenia responsywności pozwalającej na redukcję strzałek ugięcia i naprężeń w strukturach. Model pozwala na sygnalizację przeciążenia modyfikatorów poprzez ograniczone odkształcenia osi siłowników.

Ze względu na konieczność ręcznej zmiany lokalizacji modyfikatorów opracowany sposób mocowania modyfikatorów do powłoki pozostaje na satysfakcjonującym poziomie pracochłonności i łatwości poprawnego montażu. Należy jednak w procesie dalszych badań zaproponować rozwiązania automatycznego przemieszczania modyfikatorów w obrębie struktury.

6.6 Podsumowanie

W rozdziale przebadano możliwości pojedynczych dyskretnych modyfikatorów punktowych wpływu na sztywność i rozkład naprężeń w strukturach ciągłych. Każdy z przedstawionych układów pozwalał na wymierny wzrost wytrzymałości modelu. Tak modyfikator indywidualny jak i systemy modyfikatorów stanowią efektywne rozwiązania pozwalające na wprowadzenie responsywności do struktury. Szereg topologii układów modyfikatorów zapewnia satysfakcjonującą funkcjonalność na potrzeby prostej struktury umożliwiając półautomatyczne sterowanie przebadanymi dotychczas systemami i układami. Modele matematyczne zostały przebadane tak w skali makro jak i wyekstrahowanym, zamodelowanym z uwzględnieniem warunków brzegowych fragmencie struktury, a ich wyniki potwierdziły zdolność wywołania reakcji systemu na satysfakcjonującym poziomie w odpowiedzi na siły zewnętrzne oraz ich zmiany. Na cele dalszych badań należy opracować fizyczne realizacje modyfikatorów oraz model badawczy, na którym implementacja reakcji mogłaby się odbywać. Badania rzeczywiste mają na celu określenie zgodności działania układów hybrydowych jakimi są powłoki wyposażone w modyfikatory, z symulacjami

przeprowadzonymi na cele fizycznej ewaluacji koncepcji. Stwierdza się odmiennie od [73], że kontrola kierunków dystrybucji naprężeń w strukturach ciągłych może odbywać się skutecznie tak dla sił powierzchniowych jak i punktowych, a globalny wpływ każdego modyfikatora może być wykorzystany do strefowej redukcji naprężeń. Określono szereg tendencji tworzenia układów modyfikatorów w wyniku zmian lokalizacji z użyciem algorytmu ewolucyjnego.

Badania wykazały, że model sterowany algorytmem ewolucyjnym jest w stanie generować efektywne układy modyfikatorów, lecz jednocześnie czas potrzebny na dobór lokalizacji oraz wartości wysuwu poszczególnych modyfikatorów jest zbyt duży, aby zastosować go jako jedyny model zachowań struktury responsywnej. Niepewność uzyskania pełnej skuteczności w generowaniu układów o mniejszych naprężeniach niż referencyjne statyczne struktury motywuje fakt konieczności stosowania dodatkowych modeli zachowań. Wykazano, że wraz ze wzrostem liczby modyfikatorów podnosi się skuteczność pracy całego systemu, lecz podnoszenie liczby modyfikatorów wiąże się z wykładniczym dalszym wzrostem czasu obliczeniowego. Model stanowi więc odpowiedni moduł pozwalający na generowanie gotowych zachowań nasycających matrycę sztywnych reakcji. Opisana w procesie badań charakterystyka potwierdza słuszność pierwszej tezy pracy o niezdolności algorytmu ewolucyjnego do samodzielnego kontrolowania modeli zachowań, w obrębie indywidualnych i systemowych modyfikatorów powłok.

Wyniki badań stanowiące informacje o lokalizacjach modyfikatorów na obecnym etapie analiz nie pozwalają na określenie schematu zachowań systemu i efektywnych układów w przypadkach analogicznych obciążeń. Zakłada się, że schemat zachowań jest złożony i wymaga bardzo rozbudowanej grupy badawczej analizowanej z użyciem automatycznych rozwiązań do sformułowania sposobów interpolacji wyników w celu reagowania na wszystkie możliwe obciążenia. Zauważa się odmienne zachowanie struktury dla modyfikatorów lokalizowanych w różnych segmentach modelu co stanowi nowy wniosek względem dotychczasowych badań responsywności. Wyniki i wnioski interpretacji geometrycznej wskazują na prawdziwość drugiej tezy pracy predestynującej algorytm ewolucyjny do poszukiwań takich oraz podobnych naturalnie złożonych schematów zachowań struktur responsywnych.

7. Kontrola geometrii i rozkładu naprężeń struktur ramowych z wykorzystaniem koncepcji modyfikatorów węzłowych

7.1 Wstęp

Struktury ciągłe charakteryzują się liniowym przebiegiem zmian krzywizny. Związane jest to z równomierną dystrybucją naprężeń pozwalającą na dokładniejszą predykcję rozkładu momentów gnących i sił wewnętrznych. Znacząco podnosi to wymagania efektywności wobec modyfikatorów dla struktur dyskretnych. Struktury dyskretne ze względu na nieobecność elementów ciągłych charakteryzują się znacznie uproszczonymi zasadami poszukiwania lokalizacji osadzania modyfikatorów. Elementy te mogą znajdować się w obrębie prętów, podpór, lub węzłów. Każdy rodzaj strefy wymaga odmiennego podejścia w kształtowaniu układów. Dotychczas badano osadzanie siłowników w strefach podporowych umożliwiających operowanie sztywnością podpór, obrotem struktury i przemieszczeniem punktów podparcia. Najczęstszą formą wprowadzania ruchu do struktury pozostaje nadal zamiana części prętów na siłowniki. Mimo iż każdy sposób implementacji responsywności umożliwia inny zakres ruchów to w znacznej części zakresy te się pokrywają. Redukcja ugięć, redystrybucja naprężeń, sprężenie stref krawędziowych realizowane w różny sposób pozwalają na uzyskanie satysfakcjonujących rezultatów. Pewne ruchy jednak pozostają charakterystyczne tylko dla jednej formy implementacji siłowników. Obciążenia powierzchniowe wpływające na deformacje całej struktury kompensowane są efektywnie przez ruch podpór, lecz teleskopowane pręty pozwalają na precyzyjną odpowiedź części struktury w miejscu wystąpienia obciążenia skupionego. Dla struktur powierzchniowych dowiedziono skuteczności wykorzystania punktowych modyfikatorów przy występowaniu obciążeń zmiennych, lecz ich lokalizacja pozostaje zagadnieniem wymagającym pogłębionych badań. Od lokalizacji z kolei zależna jest w dużym stopniu skuteczność.

W strukturach ramowych i prętowych zauważa się mocno uproszczony sposób implementacji ruchu. W badaniach struktur responsywnych prętowych wyróżnia się dwa podstawowe sposoby lokalizacji siłowników w strefach prętowych. Pierwszym jest układ bezpośredni polegający na zastępowaniu statycznego pręta elementem teleskopowanym [67]. Jest to najprostsza forma implementacji ruchu w modelu jednak dla uzyskania redukcji naprężeń lub ugięć operuje ona geometrią poprzez duże zmiany co opisane było we wcześniejszych rozdziałach pracy. Zauważalna zmienność struktury znacząco utrudnia jej użytkowanie co również stanowiło zakres opracowania. Realizowane „dużymi zmianami” [89] modyfikacje struktury, wpływają na naprężenia pośrednio ze względu na sztywny, lecz nie przesztywniony charakter struktury. Usztywnienie jest uzyskiwane doborem początkowej topologii i pozostaje pozorne ze względu na zdolność węzłów do obrotu w celu dostosowania do zmienności w czasie oraz zdolności prętów do teleskopowania. Model taki nie indukuje większych wartości naprężeń wewnętrznych poruszanych elementów, lecz w wyniku ruchu największymi zmianami wartości naprężeń i reakcji charakteryzują się podpory [68].

Drugim, alternatywnym sposobem lokalizacji siłowników pozostaje układ równoległy [95]. Polega on na nadmiarowym doborze elementów strukturalnych. Wzdłuż części elementów dyskretnych lokalizowane są siłowniki, które łączy się w sposób przegubowy w węzłach razem ze statycznymi prętami referencyjnymi. Zadaniem siłowników jest w takiej strukturze wywoływanie naprężeń kompensujących te, pochodzące od sił zewnętrznych. Sterowanie strukturą sprowadza się do ustalenia jaką część naprężeń przejmie odpowiadający danemu prętowi siłownik. Metoda ta wymaga użycia znacznie precyzyjniejszych siłowników o wyższej wytrzymałości ze względu na znacznie wyższe wartości naprężeń generowane na prętach w wyniku ruchu. Przy pominięciu minimalnych zmian geometrii w wyniku odkształceń sprężystych lub częściowo plastycznych założyć można statyczność struktury. Wszystkie elementy nośne mogą być sztywno osadzone, a system ruchu może być obsługiwany

niezależnie od struktury nośnej. Badania pokazują znaczne zyski z zastosowania drugiego z systemów [70]. Wzrost efektywności widoczny jest przede wszystkim w redukcji energii użytkowej potrzebnej na cele ruchu obiektu [93].

7.2 Koncepcja ruchu modyfikatorów ramowych

7.2.1 Założenia teoretyczne ruchu oraz kontroli geometrii

Przedstawione metody realizacji ruchu znacznie ograniczają możliwości lokalizacji siłowników oraz sposobów ich ingerencji w strukturę. Dowolnie prosta redukcja naprężeń na danym elemencie nośnym wymaga wywołania znacznych naprężeń na siłowniku lub koordynacji współpracy szeregu siłowników. Zmniejszenie strzałki ugięcia pojedynczego elementu odbywa się w sposób pośredni ponieważ nie istnieje możliwość podparcia elementu aktywnym aktuatorem. To oznacza, że wszelkie deformacje schodzące się w węźle i na nim wywołujące największe przemieszczenia oraz rotacje nie mogą być efektywnie kompensowane lub wymagają znacznego nakładu obliczeniowego w celu wyznaczenia kompleksowych zachowań systemu. Kompleksowość idąca w sukurs znacznym naprężeniom negatywnie oddziałuje na trwałość struktur ruchomych [71]. Szczególnie na redukcje wytrzymałości i odkształcenia narażone są elementy elektroniczne oraz węzły. Te drugie stanowią najczęściej fragment struktury o najmniejszej wytrzymałości. Trudny do uchwycenia w ich realizacji jest strukturalny kompromis między sztywnością, a zmiennością. Częstym zabiegiem w symulacjach jest pominięcie problemu węzłów [93], natomiast w strukturach istniejących dąży się do redukcji obrotu połączeń węzłowych [75], lub użycia elementów o przewymiarowanej geometrii dla których granica nośności nie zostanie naruszona. Zauważa się, że węzły struktur responsywnych ze względu na wymogi zróżnicowanych granic motoryki w różnych kierunkach charakteryzują się pełną indywidualnością wykonawczą. Istnieją opracowania przedstawiające problem indywidualności węzłów i pewnej automatyzacji ich kształtowania, w której uwzględnia się konieczność ruchu poprzez umożliwienie odkształceń sprężystych w pewnej bezpiecznej granicy [169]. Geometrie węzłów dobierane są tak, aby zgięcie następowało w zadanych płaszczyznach. Nadal jednak wymaga to indywidualnego przygotowania każdego węzła co jest pracochłonne i zwiększa możliwość wystąpienia błędów wykonawczych. Możliwość operowania sztywnością węzła oraz co ważne precyzyjna dystrybucja naprężeń na węźle między wszystkie schodzące się w nim elementy nośne może pozwolić na prosty i skuteczny model responsywności struktury. Dotychczas rozpatrywano wyłącznie przypadki obciążeniowe, w których wszystkie siły przykładane są w węzłach. Uproszczenie to w rzeczywistych strukturach prowadzi do znacznego zróżnicowania wyników symulacji oraz rzeczywistych zachowań struktury [71]. Gdy obciążeniu podlega pojedyncza belka, słup lub pręt, struktura bardzo szybko przekracza granice deformacji ze względu na brak usztywnienia elementów nośnych w węzłach. Wprowadzenie sztywnego połączenia znacznie usztywnia całą strukturę wymuszając znacznie precyzyjniejsze operowanie nią, lecz zwiększa wytrzymałość na obciążenia niewęzłowe. Rozwiązaniem takim, znanym najczęściej z drewnianych więźb dachowych jest zastrzał, w mniejszej formie określany również terminem miecza. Stosowany w celu usztywnienia elementu poziomego mógł stanowić pojedyncze wzmocnienie belki lub krokwi, lecz najczęściej stosowany był w rozwiązaniach wielozastrzałowych. Rozwiązanie to wpływa na długość wyboczeniową belki. Zastrzał nie przejmuje naprężeń, lecz kompensuje odkształcenia pozwalając na osiową pracę elementu nośnego. Pozwala to na redukcję masy elementu nośnego, szczególnie ze względu na wymagania spełnienia warunku stanu granicznego użytkowalności. Zastrzały przez znaczną część użytkowania obiektu przenoszą jeden rodzaj naprężeń. Prowadzone od słupa w górę jako ramiona przenoszą siły ściskające, natomiast skierowane od słupa w dół, rozciągane jako nogi muszą być wyposażone w odpowiednie połączenia zapobiegające łatwemu wyrwaniu zastrzału z konstrukcji. Zastrzał o odpowiedniej proporcji wielkości względem pozostałych elementów ramy przypisać można do strefy węzłowej tworzącej bardziej złożone połączenie, gdzie wszystkie elementy wzajemnie oddziałują uzyskując znacznie wyższą sztywność. Możliwe jest jednak dodatkowe podniesienie parametrów fizycznych struktury poprzez

możliwość operowania długością zastrzału. Przegięcie belki w kierunku przeciwnym do strzałki ugięcia wywołuje wstępne sprężenie pozwalające na wzrost dopuszczalnej deformacji przed wystąpieniem zagrożenia w strukturze. Wprowadzenie ruchu stanowi rozwiązanie architektury responsywnej i podlega badaniu skuteczności działania oraz zdolności implementacji w strukturach dyskretnych.

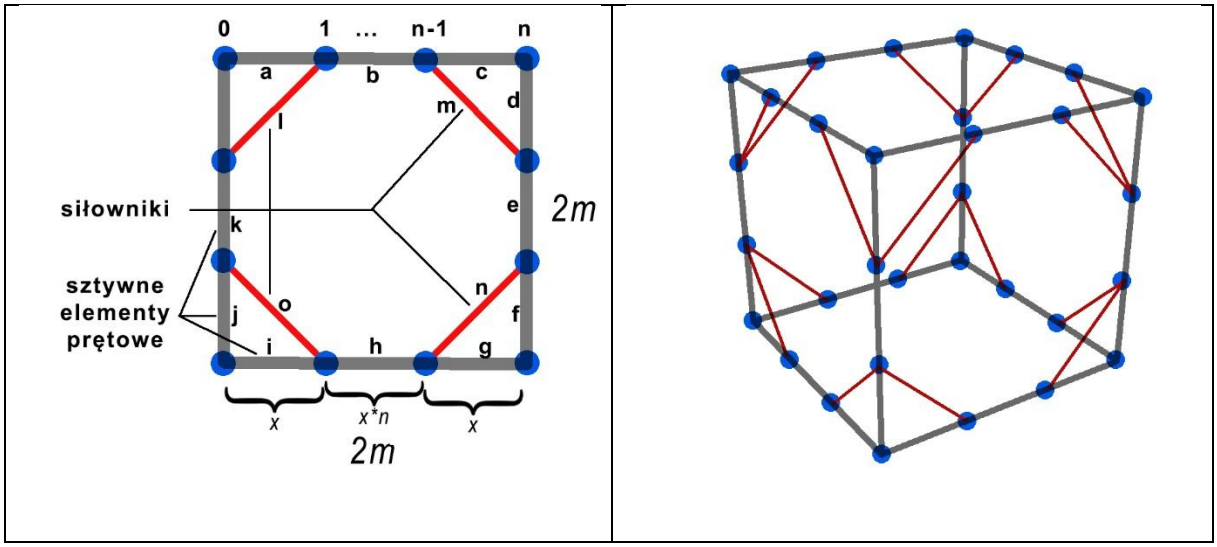
Struktury dyskretne najczęściej charakteryzują się wytrzymałością wyznaczaną nośnością i sztywnością węzłów. Problematyka zagadnienia zniszczenia węzła jest znacznie szersza dla struktur responsywnych i poza standardowymi zjawiskami wymagającymi symulacji jak skręcenie, czy zwichrzenie w strefie węzłowej, pręty narażone są na zjawiska przekroczenia nie osiowości pracy opisywanej w rozdziale 5, czy nierównomierności dystrybucji naprężeń powodowanej znaczną liczbą połączeń przegubowych. Najczęstszą formą zabezpieczania struktur ruchomych jest nadmiarowość elementów, przekrojów i systemów sterowania. Rozwiązanie to obecnie jako jedyne pozwala na uzyskanie satysfakcjonującego stopnia bezpieczeństwa użytkowania struktur o zmiennej geometrii. Mimo szeregu badań opisujących operowanie zmiennością prętów, cięgien lub słupów i belek w strukturach ramowych[66], [128], [170] nie powstały dotychczas opracowania w których obiektem implementacji responsywności byłby węzeł.

Ze względu na tendencje do jego niskiej wytrzymałości względem pozostałych elementów struktury przytoczona wcześniej nadmiarowość może stanowić dla węzła rozwiązanie problemu. Nadmiarowość ta jednak realizowana poprzez użycie elementów aktywnych dotychczas nie analizowana, wymaga zbadania dla jakich parametrów i warunków efektywność implementacji rozwiązania daje wymierne korzyści względem struktur statycznych. Zakłada się dwa potencjalne scenariusze. Węzeł responsywny może odpowiadać na zmiany sił zewnętrznych w celu redukcji naprężeń przez niego dystrybuowanych w celu uniknięcia przekroczenia wartości krytycznych naprężeń co przekłada się na zmianę scenariusza zniszczenia struktury, z dotychczas nagłych węzłowych na sygnalizowane, liniowe zniszczenia o bezpieczniejszym przebiegu powodowane przeciążeniami prętów. Może również kierunkować przepływ naprężeń w celu odciążenia części struktury narażonej na przeciążenia poprzez zmiany sztywności i przekierowanie sił wewnętrznych według ustalonych odgórnie proporcji z elementu krytycznego na mniej wytężone. Obie celowości ruchu mogą występować w jednej strukturze podczas pojedynczego ruchu, finalnie pozwalając na zwiększenie bezpieczeństwa użytkowania struktury.

W celu przebadania efektywności idei użycia responsywnych węzłów do zwiększenia bezpieczeństwa i zmniejszenia naprężeń opracowano model badawczy struktury statycznej ramowej o prostym module sześciennych, w której wszystkie węzły wyposażono w odpowiednią liczbę modyfikatorów stężenia. Bazowanie na module kwadratowym pozwala na ujednolicenie wszystkich połączeń i uniformizację węzłów. Pozwoli to na rozwiązanie problemu multiplikowania węzła dla większych struktur. Jednocześnie kwadrat pozostając mniej sztywnym od trójkąta nadal pozwala na pewne deformacje w zakresie kontrolowanych zmian. Zmienność ta przedstawiona ideowo na Grafika 44 wprowadza większą liczbę elementów do modelu. Ponadto wymusza więcej połączeń i analizy ich wpływu na zachowania struktury. Każdy moduł kwadratowy wyposażony jest w 4 modyfikatory co przekłada się na 4 parametry sterowane modelem zachowania. Każdy siłownik ma zakres ruchu proporcjonalny do sztywności struktury.

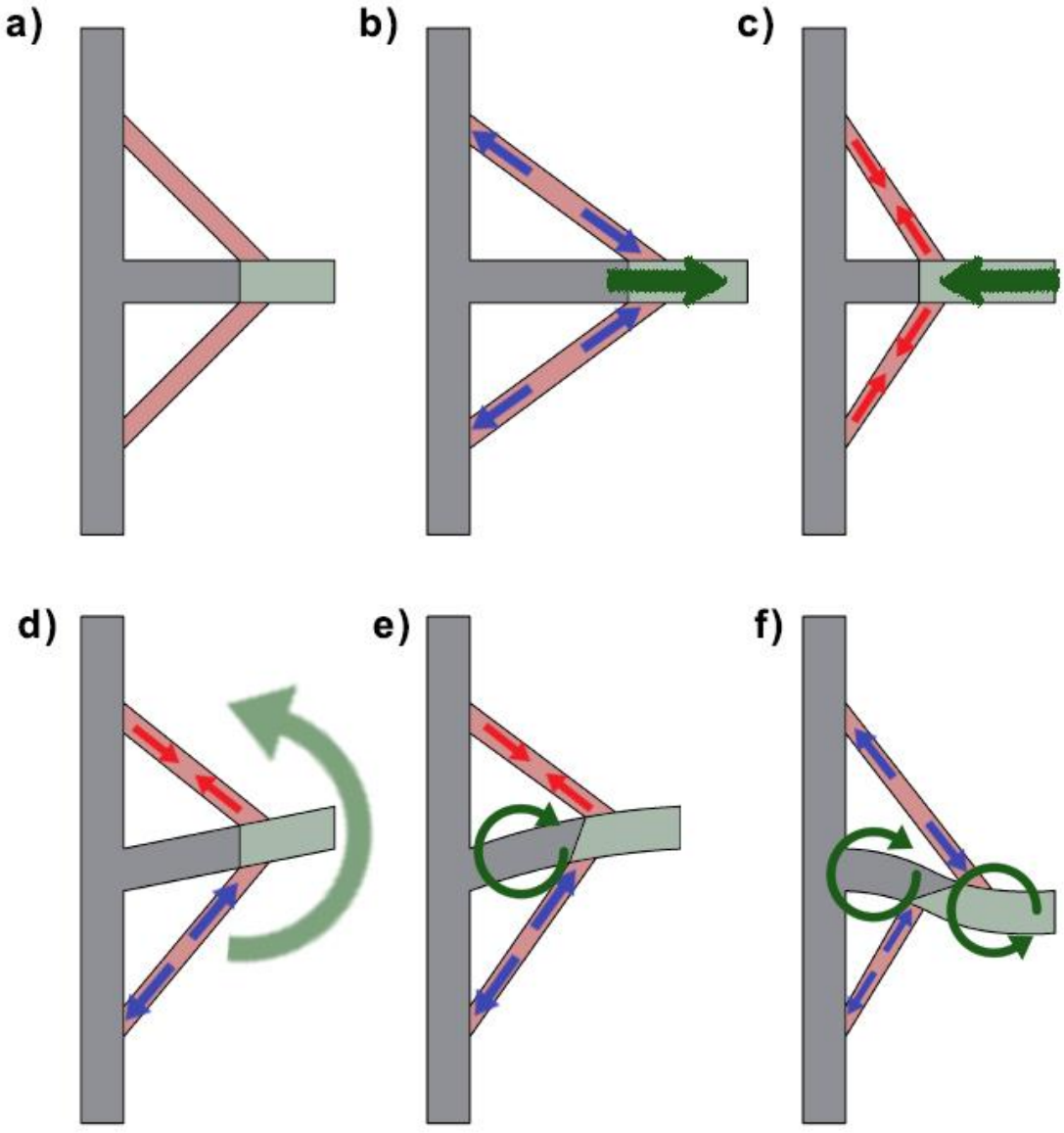
Grafika 44 przedstawia koncepcję pojedynczego modułu. Charakteryzuje się on grupą 12 stałych elementów połączonych wzajemnie w sposób sztywny lub wykonanych jako 4 ciągłe elementy łączone w narożach w sposób węzłowy. Budowa modułu jest możliwie powtarzalna w celu uniwersalizacji realizacji analogicznej struktury. 4 siłowniki oznaczone kolorem czerwonym w narożach łączą każdorazowo dwa styczne do siebie w węźle pręty. Dzięki takiemu połączeniu siłownikiem zależnie od stopnia wysuwu aktuatora możliwy jest chwilowy dobór stopnia sztywności połączenia do zmian sił zewnętrznych oddziałowujących na strukturę. Połączenia dzielą każdy pręt na 3 części. Konieczne jest rozróżnienie ich pracy. W

celu uzyskania zmienności geometrycznej w zakresie odkształceń sprężystych należy zwrócić uwagę na proporcję sztywności siłowników do prętów. Łączenie modułów jak zostało to przedstawione na schemacie po prawej stronie powoduje zwielokrotnienie siłowników oddziałujących na ten sam węzeł oraz w tych samych kierunkach. Wymusza to wykonanie połączeń przegubowych wszędzie gdzie łączony jest siłownik z prętem. Połączenie przegubowe wymusza symultaniczną pracę przeciwległych siłowników, lecz daje znacznie szersze spektrum ruchów na potrzeby operowania węzłem lub jego częścią.



Grafika 44.Koncepcja modularnej struktury modyfikatorów oraz sposobu sterowania zmianami geometrii struktur sztywnych węzłowo.

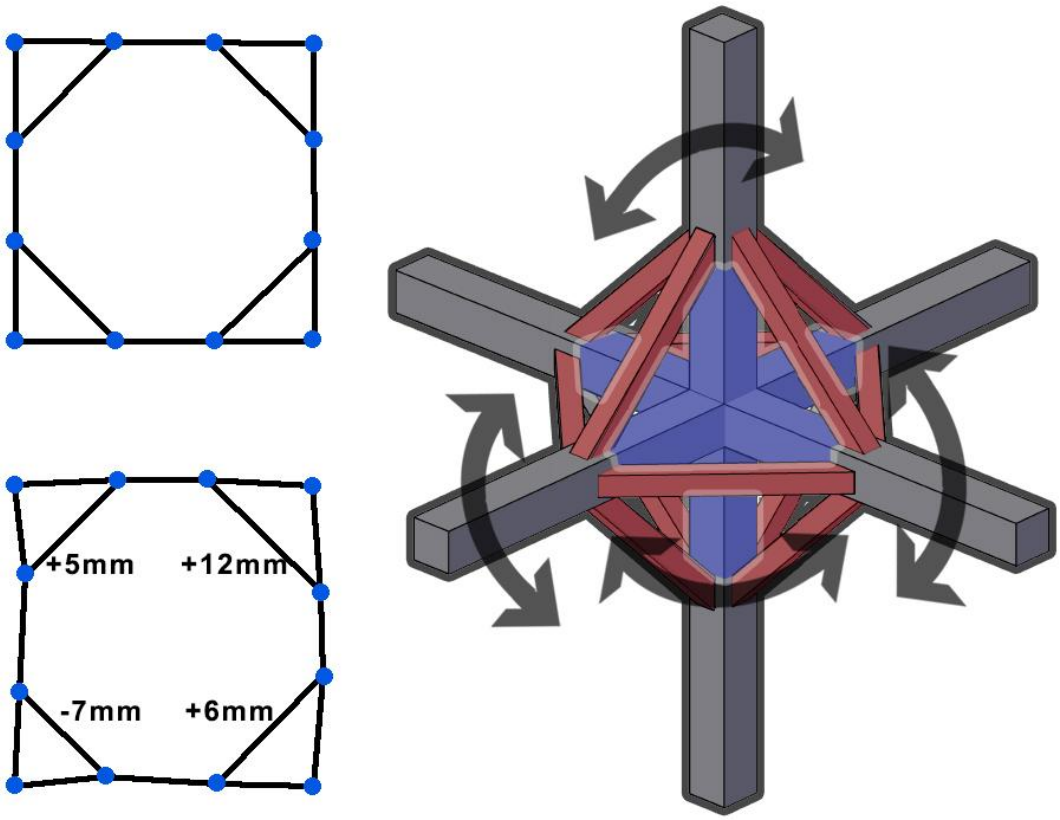
Poza prostą rotacją pręta w strefie węzłowej możliwe jest również oddziaływanie osiowe poprzez wyindukowanie naprężeń ściskających lub rozciągających. Wymaga to precyzyjnej koordynacji pracy obu przeciwległych siłowników, jednak pozwala na zachowanie dotychczasowej puli ruchów realizowanych układami równoległymi lub bezpośrednimi rozszerzając funkcjonalność o ruchy węzłowe. Na Grafika 45 przedstawiono wszystkie formy ruchu jakie oferuje zmiana geometrii wykorzystująca dwa ukośne węzłowe siłowniki. Grafika „a)" prezentuje układ referencyjny dla zerowych sił wywołanych aktuatorami bez uwzględnienia naprężeń od obciążeń masą własną struktury. Dla referencyjnej geometrii zakłada się brak udziału siłowników w dystrybucji naprężeń i pełną podatność na odkształcenia. Zakłada się, że swobodnie zamocowany siłownik w każdej geometrii i dla każdego układu sił zewnętrznych, generujących odkształcenia w zakresie sprężystym, może swobodnie dostosowywać swoją długość, aby nie wpływać na sztywność układu. Układ ten może występować tak dla zerowych obciążeń zewnętrznych jak i pełnego obciążenia struktury. Mogą występować rotacje i przemieszczenia węzłów jeśli wywoływane są one przez niezerowe przypadki obciążeniowe.



Grafika 45.Sposoby wpływu na geometrię strefy węzłowej struktury z wykorzystaniem modyfikatorów.

Przypadek „b” oraz „c” są wzajemnie komplementarne. Pierwszy realizowany jest poprzez symultaniczne równomierne rozciąganie obu siłowników, drugi poprzez analogiczne skracanie. Wywołują one kolejno rozciąganie oraz ściskanie stref węzłowych oraz przeciwne zwroty sił wewnętrznych w strefach środkowych prętów. W obu ruchach precyzja teleskopowania i kontrola równoległości teleskopowania jest kluczowa. Dla zwiększających się sił wywołanych ruchem siłowników mniejsza niedokładność ruchu jednego z siłowników wywołuje postępujący obrót strefy węzłowej zastępując siły osiowe równoważnymi momentami zginającymi. To z kolei prowadzi do kaskadowego spadku sztywności struktury analogicznego do usunięcia zginanego pręta i zastąpienia go siłami punktowymi w węzłach na obu jego końcach. W celu zapobiegania zjawisku należy opracować systemy blokowania siłowników o mniejszym wysuwie na których wystąpią siły ściskające w razie wystąpienia opisywanego zjawiska. Ruchy od „d” do „f” pozostają możliwe do wykonania jedynie dla siłowników lokalizowanych zgodnie z opisywaną koncepcją. Ruch „d” stanowiący czysty obrót pręta polega na koordynacji rozciągania jednego siłownika i ściskania przeciwległego tak, aby odległość mocowania siłowników do obracanego pręta pozostawała możliwie równa podczas

całego ruchu. Oznacza to ruch połączenia po okręgu. Działanie to aktywnie redukuje długość wyboczeniową pręta jednostronnie lub obustronnie zależnie od potrzeb. Dodatkowo przy utracie osiowości elementu nośnego kompensowana jest rotacja węzła. Oznacza to, że model w pewnych granicach obciążeń pozostaje w pełni usztywniony analogicznie do realizowanych już badań [71] . Ruch „e" charakteryzuje się podobieństwem do „d", lecz wywołuje zginanie na pręcie, a nie w strefie węzła. Powodowane jest minimalnym rozminięciem teleskopowania jednego z siłowników względem drugiego. Wywołany moment zginający pozwala znacznie efektywniej zmniejszyć ugięcie na operowanym elemencie nośnym. Ruch „f" jako najbardziej złożony w realizacji pozwala na przeciwdziałanie wyboczeniu w przypadku jego wykrycia. Powoduje on charakterystyczny układ strefy przywęzłowej i mocowania. W wyniku symultanicznej identycznej pracy modyfikatorów po obu stronach elementu nośnego zakłada się co najmniej częściowe przywrócenie osiowości elementu. Opisywane wygięcie usztywniając znaczną część elementu zwiększa chwilowo jego bezpieczeństwo. Z kolei poprzez wygięcie pręta przy pełnej osiowości zaburza ją i generuje na pręcie w sposób sztuczny najbardziej podatną strefę struktury. Pozwala ona na dobór scenariusza stopniowego zniszczenia struktury, gdy istnieje możliwość wystąpienia scenariusza nagłego.



Grafika 46.Schemat strefy węzłowej struktury ramowej. Grafika przedstawia złożoność sterowania każdym z elementów modelu. Ruch wykonywany jest w 3 płaszczyznach dla wszystkich belek oraz słupów.

Dąży się do uzyskania unifikacji wszystkich węzłów z pominięciem węzłów zewnętrznych w których nie z każdej strony przyłączone są elementy nośne. Pełny uniwersalny węzeł przedstawiono na Grafika 46. Z lewej strony przedstawiono sposób działania pojedynczego modułu płaskiego z 4 siłowników i 4 prętów. Z prawej strony pokazano pełny węzeł wyposażony w 12 siłowników. Rozszerza on dodatkowo funkcjonalność ruchu. Przedstawione na poprzednim schemacie sposoby ruchu dla pełnego węzła mogą występować w 2 płaszczyznach. Powoduje to znaczną komplikację operowania modelem. Jednocześnie wydłuża czas potrzebny na obliczenie efektywnego ruchu ze względu na konieczność dostosowania i skoordynowania większej liczby wartości teleskopowania.

Opisane wcześniej zachowania modelu każdorazowo wymagają współoperowania symultanicznego minimum dwoma siłownikami. Gdy zmianie długości podlega jeden siłownik w danym węźle, wszystkie pozostałe 3 siłowniki przynależne do danego pręta muszą podlegać dostosowaniu. W innym wypadku wywołają nieplanowane naprężenia i skręcanie. Dla stosowanych dotychczas algorytmów koordynacja działania elementów przeprowadzana jest na dalszych etapach analizy i poprzedzona jest prostymi ruchami pojedynczych elementów.

Koncepcja węzła wyposażonego w modyfikatory rozdziela każdy pręt na 3 sekcje. Dwie skrajne znajdujące się między właściwymi węzłami, a mocowaniem modyfikatorów stanowią odcinki węzłowe. Oznaczone kolorem niebieskim są wszystkie odcinki węzłowe tworzące wraz z siłownikami wirtualny węzeł. Środkowa strefa między mocowaniami modyfikatorów stanowi dopiero właściwy pręt i dla niego w najkorzystniejszym układzie sił obliczana jest długość wyboczeniowa dla połączenia sztywnego. Zasadne jest różnicowanie sztywności poszczególnych odcinków elementów nośnych. W strefie węzłowej wykorzystanie przekrojów zmniejszonych względem reszty struktury ułatwia operowanie modelem. Z kolei środkowa część pręta powinna być możliwie sztywna we wszystkich kierunkach poza głównymi wzdłuż których następuje obrót na węzłach poprzez siłowniki. Rozważaniom podlega stopień operowania prętami w węzłach. W pełnym układzie każdy pręt operowany jest przez 4 siłowniki. Alternatywnie możliwe jest sterowanie dwoma współpłaszczyznowymi lub dwoma nie współpłaszczyznowymi, bądź pojedynczym zapewniającym obrót tylko w jednym wybranym kierunku. Efektywność wszystkich rozwiązań podlega sprawdzeniu w dalszej części pracy.

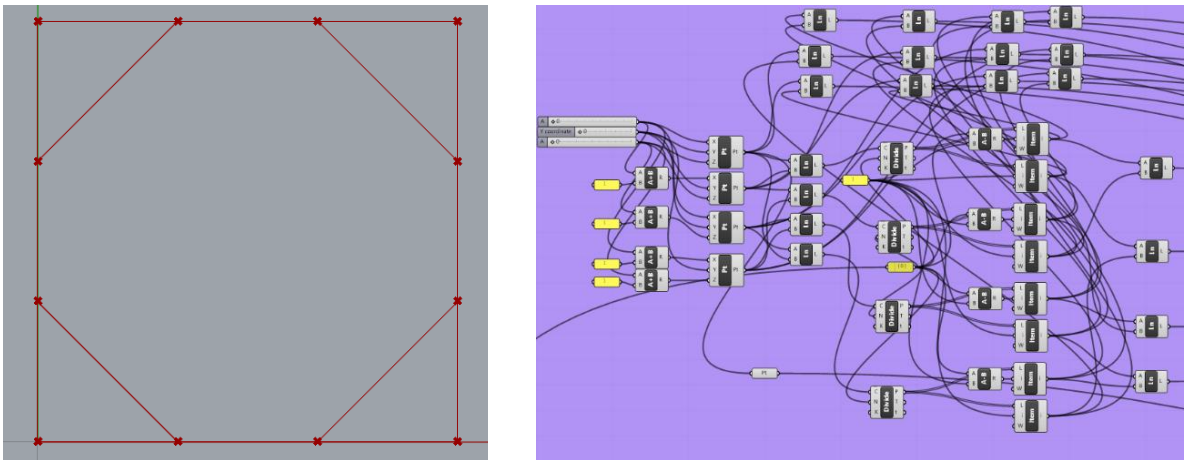
Opracowany model struktury służy głównie kontroli i redukcji deformacji i przemieszczeniom występującym w strukturze w wyniku oddziaływania sił zewnętrznych. Omawiana dotychczas trudność reakcji przy zbyt dynamicznie zmiennych przypadkach obciążenia jest prosta w niwelacji. Każda zmiana przypadku obciążenia może powodować usunięcie sztucznie wywołanych naprężeń na siłownikach wywołując pełną relaksację modelu. Warunkiem wystarczającym pozostaje by struktura miała nośność pozwalającą na przenoszenie naprężeń w pewnych granicach sił zewnętrznych. Jest to działanie analogiczne do stosowanych powszechnie w badaniach rozwiązań naruszania stanu granicznego użytkowania bez naruszania stanu granicznego nośności [74].

7.2.2 Budowa modelu badawczego

W celu przebadania funkcjonalności modelu i opisywanej zdolności do redukcji deformacji struktury przygotowano model badawczy z wykorzystaniem oprogramowania Rhinoceros Grasshopper. Struktura do badań została zamodelowana zgodnie z opisywaną logiką budowy. W pierwszej kolejności wykonano pojedynczy funkcjonalny moduł, a następnie powielając go, przygotowano ostateczną formę struktury ramowej z pełną pulą siłowników.

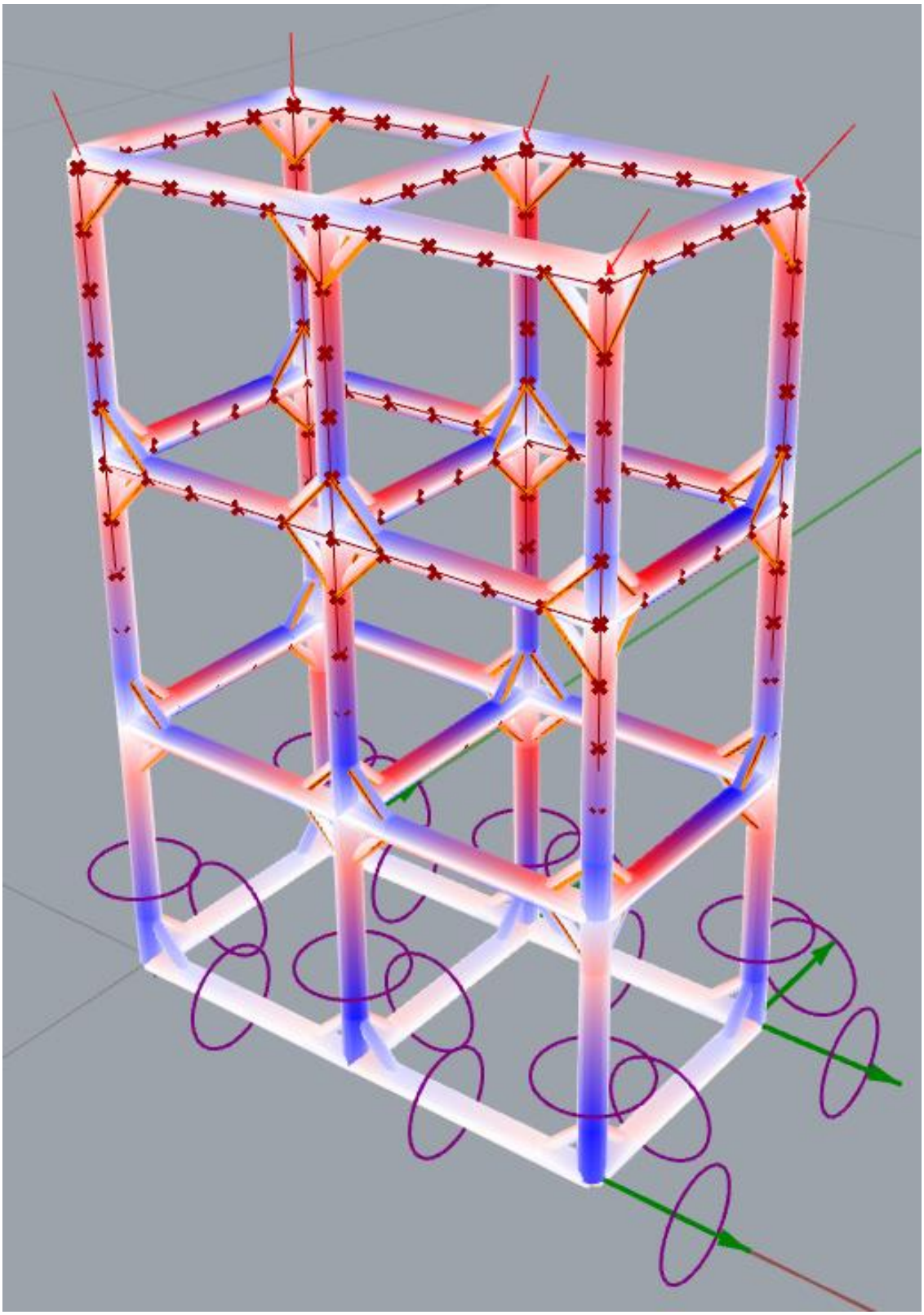
Modelowanie rozpoczęto od określenia punktów węzłowych oraz mocowań siłowników. Między kolejnymi 12 punktami rozciągnięto 16 linii reprezentujących pręty i siłowniki. Na etapie formowania geometrii nie różnicuje się jeszcze przekrojów elementów. Wszystkie linie połączono jak przedstawiono na grafice Grafika 47 tworząc szkielet pojedynczego modułu. Aby moduły mogły być w łatwy sposób przemieszczane ich geometrię oparto na pierwotnie 4 odcinkach krawędziowych, które wtórnie podzielono metodą ***„divide”***. Po podziale każdy drugi punkt oznaczony „1” i przedostatni punkt „n-1” na krawędzi łączony jest z komplementarnym punktem na sąsiednim odcinku. Dzięki takiej budowie modelu w prosty sposób można dobierać wielkości siłowników jako rozciągnięte między punktami powstałymi z podziału odcinków na 3 równe, krótsze odcinki, lub większą ich liczbę. Optymalna wartość tego parametru podlega dalszym badaniom. Jako wartość domyślną dobrano podział na 5 odcinków co wyznacza długość siłowników jako równą $40\sqrt{2}$cm. Dla każdego modułu przygotowano dwie formuły określania parametrów fizycznych i geometrycznych. Pręty statyczne łączone w sposób sztywny w węzłach charakteryzują się przekrojem krzyżowym ukośnym o największych momentach bezwładności przypadających na osie ustawione pod kątem 45 stopni względem płaszczyzn w których odbywać się będzie kontrolowana rotacja

węzłów. Dobrano dla nich szerokość i wysokość przekroju jako równe 15cm o grubości ścianek 1cm. Z kolei dla siłowników zastosowano geometrię pierścieniową przekroju o średnicy zewnętrznej 5cm i grubości ścianki 0,5cm, aby zachować proporcjonalną wytrzymałość we wszystkich kierunkach. Wszystkim elementom nadano właściwości fizyczne jako równe stali niskowęglowej ASTM A36. Dobór motywowany jest zamiarem wprowadzania znacznych odkształceń sprężystych w strukturze. Zmniejszenie udziału węgla w składzie stali uplastycznia jego strukturę dlatego też zdecydowano się na konkretny typ stali. Podczas analizy wytrzymałości elementów struktury, jest uwzględniana zmienna długość siłowników, a wyboczenie obliczane jest dla mocowania przegubowego obrotowego w jednej płaszczyźnie. Grafiki prezentują logikę budowy modelu w programie na potrzeby symulacji. Pojedynczy moduł przygotowano w trzech wariantach różnicowanych orientacją. Jeden w osi XY, drugi XZ, trzeci YZ. W celu zamodelowania pełnej struktury multiplikowano moduły duplikując tym samym część elementów. Nakładanie linii jest odczytywane przez program jako sztuczne i celowe zdwojenie wytrzymałości danego elementu, dlatego w celu uniknięcia wpływu zjawiska na wyniki badań model podłączono do modułu ***„reduce duplicated lines”***, odpowiadającego za usuwanie nadmiarowych osi elementów nośnych w obszarze o zadanej tolerancji geometrycznej równej dla modelu 0,1cm. Same moduły, co przedstawiono na schemacie mają długość boku 2m. W takim też module kształtowana jest finalna struktura poddawana dalej analizom.



Grafika 47.Schemat blokowy programu sterowania pojedynczym modułem wyposażonym w siłowniki wraz z pełnym modułem. Wraz ze wzrostem liczby modułów w sposób nieliniowy wzrasta stopień złożoności ruchu.

Do badań wybrano geometrię struktury o wymiarach liczonych w modułach 1x2x3 (długość, szerokość, wysokość). Model oparty jest na 6 podporach nieprzesuwnych sztywnych zlokalizowanych na wysokości 0,0 modelu. Podobnie wszystkie połączenia węzłowe statycznych elementów łączone są wzajemnie w sposób sztywny bez określania metody realizacji połączenia dla hipotetycznej fizycznej realizacji. Dobrana geometria struktury wyczerpuje problem wpływu złożoności formy na naprężenia oddziałujące na pojedynczy węzeł i zachowanie siłowników. Model do symulacji finalnie składa się ze 138 elementów stałych nie podlegających teleskopowaniu o sztywniejszej geometrii oraz 84 siłowników, na Grafika 48 reprezentowanych przez wyraźnie podatniejsze elementy.



Grafika 48.Pełny model badawczy złożony z połączonych modułów elementarnych wraz z układem podpór. Model stanowi załącznik nr 7.F pracy.

Wszystkie siłowniki sterowane są parametrem rozciągnięcia symulowanym poprzez kontrolowane wydłużanie elementów o zadane wartości liczone w milimetrach. Teleskopowanie elementu ukośnego wywołuje obrót pręta względem węzła. Ustalono maksymalne teleskopowanie siłowników jako równe 2cm odpowiednio w obu kierunkach. Skok zmiany wartości wysuwu ustalono jako równą 0,04cm uzyskując pulę 100 kolejnych wartości

wysuwu siłowników. Dla każdego z nich zastosowano osobny moduł zmiany długości oraz przydzielono osobny parametr sterowania wysuwem. Sumarycznie pozwala to na uzyskanie 100^{84} układów siłowników, lecz tylko część jest możliwa do uzyskania ze względu na opisywaną wcześniej komplementarność siłowników przeciwległych. Przeszukiwanie puli rozwiązań w celu uzyskania efektywnych układów oparte jest o tezę istnienie szeregu geometrii możliwych do uzyskania przy zadanych parametrach symulacji i ruchu struktury. Drugą tezą jest kompleksowość oddziaływań naprężeń w każdym węźle czyniąca nieefektywnym proste podejście iteracyjnej redukcji obrotów kolejno na wszystkich węzłach we wszystkich płaszczyznach. W celu badania tendencji zachowań modelu zdecydowano się wykorzystać algorytm ewolucyjny.

7.2.3 Przygotowanie prób badawczych

W celu ewaluacji wyników przygotowano część programu odpowiedzialną za zbieranie danych o modelu. Jako najważniejsze przygotowano obliczanie obrotów na węzłach. Dla każdego węzła obroty w każdej płaszczyźnie sumowane są wektorowo dając wynikową w postaci przestrzennego kąta obrotu. Spośród wszystkich wartości obrotu przy każdej iteracji następuje znalezienie aktualnie najwyższej wartości obrotu. Wartość ta stanowi wynik dla algorytmu ewolucyjnego. Oznacza to, że algorytm nie otrzymuje informacji, który węzeł podlega największemu obrotowi, ani czy między iteracjami wartość dowolnego węzła nie przewyższyła wartości podlegającego dotychczas największemu obrotowi. Dodatkowo rejestrowana jest średnia wartość obrotu wszystkich węzłów, strzałka ugięcia struktury oraz naprężenia maksymalne, a także średnie.

Każdy parametr podłączono jako dane wejściowe do modułu algorytmu ewolucyjnego. Określono cel jego działania na minimalizację jednego z parametrów analizy oraz zdefiniowano czas badania na 7 minut lub ograniczenie analizy do 5000 geometrii.

W celu zasymulowania obciążeń zewnętrznych zamodelowano szereg wartości i układów sił oddziałujących na obiekt. Wszystkie obciążenia mają charakter powierzchniowy rozłożony na węzły zewnętrzne struktury. Obciążenia zawierają się w przedziale -10kN do 10kN obciążenia węzłowego. Nie definiuje się obciążeń momentami obrotowymi ani superpozycji przypadków obciążeniowych. Na potrzeby określenia funkcjonalności użycia modyfikatorów dla struktury dyskretnej przygotowano 20 przypadków obciążeń. Ich wartości zebrano w arkuszu kalkulacyjnym wartości parametrów badania oraz wyników stanowiącym załącznik do badań. Kolejno 5 przypadków stanowiło obciążenie poziome od strony większej liczby węzłów, następnie 5 obciążeń od strony o mniejszej liczbie węzłów. Wszystkie przypadki były w pełni poziome, lecz skierowane w zróżnicowanych kierunkach. Następne 5 przypadków stanowiły obciążenia ukośne przykładane na wszystkich węzłach symulując obciążenia poszczególnych wysokości struktury. Ostatnie 5 przypadków łączyło obciążenia ukośne oraz poziome jednocześnie. Ze względu na zależność wyników od danych wejściowych zdecydowano się przestawić kolejność badań, aby zredukować wpływ danych wejściowych. Zakłada się, że dla sąsiednich przypadków obciążeniowych formułowanych w analogiczny sposób podobne dane wejściowe mogą negatywnie wpływać na efektywność.

7.2.4 Wyniki badań

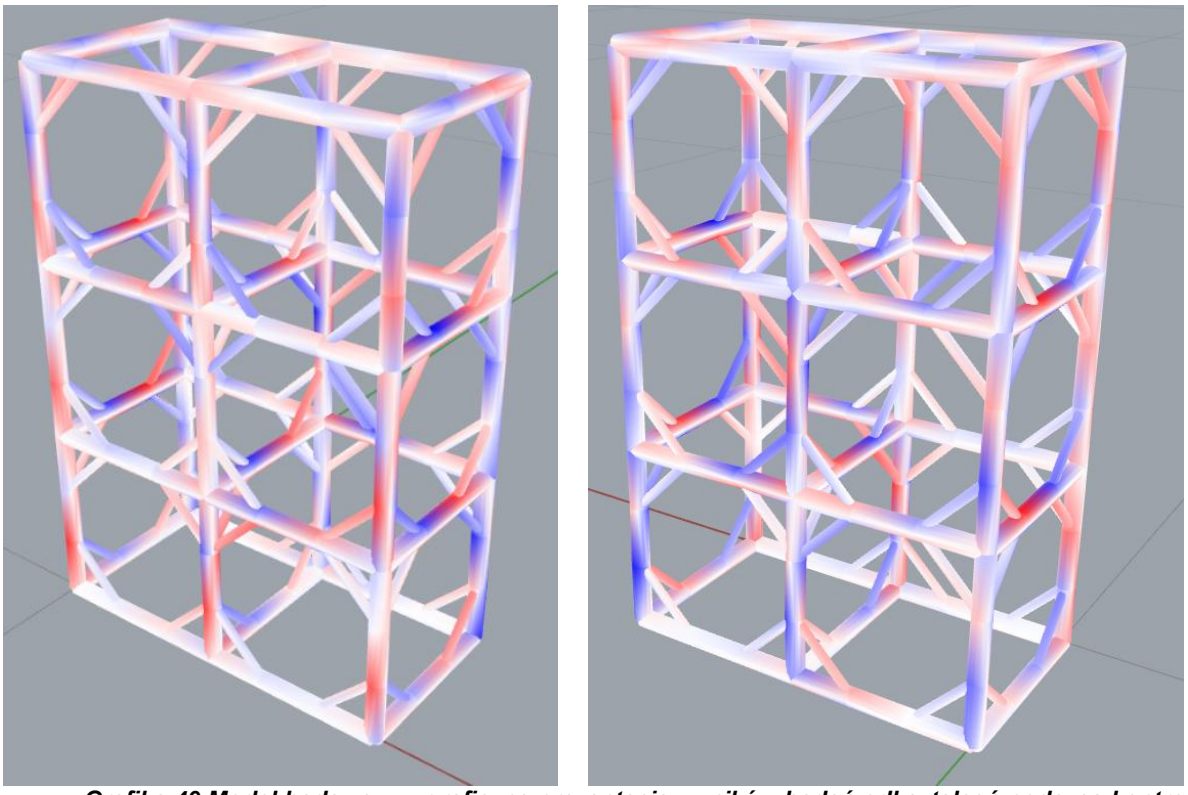
Wszystkie wyniki badań porównywano do wartości referencyjnych struktury niewyposażonej w modyfikatory. Założono sztywność połączeń we wszystkich węzłach. Następnie model uzupełniono o modyfikatory w każdej płaszczyźnie. W kolejnych 3 zestawieniach badawczych minimalizacji podlegał zawsze 1 parametr. Kolejno był to maksymalny obrót na węźle, średnia obrotu na węzłach oraz strzałka ugięcia. W każdym z 60 przypadków modyfikacji struktury uzyskano spadek wartości parametru o wartość od 9% do 32%. Dla każdego badania przeprowadzono testy pełnej puli 5000 geometrii. Każdy proces poszukiwania geometrii składał się z dwóch etapów. W pierwszym trwającym średnio 30% czasu badania algorytm skupiał się na operowaniu siłownikami w dolnej części struktury. Siłowniki te w znacznym stopniu odpowiadały za ostateczną efektywność uzyskanej geometrii

dlatego też etap charakteryzował się dynamicznym spadkiem wartości. Efektywniejsze geometrie uzyskiwał średnio co 2 sekundy, a skok wartości pozostawał znaczący. W drugim etapie usztywnienia bądź redukcji ugięcia algorytm poszukiwał we wszystkich modyfikatorach, poprzez znacznie mniejsze zmiany, wartości teleskopowania głównie siłowników w górnej sekcji struktury. W etapie tym najefektywniejsze geometrie uzyskiwano średnio co 0,25s. Zestawienie wyników dla kolejnych parametrów modyfikacji przedstawiono w Tabela 15.

Tabela 15.Wyniki badań redukcji pojedynczych parametrów dla kolejnych prób badawczych podczas wykorzystania modyfikatorów struktur ramowych. Pełne zestawienie wyników wraz z opisem kategorii obciążeń opisanych w treści stanowi załącznik nr 7.C pracy.

nr badania	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
składowa obciążenia X [kN]	-5,02663	-7,78512	-0,65979	5,432082	3,150378	-1,34435	-2,91833	8,877246	-7,97467	2,849111
składowa obciążenia Y [kN]	5,421878	-1,91675	-6,68003	9,700941	-7,81991	-3,86639	6,042809	-1,08907	-5,50034	-9,77587
składowa obciążenia Z [kN]	-4,12962	3,951624	7,299733	-6,0302	1,209807	-6,38844	-4,99606	8,944622	-3,026	-2,40085
maksymalny obrót na węźle [*]	3,878486	3,846013	3,615944	5,944001	4,522734	2,196312	3,598652	4,22147	4,92273	5,462946
średnia obrotu na węźle [*]	1,978318	1,879776	1,917591	3,086404	2,365307	1,141182	1,876751	2,058207	2,464202	2,868852
maksymalne wykorzystanie przekroju belki stałej [%]	14,54209	14,14796	14,19697	25,05216	17,67258	8,740597	13,5645	16,64844	19,87891	21,64808
maksymalne naprężenie poprzeczek modyfikujących [MPa]	13,53552	15,29927	16,11271	27,66252	20,19516	8,184555	14,71273	17,96544	16,16808	26,82452
strzałka ugięcia [mm]	19,24477	19,20058	17,92651	29,55865	22,52155	10,88794	17,8988	21,09082	24,46759	27,2078
maksymalny obrót na węźle [*]	3,056403	3,122425	3,06025	5,172624	3,807763	1,608721	2,992168	3,823548	4,058329	4,871469
średnia obrotu na węźle [*]	1,694302	1,560646	1,663097	2,851302	2,117133	0,859597	1,667222	1,843227	2,179238	2,669071
maksymalne wykorzystanie przekroju belki stałej [%]	17,86085	35,85495	15,78075	22,73223	17,73552	12,36636	13,81814	16,86303	19,42937	21,76348
maksymalne naprężenie poprzeczek modyfikujących [MPa]	17,77697	18,64444	19,30378	30,72513	22,46669	01,10,6107	16,67363	21,64521	22,1518	29,76877
strzałka ugięcia [mm]	15,99305	16,20596	15,56276	26,99991	19,75047	8,151626	15,48695	19,09326	21,88736	25,31911
maksymalny obrót na węźle [*]	3,695075	3,312796	3,263855	4,864162	3,878221	1,708968	3,348335	3,855122	4,016567	4,981284
średnia obrotu na węźle [*]	1,628717	1,451529	1,562053	2,630225	1,956064	0,733997	1,498389	1,619797	1,969525	2,463111
maksymalne wykorzystanie przekroju belki stałej [%]	16,09755	16,33656	33,89231	22,41562	17,80265	10,86925	13,82642	16,51465	20,88736	21,36829
maksymalne naprężenie poprzeczek modyfikujących [MPa]	18,7878	19,07621	18,33023	29,98313	22,86712	8,971356	18,13656	21,42357	19,67942	27,06851
strzałka ugięcia [mm]	15,23914	14,91485	14,30847	25,42012	18,27668	6,754299	13,88785	17,0639	19,59453	22,94635
maksymalny obrót na węźle [*]	3,157511	3,266171	3,358587	5,872668	4,533387	2,156808	3,807636	3,794062	4,181098	5,317406
średnia obrotu na węźle [*]	1,622348	1,495762	1,633618	2,758587	2,032587	0,802577	1,588774	1,688258	2,092013	2,532141
maksymalne wykorzystanie przekroju belki stałej [%]	16,36838	16,51768	14,99982	22,97319	17,98075	36,11122	14,31195	16,68619	20,72845	22,90161
maksymalne naprężenie poprzeczek modyfikujących [MPa]	16,69281	17,65871	18,37677	30,30238	25,18703	10,40931	18,72311	21,97687	19,11883	29,83164
strzałka ugięcia [mm]	15,1067	15,09775	14,88818	25,60223	18,71653	7,36505	14,74855	17,52544	19,97458	23,47724

Maksymalny obrót na węźle podczas każdej próby redukowany był o wartość w przedziale 9%-26,8%. Wartość ta zależna była od rodzaju obciążenia. System działał najefektywniej przy siłach o równych składowych poziomych oraz przy znacznie większych siłach pionowych niż składowe poziome. Efektywność dla nich wzrastała każdorazowo o minimum 18%. Najmniejszy wzrost efektywności odnotowywano dla sił o jednym dominującym kierunku poziomym. Dla sił ukośnych lepsze wyniki tłumaczy się sztywniejszą pracą większej liczby modyfikatorów. Znacznie większą skuteczność wykazuje rozłożenie naprężeń modyfikujących geometrię na więcej siłowników mimo sumarycznych porównywalnych naprężeń. Wszystkie ruchy modyfikatorów zawierały się w zdefiniowanym na potrzeby badania przedziale teleskopowania co pozwala ocenić brak wpływu ograniczeń ruchu na redukcję rotacji węzłów. Znacznie jednak lepiej system uzyskiwał wzrost efektywności mierzony średnimi wartościami obrotu na węźle. Spadek wartości zawierał się każdorazowo w przedziale 14%-42%. Wzrost efektywności pokrywa się z wynikami pierwszych badań wśród których największy wzrost efektywności odnotowywalny jest dla dominującej składowej siły pionowej. Ta sama tendencja utrzymuje się przy badaniu redukcji strzałki ugięcia, przy czym średnia spadku wartości jest mniejsza niż dla drugiego badania. Znaczące pozostają jednak różnice w wartościach nie kontrolowanych w danych próbach przez algorytm. Globalna redukcja wszystkich mierzonych wartości jest najwyraźniejsza dla drugiego badania. Wszystkie wartości mierzone w badaniu każdej próby ulegały redukcji przy czym często była ona zbliżona lub wyższa niż przy pozostałych seriach. W szeregu przypadków strzałka ugięcia badania nr 2 redukowana była lepiej niż w badaniu nr 3 orientowanym na ten parametr, będąc wynikową pośrednią redukcji rotacji. Oznacza to, że najefektywniejsze jednoparametrowe sterowanie odbywa się właśnie dla wartości średniej obrotu na węźle. Maksymalne wartości obrotu często osiągają wartości wyższe niż seria nr 1 orientowana na ten parametr, lecz każdorazowo wartości nadal pozostają w granicach bezpiecznych rotacji zakładanych dla przeciętnego obciążenia modelu. Wywoływane naprężenia na modyfikatorach średnio są wyższe niż przy pozostałych próbach, lecz w przypadkach gdzie występują w każdej serii maksymalne wartości naprężeń, seria nr 2 cechuje się redukcją tych wartości. Oznacza to większe wytężenie struktury podczas przeciętnego użytkowania, lecz efektywną redukcję naprężeń w przypadkach granicznego obciążenia. Parametrem decydującym pozostaje jednak znaczny wzrost maksymalnych naprężeń na elementach nośnych. Dla każdej próby wyróżnić można min. 2 próby badawcze, w których dwukrotnie przekroczono wartość referencyjną. Średnia wartości jest niższa w ciągu całych serii, lecz jednostkowe piki wartości czynią modyfikatory niebezpiecznymi w takiej formie użytkowania. Wymusza to opracowanie algorytmu modyfikacyjnego uwzględniającego jednocześnie wszystkie kluczowe parametry struktury w celu uniknięcia skoków wartości. Na podstawie wyników pomiarów określa się najmniejszą szansę krytycznego przekroczenia dowolnego parametru przy podejściu nr 2, natomiast najczęściej zjawisko to występuje dla serii nr 3. Zależność ta określa istotność poszczególnych parametrów w końcowym algorytmie, który orientowany będzie w największym stopniu na redukcję średnich wartości obrotu.



Grafika 49.Model badawczy z graficzną prezentacją wyników badań odkształceń podczas kontroli geometrii dla jednego z przypadków obciążeń poziomych zewnętrznych.

Uzyskane w wyniku działania modyfikatorów formy struktury wykazują cechy odmienne od powszechnie występujących w analogicznych obiektach. Grafika 49 prezentuje wynik przeciwdziałania sile ukośnej z dominującymi składowymi poziomymi. Na całą strukturę naniesiony jest wykres naprężeń. W dolnej części struktury w pierwszym module pionowym nigdzie nie występują naprężenia o wartościach równych lub wyższych od górnych modułów. Modyfikatory skutecznie zmniejszają naprężenia w krytycznej części struktury, w strefie podporowej. Związane jest to z wystąpieniem największych naprężeń na samych modyfikatorach w dolnej części struktury. Mimo redukcji naprężeń odkształcenia i kąty obrotów pozostają na podobnym poziomie na całej wysokości struktury. Oznacza to znaczne zwiększenie sztywności obiektu i dużo większą wytrzymałość na utratę osiowości pracy struktury. W założeniu działania modyfikatorów powinny być one w stanie przywrócić osiowość struktur smukłych w przypadku wystąpienia nieregularnych na całej wysokości obciążeń lub przy współistnieniu drgań wpadających w częstotliwości modalne.

Wszystkie strefy węzłowe w skład których wchodzą modyfikatory oraz przedziały elementów nośnych od węzła do modyfikatora, charakteryzują się znacznie niższymi naprężeniami, niż reszta struktury. Modyfikatory skutecznie dystrybuują siły na sąsiednie elementy strukturalne dodatkowo usztywniając węzły. W wyniku ich działania praktycznie zawsze węzeł ulega rotacji w całości i nie różnicuje się obrotu pojedynczych elementów w miejscach połączeń. Obroty węzłów zawsze występują w 3 kierunkach jednocześnie wywołując złożone skręcanie wszystkich schodzących się w nich elementów, lecz wartości obrotu pozostają w bezpiecznym przedziale. Zakłada się jednak, że przekroczenie dopuszczalnych obciążeń i przekroczenie maksymalnych wartości obrotu powodować będzie wystąpienie scenariusza nagłego niesygnalizowanego zniszczenia struktury. W celu zapobiegnięcia zjawisku konieczne jest opracowanie zachowań relaksacji części modyfikatorów w przypadku wystąpienia znacznych wartości rotacji.

7.3 Badanie wpływu wielkości siłowników na efektywność responsywności

Najbardziej wytężone w większości przypadków obciążeniowych pozostają widoczne po prawej stronie Grafika 49 środkowe poziome pręty. Zjawisko to odpowiada liczbie modyfikatorów, które występują w węzłach tych elementów. W wyniku użycia modyfikatorów węzły charakteryzują się najwyższą wartością wytrzymałości na naprężenia spośród składowych elementów struktury. Oznacza to, że pozostając istotną częścią prętów, efektywnie zmniejszają ich długość wyboczeniową. Argumentuje to przeprowadzenie badań wpływu wielkości strefy węzłowej na zachowanie struktury. Zależnie od proporcji wymiarów modyfikatorów do elementów nośnych możliwe jest manipulowanie scenariuszami zniszczenia struktury i jej zachowania pod obciążeniem. Kluczowy do analizy jest wpływ tak proporcji wytrzymałości w scenariuszach sztywniejszych modyfikatorów oraz sztywniejszych elementów nośnych, a także wpływ wielkości modyfikatorów. Do pierwszych badań wybrano konkretną długość siłowników dzieląc elementy nośne w proporcjach 1/5 długości stanowiącej część strefy węzłowej oraz 3/5 właściwego, nieusztywnianego pręta. Modyfikacja proporcji wpływać będzie na zdolności struktury do kompensacji odkształceń. Zakłada się wzrost sztywności struktury przy jednoczesnej większej podatności na uplastycznienie w strefie węzłowej.

W celu zbadania wpływu wielkości modyfikatorów na zachowanie struktur przygotowano i przeprowadzono symulacje dla 3 kolejnych wielkości modyfikatorów. Zgodnie z gradacją od największych modyfikatorów, kolejno określono podział pręta na 2 części, 3 oraz 5. Układy każdorazowo łączyły sąsiednie punkty sąsiednich krawędzi tworząc zróżnicowanej wielkości modyfikatory na potrzeby analizy globalnej. Dla przypadku 2 odcinków nie występuje opisana wcześniej strefa środkowa pręta. Zakłada się więc znaczną sztywność całego układu, w którym każdy pręt składa się wyłącznie z dwóch stref węzłowych. W przypadku 3 oraz 5 części, zmienia się jedynie proporcja długości stref węzłowych do strefy środkowej pręta. Zmniejszeniu ulega granica plastyczności pojedynczych elementów ze względu na mniej sztywne połączenie w węzłach elementów.

Na potrzeby przygotowania zróżnicowanych strukturalnie modeli skorzystano z logiki opracowania modelu struktury wcześniejszego badania i dostosowano parametr liczby podziałów każdego z odcinków, podając kolejne wartości dla kolejnych serii prób badawczych.

7.3.1 Wyniki badań

W wyniku przeprowadzonych badań uzyskano 30 zestawów wyników prezentujących dane na temat wpływu wielkości modyfikatorów na zachowanie struktury. W przypadku każdej struktury poddanej wszystkim obciążeniom z serii badawczej uzyskano redukcję naprężeń oraz ugięć względem struktury referencyjnej. Stwierdza się znaczący wpływ proporcji wielkości siłowników do elementów statycznych strukturalnych. Wraz ze wzrostem proporcji modyfikatorów względem struktury, w sposób bardzo proporcjonalny redukowała się wartość wszystkich badanych parametrów. Dla struktury o podziale 8-częściowym uzyskano najmniejszą redukcję średnich obrotów na węźle, lecz wyższą efektywnością odznaczała się redukcja obrotów maksymalnych. Charakteru spadku wartości bliskiego liniowemu nie spełniał parametr strzałki ugięcia. Wynosząca średnio 90% referencyjnej wartości strzałka ugięcia, 4-krotnie malała dla układu o dwukrotnie dłuższych siłownikach. Kolejny nieproporcjonalny wzrost nastąpił między siłownikami dla podziałów trójelementowych i dwuelementowych prętów strukturalnych. Niespełna dwukrotne zwiększenie długości siłowników skutkowało średnio 3-4 krotną redukcją ugięć. Wartości maksymalnych obrotów na węźle, redukowane proporcjonalnie w kolejnych seriach badawczych dla największych siłowników osiągały najwyższą efektywność oraz najbardziej równomierne wyniki niezależne od przypadku obciążeniowego.

Tabela 16. Zestawienie wyników pomiarów wpływu skali modyfikatorów do struktury na parametry statyczne i geometryczne modelu. Wszystkie badania zostały przeprowadzone na grupie badawczej obciążeń z wcześniejszych etapów badań. Pełne zestawienie wyników badań stanowi załącznik nr 7.D pracy.

wpływ wielkości stężeń na efektywność- 1/8									
maksymalny obrót na węźle [*]	4,644334	4,71636	4,811958	7,857981	5,792076	2,690398	4,745285	5,509446	5,999959
średnia obrotu na węźle [*]	2,658496	2,518288	2,675828	4,34014	3,225851	1,532969	2,626409	2,799634	3,272801
maksymalne naprężenie przekroju belki stałej [kPa]	2458,444	1844,094	1798,991	3041,82	2078,51	1120,333	1779,932	2027,604	2579,586
maksymalne wykorzystanie poprzeczek modyfikujących [%]	25,59912	25,03501	29,32477	5936,021	37,65271	15,45367	27,04887	1157,503	29,67173
strzałka ugięcia [cm]	26,2859	27,00582	25,79358	42,91172	31,41128	15,0762	25,61098	29,81375	33,80909

wpływ wielkości stężeń na efektywność- 1/3									
maksymalny obrót na węźle [*]	2,162465	1,683524	1,621597	2,66941	2,343651	1,072709	2,15674	3,186853	3,496721
średnia obrotu na węźle [*]	0,981455	0,683972	0,79123	1,367179	1,13631	0,544606	0,99572	1,27386	1,48527
maksymalne naprężenie przekroju belki stałej [kPa]	1208,901	1111,287	941,8882	1393,767	1343,156	917,6169	1467,579	1533,886	1609,755
maksymalne wykorzystanie poprzeczek modyfikujących [%]	12,29572	13,42126	13,03134	18,23097	13,81645	10,14987	14,70528	15,95638	13,75735
strzałka ugięcia [cm]	7,661316	5,144883	5,659944	10,6811	8,825419	3,309927	6,67382	7,58937	6,11658

wpływ wielkości stężeń na efektywność- 1/2									
maksymalny obrót na węźle [*]	0,71945	0,720669	0,788847	0,866839	0,982298	0,627703	0,926778	0,739188	0,721695
średnia obrotu na węźle [*]	0,40654	0,435687	0,420351	0,491839	0,551499	0,355286	0,462413	0,382154	0,388716
maksymalne naprężenie przekroju belki stałej [kPa]	756,3872	18,21171	20,14756	19,24099	1066,422	1086,55	26,05041	935,0472	20,98872
maksymalne wykorzystanie poprzeczek modyfikujących [%]	14,02051	16,84257	10,0814	16,78435	15,39572	17,29326	15,11627	16,52922	28,80674
strzałka ugięcia [cm]	2,208718	2,049356	2,343547	3,065371	3,606773	1,758655	3,136353	1,492108	2,205609

Istotne pozostają również wartości naprężeń na samych siłownikach. Najniższe wartości osiągnięte zostały dla przypadku nr 2 przy prętach podzielonych trzykrotnie. Dla układu tego również rozkład naprężeń między elementy statyczne oraz ruchome pozostaje na najbardziej równym poziomie dla wszystkich przypadków obciążeniowych.

Dla serii nr 1 oraz nr 2 czyli mniejszych wersji modyfikatorów zauważono odmienność zachowań geometrii w porównaniu do serii nr 3. Podczas minimalizacji parametru naprężeń w większości przypadków obciążeniowych przynajmniej 1 pręt wyginany był przez system modyfikatorów w sposób odwrotny do powszechnie przyjętych założeń. W celu minimalizacji naprężeń dąży się do utrzymania osiowości pracy struktury poprzez wielopunktowe dostosowanie pręta na całej jego długości. Szereg prętów jednak uzyskiwał większą redukcję naprężeń w wyniku odwrotnego odgięcia w strefie węzłowej ilekroć przeciwległy jego koniec ulegał znacznej rotacji lub rotacji z deformacją. Oznacza to, że korzystniejsze było krzywoliniowe prowadzenie osi uzyskujące znacznie większe odkształcenia niż uzyskanie krzywej łamanej poprzez znaczny wymuszony obrót doginający oś pręta do referencyjnej osi idealnej struktury. W konsekwencji oznacza to, że odpowiedniejszym układem strukturalnym są ciągłe pręty niż podział na osobne elementy strefy węzłowej oraz osobne części prętów właściwych. Różnica między obiema strategiami redukcji naprężeń wahała się od 3% do 14% na korzyść opływowych kształtów osi zachowywanych przy ciągłości odcinków całych modułów strukturalnych. Oznacza to jednocześnie, że przekroje dobrane pierwotnie jako pierścieniowe stanowią odpowiednie rozwiązanie zachowujące jednakową sztywność w każdym kierunku, pozwalając na minimalnie większe wyboczenia w granicach deformacji bezpiecznych.

7.3.2 Wnioski

Spośród przebadanych 4 wielkości modyfikatorów najefektywniejszą grupę stanowią rozwiązania serii badań nr 3 wspierające każdy pręt w połowie rozpiętości. Odznaczają się znacząco większą redukcją naprężeń w porównaniu do pozostałych badanych wersji, lecz generują problem zmniejszenia przestrzeni użytkowej niezajętej przez strukturę nośną. Maksymalne obroty na węźle pozostają w granicy oceny struktury jako zachowującej pełną osiowość elementów. Wyniki dla modyfikatorów osadzonych na prętach podzielonych więcej niż 5 razy nie generują satysfakcjonujących wyników co oznacza, że nie mogą one w badanych przypadku stanowić rozwiązania implementacji responsywności do struktury. Wszystkie pozostałe układy elementów ruchomych, spełniając wymagania redukcji naprężeń, obrotu węzłów oraz strzałki ugięcia, pozwalają na dobór jako rozwiązania efektywnego kontrolowania sztywności struktury. Model charakteryzował się prostym układem przestrzennym. W procesie dalszych badań określić należy wpływ skali struktury na efektywność doboru i operowania sztywnością oraz wytrzymałością z użyciem analogicznych modyfikatorów stężających.

7.4 Badanie wpływu modyfikatorów węzłowych na struktury sztywne topologicznie

7.4.1 Wstęp

Dotychczas badaniom podlegała jedynie struktura o sztywności uzyskiwanej w wyniku wprowadzenia sztywnych połączeń elementów na wszystkich węzłach. Dla połączeń tych zdefiniowano domyślny charakter obrotu wywołujący trwałą deformację węzła, która mogła nie wpływać na siły osiowe elementów. Struktura nie osiągała sztywności samą topologią układu elementów ze względu na kwadratowe komórki wyznaczane przez moduł strukturalny. Należy określić zdolność modyfikatorów do redukcji odkształceń w strukturach uzyskujących sztywność poprzez topologię. W tym celu strukturę o analogicznym do już zbadanego obiektu zmodyfikowano wprowadzając podział siatką trójkątną. W strukturze tej spodziewanym zjawiskiem jest jednoczesna utrata sztywności w szeregu węzłów poprzez kaskadową utratę wytrzymałości. Modyfikatory poza funkcja usztywnienia trwałego powinny pełnić funkcję przeciwdziałania szybko narastającym wyboczeniom w czasie eksploatacji struktury. Oznacza

to konieczność stałego monitorowania osiowości prętów. Wyższa sztywność oraz nieregularny układ modyfikatorów wokół węzła prowadzi do odmiennej od dotychczasowej metody zachowań struktury. Znacznie wyższy priorytet zachowania osiowości nad kompensacją ugięć wymaga badań modelu zachowań układu szkieletowego triangularyzowanego.

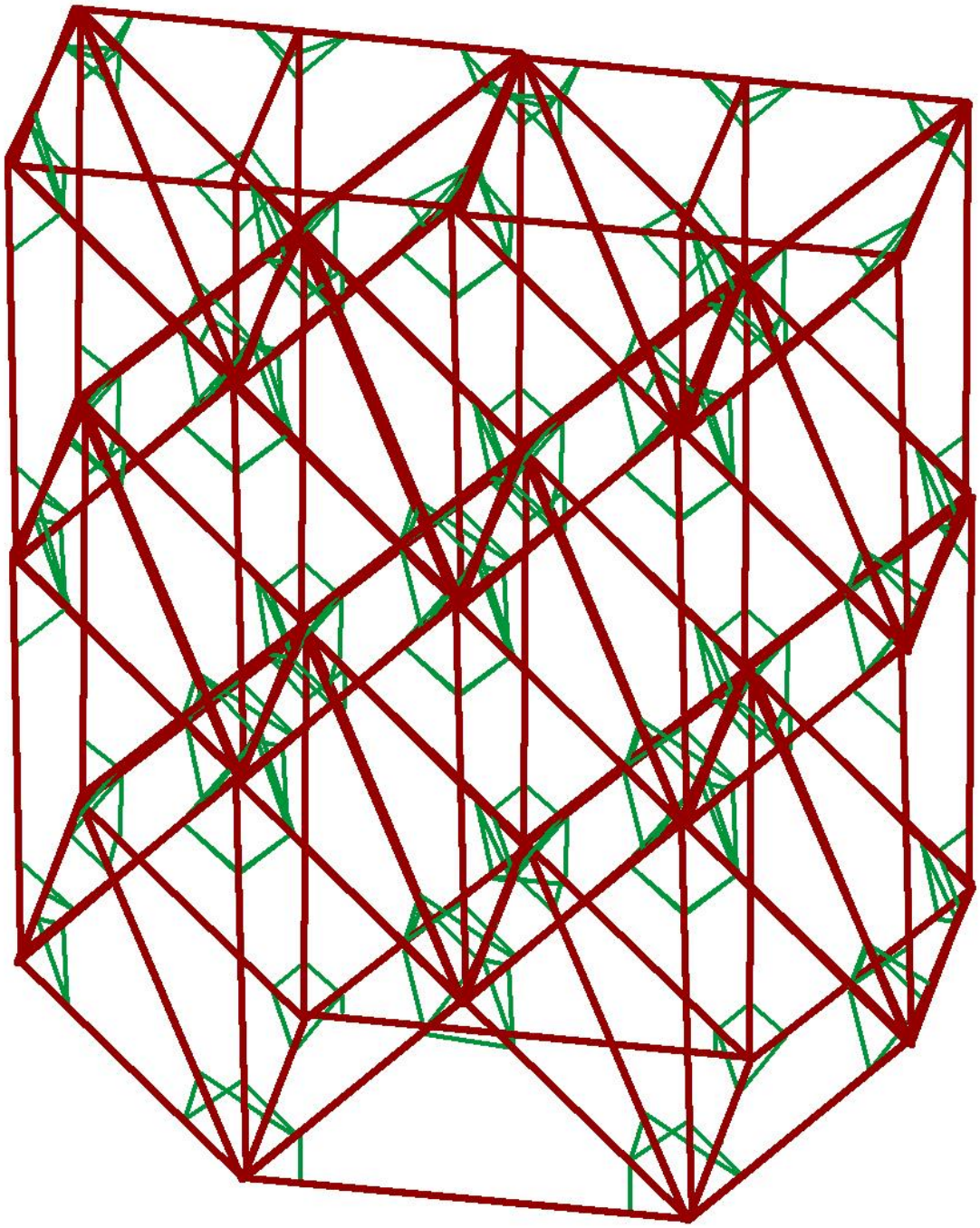
7.4.2 Budowa modelu

Zakłada się podobnie jak we wcześniejszym badaniu lokalizację siłowników modyfikujących między każdym słupem oraz belką, lecz ze względu na konieczność zmiany ramy i wprowadzenie podziałów trójkątnych występuje dodatkowa belka przekątna. Czyni to strukturę asymetryczną, gdzie każdy węzeł od góry oraz od dołu charakteryzował się będzie odmiennym układem modyfikatorów. Układ ten przedstawiono na grafice (***). Struktura o identycznej geometrii zewnętrznej została podzielona na pola trójkątne. Podział nastąpił we wszystkich płaszczyznach pionowych, lecz nie w poziomie. Dotychczasowe badania modyfikatorów wykazały niski udział elementów poziomych w stężaniu struktury. Wystarczające pozostaje proste ukośne stężenie, które w badaniu zastępowane z kolei będzie ruchami modyfikatorów pionowych. W wyniku założeń struktura przyjmuje formę wymagającą użycia 6 rodzajów węzłów występujących w 2, 4 lub 8 miejscach przecięcia elementów nośnych. Odmiennie od wcześniejszej struktury zaimplementowano 2 rodzaje siłowników o zróżnicowanych długościach. Krótsze, oznaczone kolorem niebieskim mają 40cm długości i zawsze występują parami, z kolei czerwone ukośne o długości $40\sqrt{2}$cm zawsze stanowią pojedyncze rozwiązanie. Różnicuje to w konsekwencji ich przekroje i dalej wytrzymałość. Oba rodzaje elementów mają przekrój pierścieniowy. Zdefiniowano dla podwójnych modyfikatorów średnicę wewnętrzną oraz zewnętrzną odpowiednio jako 14cm oraz 15cm, natomiast dla ukośnych 24cm oraz 25,5cm.

W celu wykonania modelu sterowanego poprzez wydłużanie i skracanie modyfikatorów wykorzystano ponownie oprogramowanie Rhinoceros Grasshopper. Dla modelu wcześniejszego badania dodano trzy kolejne odcinki tworzące pojedynczą przekątną każdego modułu. 2 stanowią odcinki węzłowe, z kolei trzeci środkowy część centralną analogicznie do wcześniejszego modelu. Wszystkie modyfikatory zamodelowane zostały przy użyciu funkcji łączenia punktu na słupie z najbliższymi punktami elementów poziomych. Dobrana została maksymalna odległość równa 70cm oraz liczba 3 elementów wychodzących z pojedynczego punktu. Pozwala to na wykonanie połączeń w każdym kierunku, w orientacji pionowej. Wartość ta może podlegać zmianom w celu dodatkowego usztywnienia lub uplastycznienia struktury. Sumaryczna liczba odcinków wzrosła do 268, natomiast modyfikatorów do 128 sztuk. Wszystkie modyfikatory uzyskały oryginalne identyfikatory co umożliwiło indywidualne sterowanie każdym elementem teleskopowanym. Każdy z przedstawionych na grafice węzłów charakteryzuje się inną sztywnością, a co za tym idzie koniecznością sterowania w różnym zakresie wysuwu siłowników. Wstępnie dla wszystkich elementów określono maksymalny wysuw jako 5cm w obu kierunkach. Skok wartości przyjęto jako 0,1cm. W celu redukcji stopnia teleskopowania i na podstawie efektywności wcześniejszych badań zdecydowano się na użycie podpór usztywniających na każdym węźle zlokalizowanym na wysokości podstawy. Sumarycznie uzyskano 6 usztywnień. Wszystkie elementy przekątne zamodelowano w orientacji w jednym kierunku generując mniejszą liczbę zróżnicowanych węzłów. Ma pozwolić to na łatwiejsze wyprowadzenie zasad sterowania strukturami responsywnymi analogicznymi do badanej.

W strukturze występują 2 długości prętów zamodelowane jako stalowe o przekroju pierścieniowym i średnicach kolejno 35 oraz 37cm. Dla obu zdefiniowano wartości krytyczne na podstawie odpowiednich wzorów. Przeliczane są również kąty ugięcia α stanowiące dane wejściowe dla modułu obliczania wysuwu wymaganego dla przywrócenia pełnej lub częściowej osiowości elementu nośnego. Wszystkie wartości wysuwu podłączone są do algorytmu ewolucyjnego sterującego procesem dostosowywania modelu podczas pracy modułu obliczeniowego. Do analizy modelu wykorzystano moduł obliczeniowy nieliniowy iteracyjny Newtona-Rhapsona o liczbie iteracji równej 1000. Stanowi to odstępstwo od

dotychczasowych badań poprzez 5-krotne zwiększenie liczby iteracji. Zakłada się konieczność wzrostu precyzji obliczeń ze względu na istotność minimalnych odkształceń w procesie tworzenia modelu zachowań. Obliczane są naprężenia maksymalne na wszystkich elementach jak również kąty obrotu wszystkich węzłów we wszystkich 3 płaszczyznach.



Grafika 50.Topologia modelu sztywnego topologicznie zachowuje podobieństwo do struktury o kwadratowych modułach, lecz topologią wymusza inne metody kształtowania odpowiedzi siłownikami.

Ze względu na identyczną formę zewnętrzną poza zdolnością operowania strukturą pod wpływem zróżnicowanych obciążeń badana będzie również skuteczność działania modelu w odniesieniu do struktury o kwadratowych komórkach. Na podstawie wyników określona zostanie efektywność użycia modyfikatorów w obu przypadkach przy uwzględnieniu znacznie większej kompleksowości struktury o trójkątnych komórkach. Ostateczna geometria struktury przedstawiona została na Grafika 50.

7.4.3 Przypadki obciążeniowe

W celu zbadania zachowań struktury pod obciążeniem zdefiniowano 6 przypadków obciążeniowych o gradacji stopnia złożoności obciążeń. Wszystkie obciążenia opracowane są jako połączenie obciążenia grawitacji z dodatkowym zewnętrznym powierzchniowym rozłożonym na węzły oraz elementy nośne. Pierwszy przypadek z obciążeniem pionowym o wartości 8kN/m2 oraz drugi ukośny o wartości 13,5kN/m2 stanowią przypadki gdzie dominują siły pionowe, a kluczowymi elementami będą słupy oraz ukośne belki, a celem modyfikatorów utrzymanie pionowego układu elementów. Kolejne dwa przypadki dotyczą obciążeń poziomych kolejno prostopadłych do dłuższej ściany struktury oraz ukośnych odpowiednio o wartościach 8 oraz 13,5kN/m2. Obciążenie to symuluje zachowania obiektów wysokich poddawanych częstym zmiennym obciążeniom poziomym. Zakłada się dominującą funkcję ukośnych elementów w zachowaniu sztywności układu. Modyfikatory odpowiadać będą w głównej mierze za efektywne zmniejszanie długości wyboczeniowych elementów ukośnych dla wzrostu wartości siły krytycznej. Same nie będą pełniły funkcji stężeń dlatego zakłada się minimalny udział ukośnych elementów modyfikujących. Ostatnie dwa przypadki obciążeniowe modyfikują pracę struktury poprzez przeorientowanie kierunku działania siły grawitacji. W wyniku zmiany struktura pracuje jako wspornik zamocowany na 6 wcześniejszych podporach. Struktura jednak zorientowana jest najdłuższą ścianą równolegle do podłoża przyjmując formę nadwieszenia. Poza siłą grawitacji zastosowano ponownie siły ukośne odchylone od pionu o kat 45 stopni oraz poziome ukośne zadane pod takim samym kątem. Wartości sił ponownie wyniosły 8 i 13,5kN/m2. Dla wszystkich 6 przypadków obciążeniowych prowadzono modyfikację zawsze pod kątem minimalizacji pojedynczego parametru. Były to kolejno maksymalny obrót na węźle, maksymalne naprężenia oraz strzałka ugięcia. Wszystkie wyniki badań odnoszono do pomiarów referencyjnych zdefiniowanych jako swobodne teleskopowanie modyfikatorów bez wpływu na naprężenia powodowane teleskopowaniem lecz z uwzględnieniem ciężaru własnego elementów.

Wszystkie pomiary powtarzano dwukrotnie ostatecznie do analizy wybierając lepsze wartości wiodące. Badania trwały każdorazowo 13 minut i pozwalały na przebadanie 1500-1800 modeli dla każdego przypadku w każdej próbie. Wyniki badań zebrano i przedstawiono w formie tabeli, której pełna wersja stanowi załącznik do badań.

7.4.4 Wyniki badań

Tabela 17.Wyniki badań efektywności systemu modyfikatorów ramowych dla struktury sztywnej. Dla każdego parametru indywidualnie przeprowadzano badania.

struktura o trójkątnej topologii						
	1	2	3	4	5	6
	pionowe	ukośne	boczne osiowe	boczne ukośne	w układzie pionowym od spodu	w układzie pionowym poprzecznie
	geometria referencyjna					
maksymalna rotacja na węzłach	0,547435	0,481992	0,44277	0,473653	0,525324	0,558404
średnia rotacja na węzłach	0,12908	0,176274	0,165412	0,176339	0,124412	0,139857
maksymalne naprężenia	1,186825	2,055128	1,851786	2,100946	1,377631	1,536332
średnie naprężenia	0,311836	0,443462	0,36339	0,425666	0,271079	0,337201
strzałka ugięcia	10,196055	14,579877	13,70025	14,707605	10,063493	11,320829
	maksymalna rotacja					
maksymalna rotacja na węzłach	0,501763	0,447689	0,404597	0,42753	0,471817	0,501902
średnia rotacja na węzłach	0,242288	0,194714	0,178679	0,189475	0,198123	0,209569
maksymalne naprężenia	4,924769	3,699179	3,003195	3,510608	4,291594	4,427016
średnie naprężenia	1,188703	0,725964	0,616884	0,670911	1,08964	1,129815
strzałka ugięcia	10,399924	14,566392	13,505755	14,510717	9,705519	10,821861
	strzałka ugięcia					
maksymalna rotacja na węzłach	0,590135	0,487725	1,17123	1,427783	1,22317	1,17621
średnia rotacja na węzłach	0,230474	0,185504	0,288297	0,334584	0,301709	0,312434
maksymalne naprężenia	3,6578	1,920792	2,0683	2,5366	1,31524	1,4253
średnie naprężenia	1,241232	0,63977	3,794244	4,66704	4,644045	4,791053
strzałka ugięcia	9,100864	14,41498	11,529973	11,499296	7,213962	8,299738
	maksymalne naprężenia					
maksymalna rotacja na węzłach	1,039392	1,102286	1,195267	1,175143	0,870468	1,04643
średnia rotacja na węzłach	0,283531	0,321766	0,316175	0,1796735	0,298014	0,306723
maksymalne naprężenia	1,0384	1,9838	1,649	1,8704	1,28634	1,5143
średnie naprężenia	1,927548	3,495757	3,395059	13,268598	2,085469	2,300082
strzałka ugięcia	8,278348	11,832037	11,050724	11,565844	7,388312	8,343756

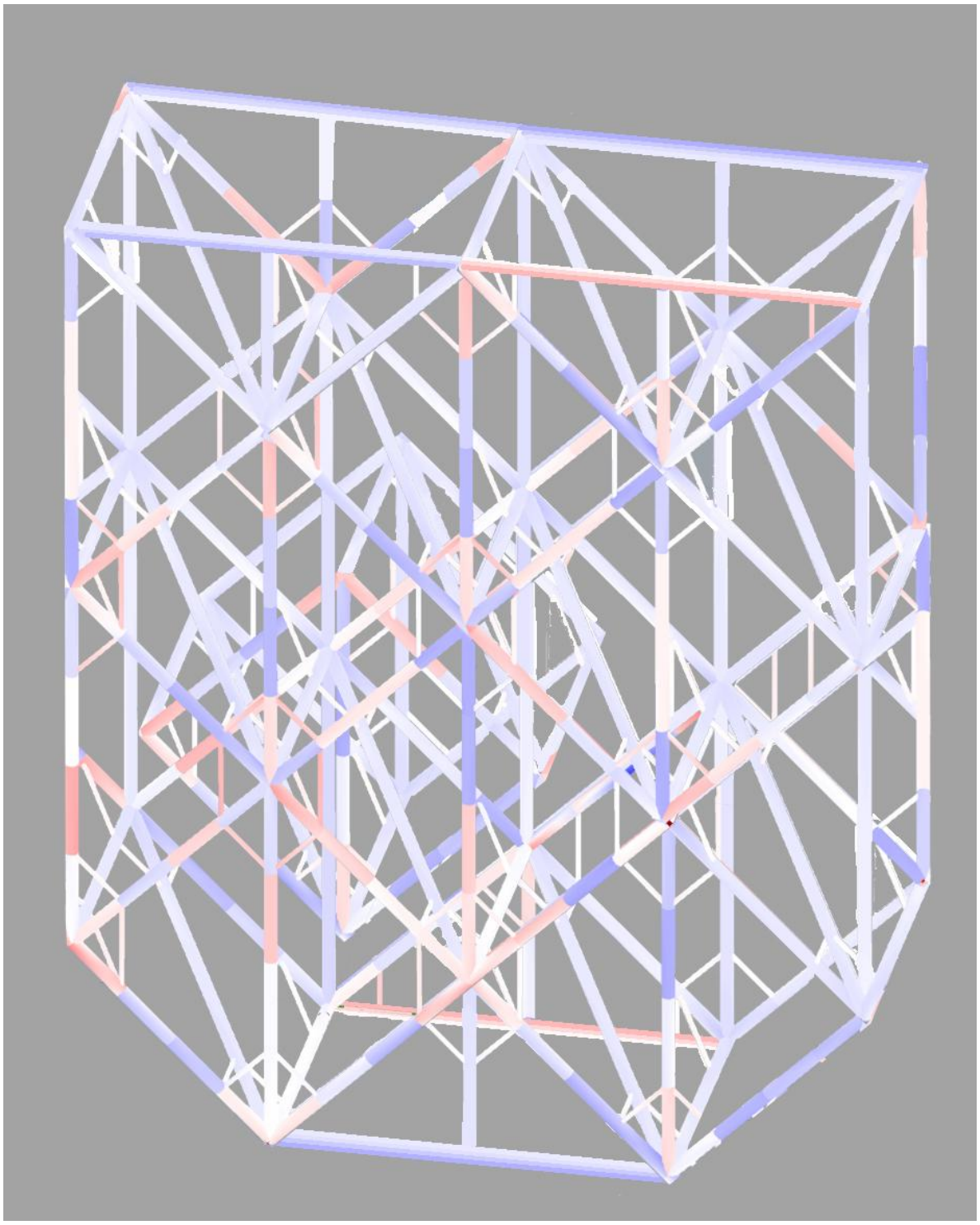
W Tabela 17 zebrano wyniki pomiarów dla wszystkich badanych skal modyfikatorów. Dla wszystkich prób badawczych uzyskano wyniki lepsze niż dla grupy referencyjnej. Wzrost ten dla kluczowych parametrów wynosił zależnie od poszukiwanego parametru od 12% do 38%. Jednocześnie spadek wartości kluczowych pod które orientowane było dane badanie w większości przypadków oznaczał wzrost pozostałych parametrów w bardzo zróżnicowany sposób. Model obliczeniowy został zabezpieczony tak, aby zapobiegać generowaniu niepoprawnych geometrii oraz zbyt mocno wytężonych elementów nośnych. Każda struktura wygenerowana w trakcie badania spełnia kryteria wytrzymałości na zadane obciążenia oraz sztywności gwarantującej jej stateczność.

Podczas poszukiwania minimalizacji obrotu na węźle niemal wszystkie pozostałe parametry ulegały wzrostowi w zakresie 2%-315%. Sam parametr obrotu obliczany i podawany w stopniach kątowych udało się obniżyć na podobnym poziomie w każdym przypadku o 10%. Najbardziej równym parametrem podczas całego badania była strzałka ugięcia, której zmiana w wyniku modyfikacji struktury wahała się w granicach 4%. Parametr ten brał minimalny udział w wytrzymałości struktury. Model przekroczenia warunków stateczności w żadnym wypadku nie był oparty o przekroczenie granicy ugięcia. Każde zniszczenie struktury wywoływane było skręceniem w okolicy modyfikatora części środkowej elementu struktury. Sama rotacja była skutecznie redukowana przez modyfikatory. Średnio po 2 minutach (18% czasu badania) następowała redukcja badanej wartości o 85% wartości

docelowej, co oznacza, że znaczne skrócenie czasu badania ma mały wpływ na ostateczny wynik. Nadal jednak redukcja parametru rotacji wiąże się z nawet trzykrotnym wzrostem maksymalnych naprężeń. Analogicznie, lecz w mniejszej skali zaważa się wzrost parametru obrotu węzła przy minimalizacji strzałki ugięcia. Oznacza to, że należy opracować dwa równoległe modele zachowań wykorzystywane w zależności od aktualnego obciążenia. Dla małych wartości sił, gdzie możliwy jest nawet trzykrotny wzrost naprężeń, głównym celem powinna być sztywność i osiowość elementów nośnych. Realizowana ona powinna być, jak podczas badania, kosztem pozostałych parametrów. Wraz ze wzrostem wartości sił zewnętrznych i zbliżania się parametru do granicy stateczności struktury model powinien skupiać się coraz wyraźniej na redukcji naprężeń kosztem obrotu na węźle, czy strzałki ugięcia. Wytrzymałość i ujednolicenie naprężeń powinny pozostać priorytetem dla wyższych wartości obciążeń. Jest to założenie zgodne z wnioskami badań mających na celu minimalizację energii całkowitej struktur responsywnych [66], [69]. Oznacza to możliwość przekroczenia dopuszczalnych ugięć, lecz zachowanie nośności struktury. Pozwala to na uzyskanie wyraźnego sygnału przeciążania modelu poprzedzającego sytuacje niebezpieczne.

Mimo redukcji głównego parametru w każdym badaniu, pozostałe parametry wzrastały w bardzo nierówny sposób tak w obrębie jednego badania jak i całych serii wszystkich przypadków. Średnio maksymalny wzrost jednego z parametrów wynosił 307% i był on związany z naprężeniami średnimi lub maksymalnymi. O ile średnie naprężenia oddziałują na redukcję trwałości struktury nie generując zagrożenia w czasie użytkowania o tyle wzrost maksymalnych naprężeń pozostaje zagrożeniem bezpośrednim. Szczególnie zauważalne jest to dla przypadku nr 1 gdzie dla dwóch kolejnych badań jedna z wartości wzrastała prawie 4-krotnie.

Choć naprężenia charakteryzowały się znaczną dynamiką tak zmiany geometrii, rotacje węzłów pozostawały na bezpiecznie niskim poziomie zmienności. Maksymalny wzrost średniej rotacji o 143% nie wpływa na stateczność struktury ze względu na bazowy bardzo niski wskaźnik obrotu średniego. Wartość ta pozostaje średnio 4-5 krotnie niższa niż dopuszczalny obrót. Zauważa się jednak wzrost ujednolicenia obrotów przy redukcji maksymalnych naprężeń. Mają one bezpośredni związek z wyrównaniem rozkładu sił wewnętrznych. Podczas homogenizacji naprężeń zauważa się, że część obrotów węzłów wywoływana był koniecznością wytworzenia przeciwnych rotacji względem sąsiednich węzłów. Obrót zawsze wywoływany był w przeciwnym kierunku. Wywołane w ten sposób sztuczne obroty węzłów w żadnym przypadku nie stanowiły największych obrotów w danym przypadku co oznacza, że mimo wzrostów średnich rotacji na poziomie 74%, wzrost ten nie wpływał w istotny sposób na funkcjonalność struktury lub konieczność dostosowania jej elementów pod względem statyki. Znaczny wzrost średniej wartości naprężenia odnotowany dla przypadku nr 4 podczas minimalizacji strzałki ugięcia równy 31,17 krotności początkowej, stanowił znaczne wytężenie całej struktury. Jako jedyny przypadek wykluczał uzyskany wynik z implementacji w hipotetycznej fizycznej strukturze.



Grafika 51. Wynikowa mapa naprężeń dla struktury sztywnej topologicznie.

Na Grafika 51 przedstawiono rezultat badania nr 1 podczas redukcji wartości maksymalnej rotacji na węzłach. Układ struktury powtarza szereg tendencji występujących w pozostałych przypadkach obliczeniowych. Każdy z elementów nośnych modelu podzielony na 3 odcinki ma inną wartość naprężeń. Oznacza to, że każdy modyfikator zmienił swoją wartość teleskopowania w trakcie poszukiwania formy aktywując się i włączając w rozkład naprężeń w strukturze. Znaczna część elementów w środkowym odcinku ma charakter naprężeń odmienny od odcinków skrajnych, węzłowych. W środku rozpiętości elementy ukośne są najczęściej rozciągane, natomiast pionowe ściskane. Modyfikatory często przyjmują większość naprężeń pochodzących od prętów, w wyniku czego odcinki węzłowe

charakteryzują się rozciąganiem dla prętów ściskanych i ściskaniem dla prętów rozciąganych. Zgodnie ze wstępnym założeniem elementy poziome struktury przenoszą najmniejsze siły osiowe i nie biorą kluczowego udziału w dystrybucji naprężeń w strukturze. Stanowią najczęściej podparcie dla mocowanych do nich modyfikatorów podczas wywoływania przeciwnych obrotów węzłów. Ze względu na przenoszenie małych sił z obciążeń zewnętrznych, mogą przenosić znacznie większe siły wywoływane systemem siłowników.

Zauważa się silną korelację między sąsiednimi węzłami i połączonymi z nimi siłownikami. Jeśli jeden węzeł skupia w znacznej części modyfikatory ściskane, przeciwległy mu względem dłuższej ściany węzeł skupiać będzie modyfikatory rozciągane. Zjawisko to najwyraźniej zauważalne jest w przypadku środkowego węzła trzeciego od dołu struktury, widocznego od przodu, a także węzła analogicznego, lecz z tyłu struktury na grafice. Podobnie, lecz przy wystąpieniu mniejszych sił, zachowują się dwa odpowiadające im niższe węzły. Wszystkie 8 modyfikatorów orientowanych jednakowo na ściskanie lub rozciąganie wywołuje minimalne rotacje węzłów. Największe wartości przynależne są z kolei węzłom, dla których występuje równy podział między liczbą modyfikatorów ściskanych oraz rozciąganych.

Najbardziej istotnymi w modyfikacji pracy struktury pod wpływem działania sił zewnętrznych pozostają węzły środkowe o największej liczbie modyfikatorów. Z kolei najmniejszy udział w wynikach modyfikacji z użyciem algorytmu ewolucyjnego mają węzły narożne. Mimo identycznych możliwości teleskopowania w porównaniu do pozostałych modyfikatorów, nie wywołują naprężeń na podobnym poziomie co środkowe modyfikatory. Dodatkowo zauważa się małą istotność modyfikatorów poziomych. Są one efektywne podczas obciążeń pionowych poprzez zabezpieczenie pionowej orientacji wszystkich elementów, lecz dla przypadków obciążenia poziomego zlokalizowanego w tej samej płaszczyźnie co omawiane modyfikatory nie stanowią one wymiernego zwiększenia funkcjonalności struktury. Oznacza to, że model w którym dominują siły poziome zmienne, możliwe jest zastąpienie wszystkich poziomych modyfikatorów prostymi ukośnymi stężeniami. Znacznie zmniejsza to pulę wartości teleskopowań wymaganych do przebadania przez algorytm ewolucyjny przed uzyskaniem satysfakcjonujących wyników.

Same wartości teleskopowania wahały się w pełnej gamie wartości od -5cm do 5cm wysuwu. Jedynie 13% siłowników wykorzystywało pełny zakres zmian długości co świadczy o poprawnym doborze zakresów wysuwu. Średnia zmiana długości wynosiła odpowiednio -1,2cm oraz 0,5cm dla skrócenia i wydłużenia. Siłowniki narożne najczęściej wykorzystywały w większym stopniu zakres teleskopowania, natomiast centralne przy mniejszym wysuwie generowały większe naprężenia poprzez znacznie większe usztywnienie o wzajemnie sąsiednie, ortogonalne elementy strukturalne. Zauważalnie wyższe wartości naprężeń indukowane były na modyfikatorach ukośnych niż ortogonalnych co przekładało się na minimalny obrót skrajnego odcinka pręta w kierunku ukośnego modyfikatora.

7.5 Badania zdolności podniesienia tempa generowania wyników geometrycznych przy użyciu modelu zachowań hybrydowych iteracyjno-losowych

7.5.1 Wstęp

Przytaczana w poprzednich rozdziałach problematyka wpływu czasu generowania reakcji struktury na zmieniające się warunki obciążeniowe jest jednym z głównych warunków dyskwalifikujących szereg rozwiązań algorytmów zmian geometrii jako wymagających zbyt dużych zasobów mocy obliczeniowej. Znacznie efektywniejszym rozwiązaniem, w celu redukcji czasu obliczania jest określenie progu zmniejszenia danego parametru, jak ugięcie, czy naprężenie oraz dalej prowadzenie poszukiwań do uzyskania wartości parametru spełniającej warunek. Najczęstszym progiem dla dotychczas badanych w literaturze modeli były stany graniczne odnoszące się bezpośrednio do Eurokodów dla konstrukcji [68], [71]. Spełnienie wymagań nośności i użytkowalności przerywało działanie algorytmów zmniejszając czas obliczania i liczbę zmian geometrii przed uzyskaniem ostatecznej formy przestrzennej. W każdym przypadku czas obliczania stanowił jeden z kluczowych parametrów, a jego redukcja była zagadnieniem poruszanym w każdym opracowaniu [69], [70], [93]. Dotychczasowe badania systemów modyfikatorów wskazywały na dużą schematyczność zachowań struktur pod wpływem analogicznych obciążeń. Argumentuje to poszukiwania rozwiązań mających na celu redukcję czasu obliczeniowego bezpośrednio przekładającego się na wzrost efektywności w sposób pośredni przyspieszeniem działania, lub bezpośredni uzyskiwaniem większych redukcji parametrów statycznych. Opracowanie modelu zachowań korzystającego ze zdefiniowanych tendencji modeli do konkretnych ruchów geometrii ma pozwolić na uzyskanie wymiernych oszczędności sterowania strukturą, której sama responsywność została określona wcześniej jako korzystna i przynosząca oszczędności materiałowe. W celu maksymalizacji zysków model musi opierać się o zasadę minimalizacji możliwości ruchu w poszczególnych etapach poszukiwań, aby przyspieszyć działanie oraz prosty i wyraźny zestaw parametrów decydujących o przerwaniu pracy w każdym przypadku obciążenia.

7.5.2 Budowa modelu zachowań w oparciu o działanie hybrydowe iteracyjne

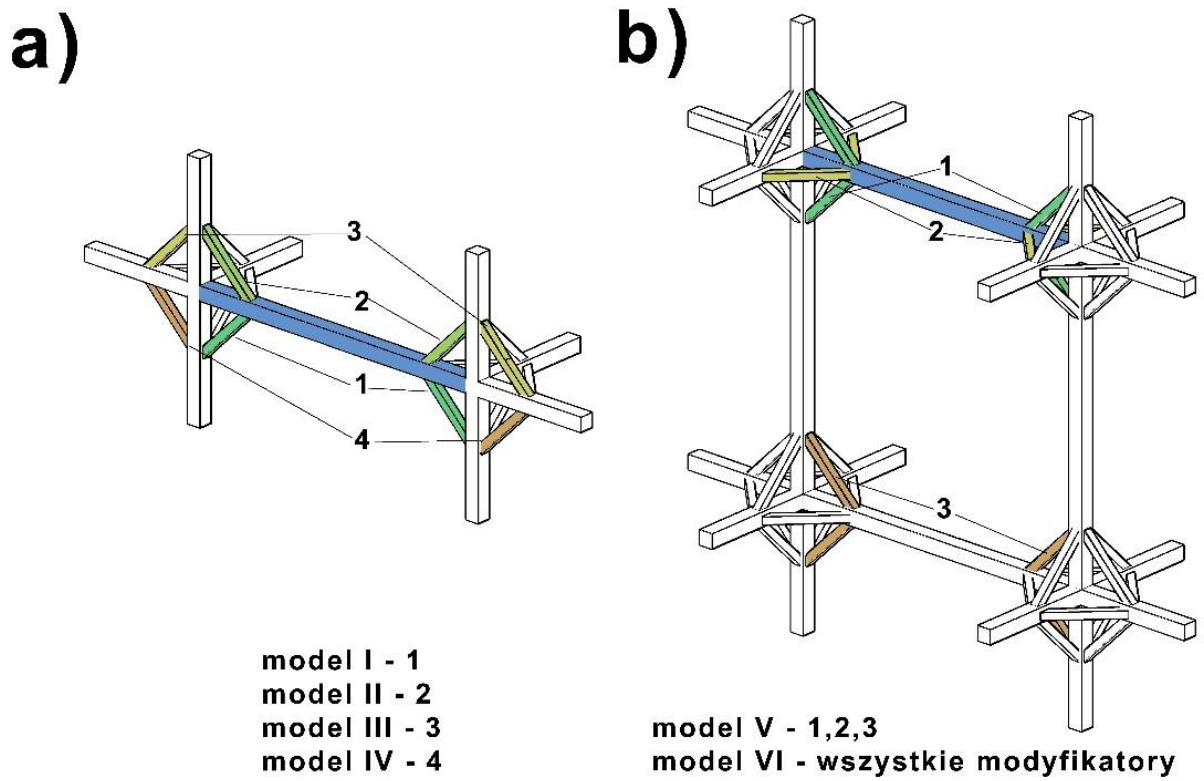
W procesie poszukiwania układów modyfikatorów, zauważalna była różnica ich działania podczas kompensacji ugięć oraz redukcji naprężeń. Efektywny wzrost osiowości elementu nośnego następował poprzez dobranie układów 4 przynależnych do danego elementu siłowników. Najczęściej dla niższych wartości ugięć kompensacja odbywała się z użyciem dwóch dolnych siłowników. Wraz z dalszym wzrostem obciążeń i ugięć dwa kolejne stopniowo były aktywowane i przenosiły coraz większe siły. Z kolei przenoszenie naprężeń i próba ich równomiernej dystrybucji w sytuacji znacznego naprężenia jednego z elementów skutkowała aktywacją wszystkich 3 lub 4 siłowników na jednym z końców elementu. W żadnym z badanych przypadków naprężenia nie były redystrybuowane w równym stopniu na obu końcach elementu. W przypadku przeciążenia dwóch sąsiednich prętów następowała aktywacja siłowników na wzajemnie skrajnych końcach. Rozkład naprężeń odbywał się najczęściej w kierunku prostopadłym poprzez skrócenie lub wydłużenie dolnego oraz górnego siłownika. Często zjawisku temu towarzyszyło kontrowanie ugięć przyległych elementów przez siłowniki zlokalizowane po przeciwległej stronie węzła. W wyniku złożonej reakcji w 52% przypadków redystrybucja naprężeń odbywała się z wykorzystaniem całego węzła. Oznacza to, że proces redystrybucji naprężeń jest znacznie bardziej złożony, niż prosta kompensacja ugięć, lecz powinien stanowić dopiero drugą formę reakcji, zabezpieczającą przed przeciążeniem struktury. Bardziej złożony proces skutkuje mniejszym procentem skutecznych reakcji, co obniża stopień bezpieczeństwa korzystania ze struktury. Ponadto należy opracować kolejne stopnie modeli zachowań dla modyfikatorów. Ich aktywacja powinna następować po

przekroczeniu odpowiednich progów aktywacji zdefiniowanych przez naprężenia i ugięcia. Wyróżnia się 4 podstawowe modele jakie powinny współwystępować w jednym schemacie zachowań. Występują one w kolejności od najmniejszych obciążeń stopniowo narastając do granicy wytrzymałości struktury. Charakteryzują się jak najmniejszym stopniem złożoności ruchu w kolejnych etapach dla maksymalizacji wyników i zmniejszenia zapotrzebowania na moc obliczeniową w celu przyspieszenia uzyskiwania wyników.

Pierwszy model, podstawowy nie nosi cech responsywności. W celu minimalizacji zużycia elementów struktury oraz elementów ruchomych należy ograniczyć do minimum ich działanie. W zakresie do 80% maksymalnego ugięcia nie należy używać funkcji teleskopowania. Wszystkie modyfikatory powinny pozostać w stanie spoczynku, co oznacza swobodną zmianę długości bez wywoływania dodatkowych wewnętrznych naprężeń. Model w całości reaguje w sposób naturalny jako struktura statyczna. Nie wykorzystuje energii kinetycznej. Takie sterowanie strukturą realizowane jest do momentu przekroczenia ugięcia przez jeden dowolny element w odniesieniu do jego osi lub dowolny punkt struktury jako całego modelu.

Po przekroczeniu pierwszego progu ugięcia powinno nastąpić przeniesienie sterowania strukturą na drugi model zachowań. Wobec wszystkich elementów, które przekraczają stan ugięcia 80% dopuszczalnej strzałki ugięcia aktywowane są dwa dolne siłowniki przynależne do elementu o znacznym odkształceniu. Jeśli natomiast utrata osiowości następuje w płaszczyźnie innej niż pionowa, analogicznie należy aktywować dwa siłowniki znajdujące się w płaszczyźnie największych odkształceń. Oznacza to konieczność monitorowania deformacji struktury i jej charakteru w sposób przestrzenny. Wystarczającym dla opisanych zastosowań jest system monitoringu DIC korzystający z systemu kamer badających zmiany geometrii modelu przestrzennego. Stałej kontroli powinny podlegać również siłowniki generujące znaczne naprężenia minimalnymi zmianami długości. Ich teleskopowanie prowadzić będzie do redukcji ugięć, lecz proces ten ograniczony jest przez maksymalny zasięg teleskopowania oraz wytrzymałość siłowników. Oznacza to konieczność podzielenia drugiego modelu zachowań na etapy. W pierwszym aktywowane są wyłącznie dwa siłowniki na przeciwległych końcach elementu ugiętego. Przy ponownym przekroczeniu 80% ugięcia należy aktywować dwa kolejne przeciwległe siłowniki. Dla każdego węzła gradacją tą można wyróżnić 3 kolejne etapy narastania ugięć, lecz w części węzłów zbiegają się 4 współpłaszczyznowe siłowniki pozwalając na dodatkowy etap w modelu zachowań. Każdorazowa aktywacja kolejnych siłowników redukuje ugięcia elementu w coraz mniejszym stopniu jednocześnie wywołując postęp obrotu na węźle. Oznacza to konieczność monitorowania rotacji całego węzła. Jest ona również możliwa przy użyciu systemu DIC. Model zachowań traci funkcjonalność w momencie przekroczenia 80% ugięcia dowolnego elementu gdy nie jest możliwe aktywowanie kolejnych modyfikatorów. Zakłada się że stan ten mimo przekroczenia ugięcia, nie jest stanem przekroczenia dopuszczalnych naprężeń. Podczas całego procesu ruchu struktury należy więc monitorować naprężenia w punktach krytycznych. W przypadku przekroczenia naprężeń model zachowań traci funkcjonalność i konieczne jest wykorzystanie ostatniego z modeli.

Trzeci model skupiony jest na minimalizacji naprężeń i dopuszcza występowanie ugięć większych od maksymalnych założonych. W przeciwieństwie do poprzednich modeli skupionych na zachowaniu funkcjonalności struktury skupia się on na jej wytrzymałości. Aktywowane mogą być dowolne siłowniki, nie występuje zasada aktywacji modyfikatorów parami lub w sekwencjach. Nadal jednak w celu skrócenia czasu uzyskiwania wyników definiuje się kolejność aktywacji siłowników rozpoczynając od zlokalizowanych najbliżej przeciążonego elementu nośnego. Następnie priorytet aktywacji mają modyfikatory zlokalizowane poniżej elementu nośnego. Zachowanie to jest wynikiem obserwacji wcześniejszych struktur gdzie algorytm ewolucyjny wykorzystywał w znacznym stopniu modyfikatory dolnych elementów jako wywołujących największe zmiany w układzie naprężeń. Oznacza to aktywację siłowników w określonej kolejności, lecz po przebadaniu określonej liczby układów następuje pełna dowolność aktywacji kolejnych siłowników.



Grafika 52.Schematyczne przedstawienie działania kolejnych 4 modeli zachowań składających się na hybrydowy iteracyjny model odpowiedzi struktury na obciążenia zewnętrzne.

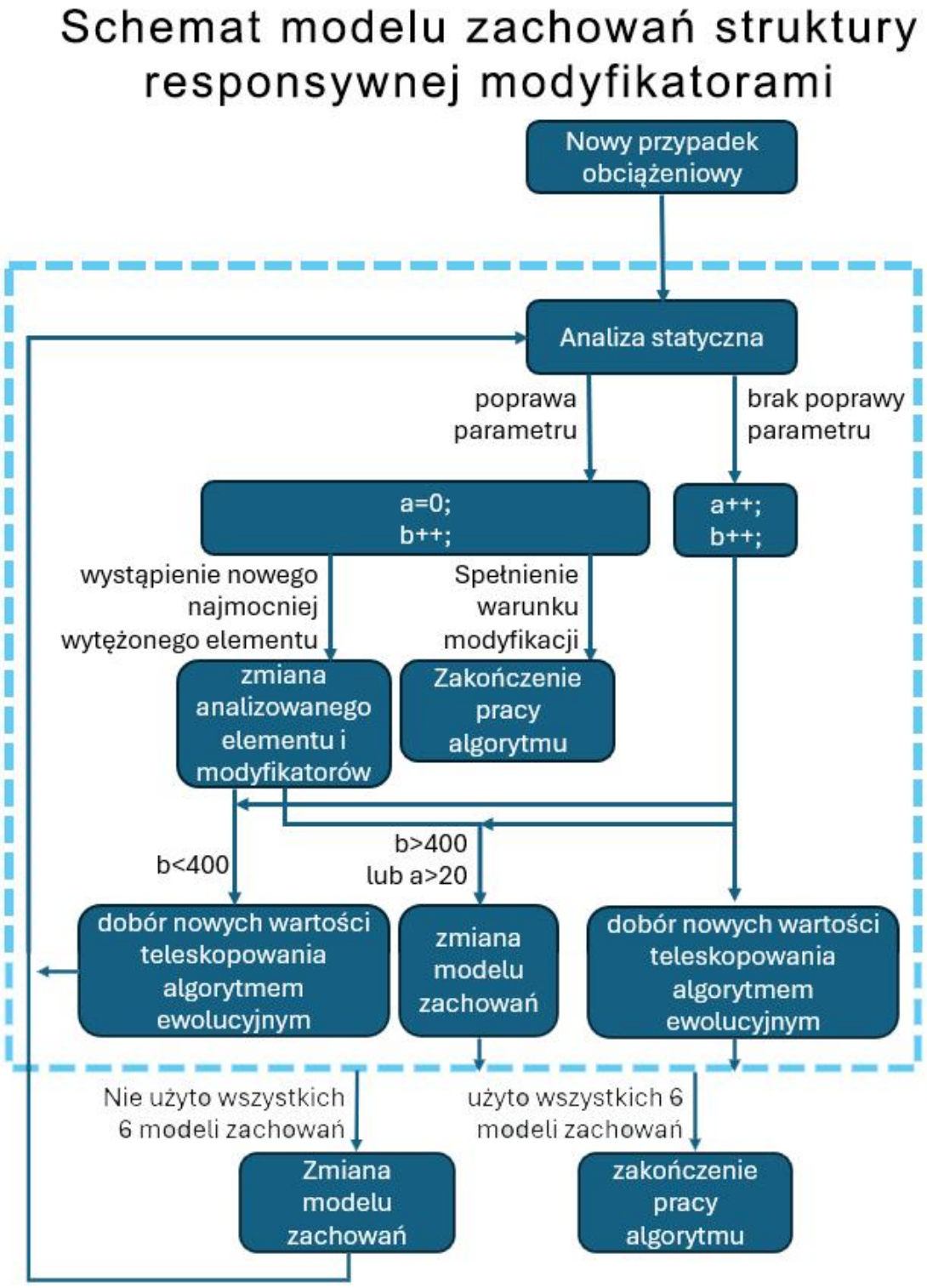
Po każdorazowej zmianie przypadku obciążeniowego następuje ponowny powrót struktury do pierwszego modelu zachowań oraz ponowne poszukiwanie ruchów redukujących ugięcia, a następnie naprężenia. Kolejność aktywacji siłowników przedstawiona została na Grafika 52. Kolorem niebieskim oznaczony został element który uległ przeciążeniu lub nadmiernemu ugięciu. Oznaczone wokół niego modyfikatory są kolejno aktywowane zgodnie z oznaczeniami liczbowymi. Rozwiązanie to ma na celu znaczne przyspieszenie procesu poszukiwania efektywnych rozwiązań. Model po znalezieniu układu modyfikatorów, który spełnia warunki redukcji naprężeń powinien zaprzestać dalszych poszukiwań przechodząc w stan oczekiwania na zmianę warunków sił zewnętrznych. W ten sposób zakłada się redukcję zużycia energii potrzebnej na zarządzanie i ruch strukturą. Układ „a)" prezentuje modyfikatory użyte do kompensacji ugięć, z kolei „b)" redukują naprężenia.

W celu weryfikacji opisanego modelu zachowań przygotowano jego symulację. Zaprogramowano w Rhinoceros Grasshopper model zachowań dla struktury o komórkach kwadratowych. Modelowi podlegają wszystkie siłowniki, a forma struktur jest identyczna do wcześniej badanych i opisywanych. Weryfikacja polegała na określeniu czasu, jakiego model potrzebuje na uzyskanie co najmniej tak dużej redukcji poszukiwanego parametru, jaką wypracował model ogólny w poprzednich badaniach. Wartością referencyjną był czas modyfikacji przez ogólny model zachowań dla każdego z 6 przypadków obciążeniowych. Zebrane podczas pierwszego badania wyniki czasu dla każdego badania wynoszą od 11 minut do 13 minut. Dla nowego modelu zachowań celem jest uzyskanie wartości parametru poszukiwanego wcześniej przez model ogólny. W celu implementacji modelu zachowań do symulacji, zmodyfikowano dotychczasowe struktury.

Dotychczasowo sterowany algorytmem ewolucyjnym układ przestrzenny został zastąpiony iteracyjno-ewolucyjnym. Jest to model hybrydowy w którym wyróżnia się „zakresy" tożsame z modelami z Grafika 52 oraz ewolucje znane z wcześniejszych implementacji algorytmu ewolucyjnego do sterowania. Z wykorzystaniem nakładki programowej ***„Annemone"*** opracowano iteracyjne zachowanie modelu. Przy przyłożeniu obciążenia zewnętrznego program rozpoznaje zmianę przypadku obciążeniowego i rozpoczyna poszukiwanie formy od wykorzystania „modelu zachowań nr I". Poszukuje efektywnych wartości odpowiednich modyfikatorów dla elementów strukturalnych o najwyższym wytężeniu. Granicę poszukiwań określono jako 20 prób przed zakończeniem poszukiwań w danym modelu. Oznacza to, że jeśli przez kolejne 20 powtórzeń model nie uzyska redukcji wartości ugięć lub naprężeń przejdzie do użycia kolejnego modelu zachowań Każda próba oznacza losową lub kierunkową pojedynczą zmianę wartości parametrów wydłużenia siłowników. Przy znalezieniu wartości teleskopowania modyfikatorów, która redukuje analizowany parametr licznik 20 prób resetuje się. Maksymalną liczbę powtórzeń określono na 400 prób przed wymuszonym przejściem do kolejnego modelu. W przypadku redukcji ugięcia lub naprężenia na jednym z elementów poniżej wartości innego elementu, algorytm automatycznie rozpoczyna operowanie modyfikatorami przynależnymi do nowego najmocniej wytężonego elementu strukturalnego. Model zachowań różni się więc, od dotychczas stosowanych ponieważ odczytuje, którymi elementami przestrzennymi musi w danym momencie operować. Dla każdego pręta ręcznie przydzielano modyfikatory które mają być aktywowane w kolejnych modelach zachowań. Część elementów jak skrajne boczne, górne i dolne charakteryzuje się niepełną gamą modeli zachowań ze względu na brak odpowiadających im modyfikatorów. Model przerywa proces poszukiwania teleskopowań modyfikatorów natychmiast po uzyskaniu żądanej wartości parametru. Kolejno badanie prowadzone jest w celu uzyskania dla każdego z 6 przypadków spełnienia wszystkich warunków statycznych struktury jakie dotychczas mierzono w modelach.

Dla modelu zachowań nie definiowano bezpiecznych geometrii, zachowań w sytuacjach krytycznego przeciążenia lub utraty częściowej stateczności. Nie uwzględniano szybkości realizacji geometrii przez siłowniki. Badania prowadzono na wynikowych geometriach bez uwzględniania pośrednich ruchów przy transformacji między geometriami. Analizy prowadzono dla statycznych struktur z wykorzystaniem analizy nieliniowej.

Jeśli nie uzyskano odpowiedniej wartości parametru badaniu przypisywano czas poszukiwań równy czasowi potrzebnemu na uzyskanie wyniku przez wcześniejszy model. Badania prowadzono na jednej jednostce obliczeniowej wyposażonej w procesor Intel Core i7-9750H, 16-wątkowy o częstotliwości 3,4Ghz bez przyspieszania zegara wewnętrznego. Najważniejszym parametrem badania jest proporcja czasu poszukiwania wyniku. Oznacza to, że najbardziej miarowym parametrem badania będzie proporcja czasu podawana jako ułamek czasu referencyjnego uzyskanego dla modelu ogólnego zachowań. Wartość ta podawana jest w procentach i wynosi maksymalnie 100%.



Grafika 53.Schemat działania modelu zachowań hybrydowo-iteracyjnego pozwalającego na przyspieszenie reakcji struktury.

7.5.3 Wyniki badań

Dla kolejnych 18 przypadków obciążeniowych podzielonych na 3 badania minimalizacji 3 różnych parametrów przeprowadzono badania skuteczności nowego systemu zachowań. Wyniki zebrano w formie tabeli. Dane na temat czasu każdego badania stanowią poddawany analizie wynik, natomiast dodatkowe informacje, jak ostateczny model zachowań, liczba prób i zmian geometrii, stanowi dodatkowy zakres informacji o cząstkowej skuteczności poszczególnych modeli i sposobie działania algorytmu. Podczas każdego badania poszukiwanie formy rozpoczynano od określenia wyjściowych wartości parametrów zerowego teleskopowania wszystkich siłowników. Dla każdego przypadku udało się w krótszym czasie znaleźć geometrię spełniającą warunek równości parametru poszukiwanego z próbą referencyjną wcześniejszego badania. Przyspieszenie poszukiwania geometrii wynosiło od 62% do 84% przy wykorzystaniu opracowanego algorytmu iteracyjno-ewolucyjnego jak przedstawiono w Tabela 18. Czas badania znacznie różnił się w każdym z badanych przypadków. Dla żadnego z badanych przypadków obciążeniowych nie zachowywał on wartości stałej lub zbliżonej do stałej. Wskazuje to na dużą zależność wyniku od początkowej efektywności algorytmu. Zauważa się jednak ogólną tendencję do znacznie szybszego poszukiwania geometrii dla struktur smukłych niż dla układów wspornikowych. Różnica ta waha się od 105% do 257%. Wzrost ten jednak zależny jest od rodzaju obciążenia struktury wertykalnej różnicując obciążenia ukośne pionowe i w pełni pionowe. Większość struktur uzyskiwała ostateczne geometrie przed włączeniem modelu zachowań nr 4 do badań. Tendencja ta utrzymuje się w szczególności dla mniejszych obciążeń nie wywołujących istotnych dla stateczności struktury naprężeń. Pozwala to wnioskować, że model dobrze reaguje na przypadki wymagające reakcji w zakresie redukcji ugięć. Znacznie więcej czasu jest potrzebne na uzyskanie redukcji naprężeń. Liczba geometrii pomiędzy rozpoczęciem działania algorytmu a uzyskaniem odpowiedniej geometrii był proporcjonalny do czasu poszukiwań. Mniejszy związek miał on z ostatecznym numerem modelu zachowań. Jedynie w 5 przypadkach badań częstotliwość zmian geometrii przekraczała 2Hz. W pozostałych przypadkach pozostawała średnio na poziomie 0,6Hz. Żadna jednak z wartości częstotliwości zmian nie była odpowiednio niska, aby założyć uzyskanie wszystkich uzyskanych geometrii przez strukturę fizyczną. Oznacza to konieczność opracowania kodu blokującego implementację nowej geometrii przed pełnym wprowadzeniem uprzedniej do modelu fizycznego.

Podczas przeprowadzania badań rejestrowano zmianę wartości parametrów w czasie, aby uzyskać dane na temat procentowej zmiany wartości w zależności od czasu. Stwierdzono, że 80% skuteczności ostatecznej redukcji wartości parametru uzyskiwano po upływie średnio 60% czasu badania. Nie jest to wartość argumentująca obniżenie celów modyfikacji dla kolejnych prób oraz w rzeczywistych strukturach, lecz pozwala na redukcję czasu w przypadkach skrajnie małych obciążeń. Dla prób badawczych o znacznej liczbie geometrii poprawiających wartość parametru, redukcja jego wartości była nierówna, dla części prób uzyskując największą redukcję w początkowej fazie oraz dla części w ostatniej. Znacznie bardziej liniowe zmiany wartości parametru występowały dla prób o mniejszej liczbie geometrii pośrednich. Najczęstsze zmiany geometrii występowały dla modeli nr 2 oraz 3. Tłumaczy się to znaczną liczbą aktywowanych siłowników oraz aktywacją modelu na wczesnym etapie poszukiwań geometrii. Wyjątek stanowiło badanie podczas redukcji strzałki ugięcia gdzie najwięcej zmian pośrednich odnotowywano dla modelu nr 1.

Podczas procesów modyfikacji każdy modyfikator aktywny w danym modelu zachowań miał jednakowy priorytet obsługi przez system. Algorytm najczęściej w sposób losowy dobierał kolejność teleskopowania. Niezależnie jednak od kolejności użycia siłowników, w każdym przypadku największym udziałem w modyfikacji naprężeń odznaczały się modyfikatory na wysokości drugich od dołu węzłów. Spośród nich najefektywniejsze pozostawały modyfikatory orientowane wertykalnie. Dla ugięć z kolei nie określono najefektywniejszych modyfikatorów. Redukcja ugięć w wielu przypadkach oparta była o lokalną kompensację nieosiowości elementów strukturalnych. Implikuje to szereg trudności w przypadku minimalizacji

modyfikatorów. Dla ugięć i naprężeń należy stosować odmienne strategie lokalizacji elementów ruchomych, których unifikacja stanowi wyzwanie badawcze.

Tabela 18. Czas liczony w sekundach potrzebny na uzyskanie wyników takich samych lub wyższych przy użyciu modelu hybrydowo-iteracyjnego w porównaniu do modelu sterowanego algorytmem ewolucyjnych wykorzystanym we wcześniejszym badaniu.

model ortogonalny						
	1	2	3	4	5	6
	pionowe	ukośne	boczne osiowe	boczne ukośne	w układzie pionowym od spodu	w układzie pionowym poprzecznie
	geometria referencyjna					
czas poszukiwania formy	95	74	142	78	290	257
ostateczny model zachowań	2	1	3	2	6	6
liczba zmian geometrii przed uzyskaniem wyniku	62	163	38	67	429	521
	maksymalna rotacja					
czas poszukiwania formy	81	85	92	154	181	206
ostateczny model zachowań	2	2	3	3	5	6
liczba zmian geometrii przed uzyskaniem wyniku	59	73	74	94	51	27
	strzałka ugięcia					
czas poszukiwania formy	107	101	135	99	204	316
ostateczny model zachowań	3	3	4	3	5	6
liczba zmian geometrii przed uzyskaniem wyniku	48	45	63	83	106	715
	strzałka ugięcia					
czas poszukiwania formy	92	97	126	104	178	183
ostateczny model zachowań	3	4	4	3	4	5
liczba zmian geometrii przed uzyskaniem wyniku	87	93	52	46	107	231

7.5.4 Wnioski

Wszystkie opracowane modele zachowań są skuteczne i wykorzystywane na odpowiednim etapie modyfikacji. Całkowity model zachowań znacząco redukuje czas potrzebny na uzyskanie identycznych wartości redukcji parametrów statycznych. Przekłada się to na możliwość uzyskania dodatkowej efektywności lub oszczędności ze względu na redukcję aparatu obliczeniowego struktury zmniejszającego zapotrzebowanie na energię operacyjną. Model można dodatkowo uzupełnić o szacowanie docelowego podmodelu w celu określenia w szybszy sposób jakimi zachowaniami struktury należy kształtować reakcję.

Model charakteryzuje się jednak znaczną indywidualizacją i może być stosowany efektywnie w strukturach o znacznej proporcji wysokości do pozostałych wymiarów. Nie uwzględnia on charakterystycznych dla innych modeli parametrów, jak zmiana smukłości prętów, sztywność połączeń, czy częstotliwość modalna struktury. Dla modeli o innych proporcjach wymiarów lub innym sposobie mocowania elementów, bądź podparcia, model zachowań należy definiować w oparciu o jego własne charakterystyczne tendencje teleskopowania modyfikatorów.

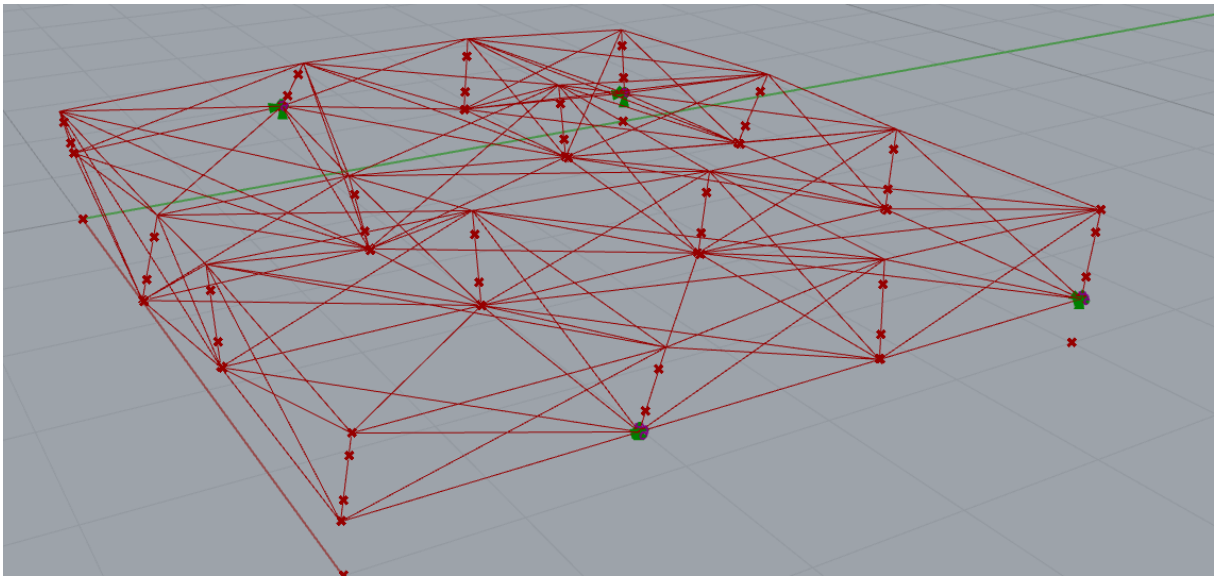
7.6 Modyfikacja stref węzłowych struktur o swobodnej formie

Dotychczasowe badania modyfikatorów struktur dyskretnych skupione były wokół obiektów o znacznej wysokości względem pozostałych wymiarów kubaturowych. Zauważono jednak, że sposób utwierdzenia lub zamocowania elementów, a dalej sposób ich pracy zależny jest w znacznym stopniu od charakteru pracy elementów. Zależnie od tego w części przypadków statycznych głównymi pozostają modyfikatory orientowane pionowo podczas gdy układy wertykalne przynależą pozostałym przypadkom. Badano struktury ramowe zachowujące sztywność poprzez węzły oraz modele o charakterze prętowym z trójkątnymi komórkami podziału topologicznego. Określono różnice pracy obu rodzajów struktur oraz priorytety ich zachowań. Na dalszym etapie prac badaniu podlegać będzie model swobodny o nieregularnym układzie węzłów, lecz wykorzystujący regularną topologię elementów. Model ma pozwolić na zdefiniowanie możliwie uniwersalnych zasad kształtowania zachowań struktur. Zasady te, o dowolnym stopniu szczegółowości mają posłużyć jako baza dla indywidualnych matryc zachowań.

7.6.1 Budowa modelu

Na podstawie dotychczasowych wyników badań oraz przeglądu literaturowego opracowano strukturę pozwalającą na badanie zachowań założonej grupy układów statycznych poprzez pojedynczą strukturę przestrzenną. Jest ona kratownicową strukturą przestrzenną, gdzie dolne oraz górne pasmo przesunięte są wzajemnie o pół ogniwa. Stanowi ona najpopularniejszy i jeden z najbardziej regularnych układów pozwalających na prostą ewaluację zachowań struktur przestrzennych [171][172]. Model ten został opracowany w oprogramowaniu Rhinoceros Grasshopper.

Na płaszczyźnie zdefiniowanej 4 punktami rozpięto siatkę kwadratową z użyciem funkcji ***„tiling square”***. Jej rozmiar określono jako 3 na 3 komórki. Następnie funkcją ***„offset”*** zdefiniowano drugą komplementarną płaszczyznę oddaloną o 1m od oryginalnej. Na płaszczyźnie tej zdefiniowano analogiczną siatkę. Dalej zmodyfikowano siatki poprzez przemieszczenie pionowe 3 punktów narożnych co skutkowało utratą wszystkich osi symetrii w strukturze. Zdeformowało to komórki kwadratowe do nieregularnych czworokątnych układów, a w celu połączenia obu siatek użyto funkcji ***„closest points in 3D”*** pozwalającej na połączenie najbliższych sobie odpowiadających punktów na obu siatkach. Dla każdego punktu górnej siatki funkcja poszukiwała 5 punktów na przeciwległej siatce dolnej. Miedzy punktem początkowym, a każdym znalezionym przez funkcję punktem końcowym rozciągnięto linie włączone w pulę elementów szkieletu struktury przestrzennej. W efekcie uzyskano 214 linii definiujących kierunki osi elementów struktury prętowej na cele badania. Model statyczny struktury został przedstawiony na Grafika 54. Zdefiniowano dla niego punkty podparcia oznaczone na grafice kolorem zielonym. Struktura posiada dwa podparcia nieprzesuwne, obrotowe na sąsiednich narożach, natomiast dwa kolejne o identycznym stopniu swobody zlokalizowane są na krawędziach i odsunięte o jedną komórkę od naroży w kierunku sąsiednich węzłów. Układ taki tworzy z jednej strony strukturę typowo podpartą w narożu, natomiast z przeciwległej strony wywołuje nadwieszenie. W obrębie jednej struktury uzyskano możliwość badania obu zjawisk wzajemnie na siebie oddziałujących. Jednocześnie głębokość modelu przy zmianie układu sił i obrocie modelu o 90 stopni w płaszczyźnie pionowej pozwoli na uzyskanie obiektu o dominującym wymiarze wysokości umożliwiając badania wysokiego obiektu, nieregularnego strukturalnie. Zakrzywienie płaszczyzny i dalej całej struktury daje możliwość badania zjawiska pionowego, odwrotnego obciążenia struktury przy zadanych obciążeniach bocznych, orientowanych w konkretnych kierunkach, a kształt nawiązujący do



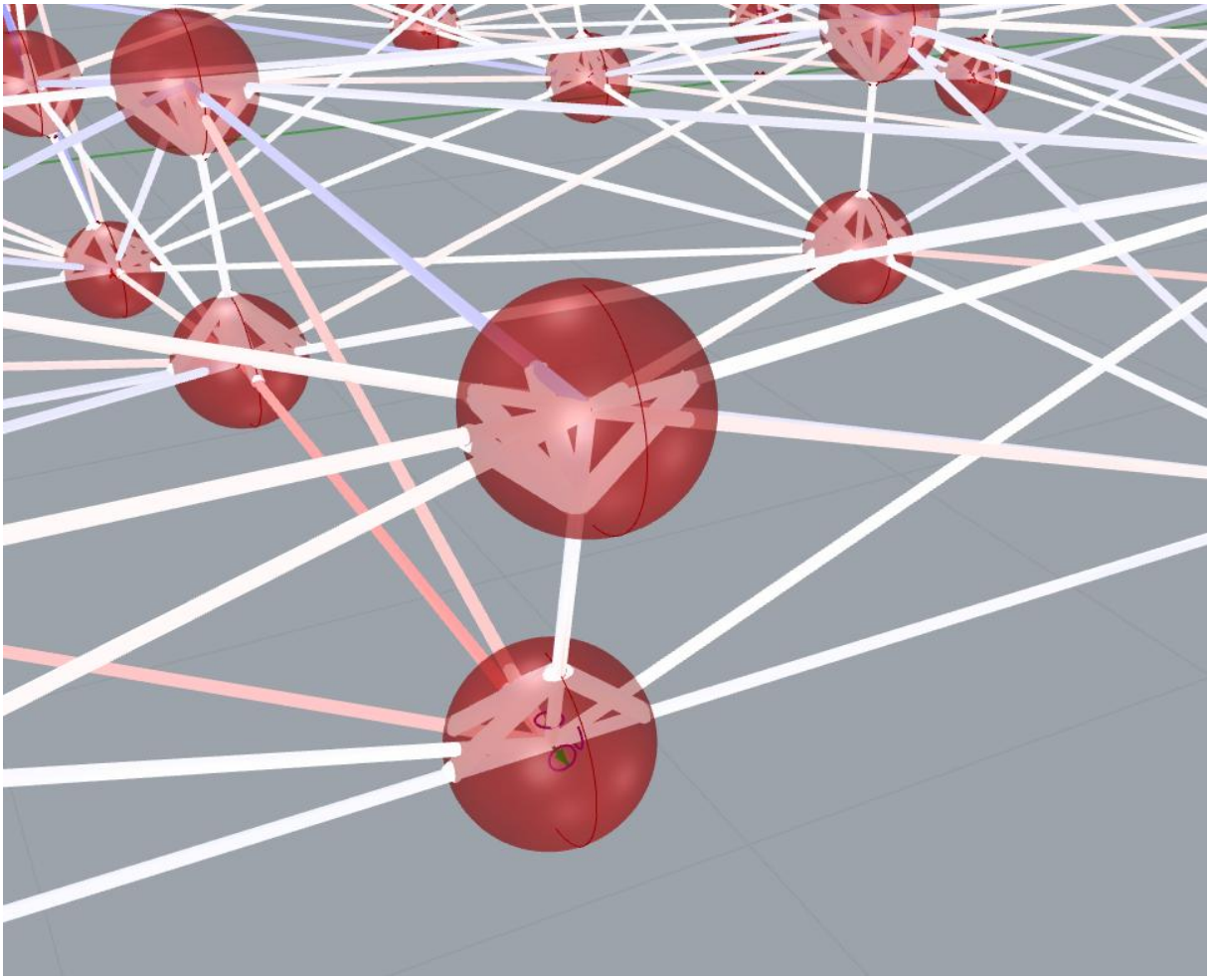
Grafika 54.Schemat liniowy struktury o swobodnej geometrii. Model posiada powtarzalne węzły pod względem topologicznym, lecz o indywidualnych zależnościach kątowych między elementami.

przykryć strukturalnych wskazuje na zasadność badania niesymetrycznych układów obciążeniowych.

W kolejnym kroku zamodelowano modyfikatory. Wokół każdego węzła wygenerowano sferę o zdefiniowanej średnicy ***„x”*** której nadano wartość 1,5m. Następnie dla każdej sfery przeprowadzono sprawdzenie punktów przecięcia ze wszystkimi odcinkami definiującymi pręty. W wyniku działania wokół każdego węzła powstało dodatkowe od 3 do 9 punktów zależnie od lokalizacji węzła i jego zależności topologicznych. W wyniku operacji na każdym odcinku powstał podział na 3 nierówne elementy. Dwa w strefie węzłowej oraz część środkową. Ostatecznie na cele analizy pojedyncze pręty zastąpiono trzema zgodnie z opisywanym podziałem. Wszystkie połączenia między strefą węzłową oraz częścią środkową prętów zdefiniowano jako połączenia sztywne, o sztywności równej ciągłemu odcinkowi pręta. Samo połączenie dzięki temu nie wywiera wpływu na układ statyczny. W celu utworzenia modyfikatorów ponownie funkcją ***„closest points in 3D”*** Połączono punkty leżące na słupach łączących oba pasma struktur ze wszystkimi odpowiadającymi im punktami zdefiniowanymi przez tę samą sferę. W wyniku działania wygenerowano 84 odcinki poprzecznie łączące pasma górne oraz dolne ze słupami kratownicy przestrzennej. W ostatnim kroku badano które z odcinków przecinają się z krzyżulcami kratownicy. Jeśli modyfikator posiadał punkt przecięcia, funkcja ***„divide by point”*** dzieliła go na dwa osobne współosiowe odcinki, co zwiększyło liczbę modyfikatorów do ostatecznie 132 sztuk. Przykład węzła wygenerowanego w procesie modelowania struktury przedstawia Grafika 55. Przedstawiona została również sfera wyznaczająca punkty przecięcia, stanowiące punkty mocowania modyfikatorów. Średnica sfery jest zmienną, co pozwala na dostosowywanie długości modyfikatorów. Wartość ta może być zmienna dla wszystkich modyfikatorów jednocześnie, osobno dla każdego pasma lub indywidualnie dla każdego węzła, niemniej w obrębie pojedynczego węzła ustala się wyłącznie jedną długość modyfikatorów. Liczba modyfikatorów jest różna dla każdego węzła zgodnie z liczbą przecięć generowanych przez sferę co oznacza różną zdolność usztywnienia struktury w różnych jej punktach.

Po określeniu geometrii i topologii struktury, zdefiniowano parametry statyczne. Wszystkie przekroje statyczne stanowiły pierścienie o średnicy zewnętrznej 20cm oraz wewnętrznej 17cm. Model ma podlegać znacznym ugięciom dlatego też zdecydowano się na wykorzystanie stali sprężynowej HF50 o wysokiej elastyczności i dużym zakresie stanu odkształceń sprężystych. Elastyczność ta jest konieczna ze względu na zakładane znaczne deformacje chwilowe modelu. Jednocześnie stal ta ze względu na niską zawartość węgla nie

nadaje się do spawania co wymusza szereg rozwiązań połączeń pomijających spawy i w ich miejsce wykorzystujących śrubowanie. Zagadnienie to jednak nie stanowi zakresu opracowania. Na potrzeby symulacji zdefiniowano wszystkie połączenia w centrach węzłów jako przegubowe. Dzięki temu sztywność w znacznym stopniu zależna będzie od pracy modyfikatorów.



Grafika 55.Każdy węzeł zdefiniowany jest jako złożona strefa węzłowa wyposażona w modyfikatory.

Podobnie jak w przypadku wcześniejszych badań, ruch modyfikatorów oparty był o odkształcenia prętów poprzez wydłużenie parametrem ***„epsilon”*** funkcją dostępną w Grasshopper w dodatku analizy statycznej Karamba 3D. Dla każdego ze 132 modyfikatorów przypisano indywidualny parametr odkształcalności w zakresie od -20cm do 20cm. Następnie wszystkie parametry podłączono do algorytmu ewolucyjnego.

Algorytm podobnie jak we wcześniejszych przypadkach orientowany był na redukcje obrotów na węzłach, ujednolicenie naprężeń oraz redukcję strzałki ugięcia. Analizy prowadzono z wykorzystaniem dotychczasowych parametrów działania algorytmu ewolucyjnego. Dla każdego badania określono 10 minut działania algorytmu. Wszystkie badania rozpoczynano od zerowych wartości teleskopowania dla ujednolicenia warunków wstępnych symulacji.

7.6.2 Wyniki badań

Dla każdego przypadku obciążeniowego uzyskano geometrię ostateczną, lecz w szeregu przypadków nie spełniała ona warunków efektywności. Badania redukcji obrotu na węzłach oraz maksymalnych naprężeń wyłącznie w 3 przypadkach dały lepsze wyniki, niż statyczna struktura. Redukcja wartości była niska i wynosiła maksymalnie 11% w przypadku rotacji oraz 3,5% obniżenia maksymalnych naprężeń. Te same badania powtórzone przy losowych wartościach początkowych teleskopowania wykazały znaczący spadek efektywności, pozwalając na uzyskanie najwyżej 8% efektywności, co najmniej kilkunastokrotnie podnosząc wartości pozostałych parametrów statycznych. Wzrosty te wykluczają model zachowań z wykorzystania w fizycznych strukturach. Wszystkie wartości wynikowe badań zebrano w Tabela 19.

Tabela 19. Wyniki badań dla różnych przypadków obciążeniowych. Każda próba badawcza uzyskiwała priorytet na redukcję pojedynczego parametru.

przypadki obciążeniowe	pionowe	ukośne	podrywanie przez siłę boczną	boczne ukośne	w układzie pionowym od spodu	w układzie pionowym poprzecznie	obciążenia w układzie pionowym i poprzecznym, zróżnicowane na każdym poziomie
	geometria referencyjna						
maksymalna rotacja na węzłach [*]	0,44	0,39	0,08	0,39	0,38	0,85	0,49
średnia rotacja na węzłach [*]	0,15	0,14	0,01	0,14	0,13	0,59	0,18
maksymalne naprężenia [MPa]	4,78	5,14	1,08	4,02	4,03	15,33	4,17
średnie naprężenia [MPa]	0,40	0,39	0,05	0,34	0,33	0,56	0,25
strzałka ugięcia [cm]	29,46	28,49	0,68	27,57	26,60	53,72	19,77
	maksymalna rotacja						
maksymalna rotacja na węzłach [*]	0,58	0,57	0,49	0,55	0,55	0,90	0,44
średnia rotacja na węzłach [*]	0,22	0,21	0,14	0,21	0,20	0,60	0,19
maksymalne naprężenia [MPa]	4,77	5,12	3,37	3,95	4,02	15,30	2,07
średnie naprężenia [MPa]	0,82	0,81	0,51	0,72	0,68	0,78	0,29
strzałka ugięcia [cm]	30,04	29,02	4,31	28,24	27,20	53,86	21,21
	strzałka ugięcia						
maksymalna rotacja na węzłach [*]	4,11	3,94	3,33	4,15	3,77	4,10	3,07
średnia rotacja na węzłach [*]	0,85	0,86	0,76	0,93	0,88	0,96	0,79
maksymalne naprężenia [MPa]	2255,68	2018,23	1516,74	1831,42	1710,76	1499,03	1472,41
średnie naprężenia [MPa]	65,65	59,73	36,92	55,47	58,28	50,18	45,20
strzałka ugięcia [cm]	24,28	21,86	16,83	22,48	21,03	53,41	17,64
	maksymalne naprężenia						
maksymalna rotacja na węzłach [*]	1,26	1,31	1,18	1,30	1,32	1,35	0,82
średnia rotacja na węzłach [*]	0,39	0,37	0,34	0,37	0,35	0,63	0,26
maksymalne naprężenia [MPa]	5,41	5,42	5,49	5,40	5,56	15,31	4,08
średnie naprężenia [MPa]	1,42	1,39	1,14	1,34	1,27	1,15	0,67
strzałka ugięcia [cm]	30,73	29,78	9,90	28,87	27,76	53,43	19,92

7.6.2.1 Zjawisko kosztu parametrycznego wpływu geometrii na układ naprężeń

Znacznie wyraźniej niż w przypadku wcześniejszych badań, jeden parametr był redukowany kosztem wzrostu pozostałych. Zauważalne jest to szczególnie dla badania redukcji strzałki ugięcia, gdzie maksymalne naprężenia wzrastały do nieakceptowalnych wartości. Jednocześnie strzałka ugięcia pozostawała jedynym parametrem dla którego uzyskiwano wymiernie niskie wartości. Wyniki wskazują na znaczący koszt redukcji dowolnego parametru i możliwość użycia modyfikatorów wyłącznie do redukcji maksymalnych ugięć. W celu określenia granicy efektywności przeprowadzono dodatkowe badanie zależności wzrostu wartości wszystkich parametrów przy próbach redukcji strzałki ugięcia. Określono docelowe wartości redukcji ugięć jako równe 2,5%, 5%, 7,5% oraz 10%. Dla każdej z wartości wykorzystano algorytm ewolucyjny na potrzeby redukcji maksymalnych naprężeń. Oznacza to ponownie optymalizację jednoparametrową, lecz przy założeniu wcześniejszej redukcji drugiego parametru o zakładaną wartość. Wyniki przedstawiono w Tabela 20.

Tabela 20.Wyniki badania wpływu kosztu parametru ugięcia na stopień wytężenia elementów struktury. Wartość „…" oznacza nieuzyskanie końcowej geometrii.

Zestawienie wartości wzrostu naprężeń maksymalnych w zależności od wymaganej redukcji								
		przypadek obciążeniowy						
		1	2	3	4	5	6	7
procentowa redukcja parametru	2,50%	4,7	3,1	6,1	2,4	1,3	1,9	1,2
	5%	17,3	31,5	26,4	15,9	16,8	18,2	25,7
	7,50%	538	683	...	526	174	427	185
	10%	1875	1218	...	1355	1849	962	2185

Dla wartości 2,5% redukcji ugięcia wartości maksymalnych naprężeń wzrastały średnio 3,2 raza, co pozostaje skrajną dopuszczalną wartością, lecz nie generuje żadnych korzyści statycznych. Model uzyskuje chwilową sztywność, lecz kosztem znacznej pracy systemu modyfikatorów. Oznacza to, że dla żadnego parametru ugięcia nie jest zasadne stosowanie systemów modyfikatorów w opracowanej strukturze.

W każdym przypadku obciążeniowym, trudnością dla algorytmu było zapewnienie odpowiedniej sztywności w otoczeniu podpór. Przeważnie znaczne odkształcenia na podporze kompensowane są przez modyfikatory, które aktywowane, zachowują zerowy stopień teleskopowania. Zauważalna jest lokalna znacznie większa efektywność pracy modyfikatorów w miejscach o zmniejszonej sztywności topologicznej jak górne naroża struktury. Mniejsze obciążenia i wywoływane nimi naprężenia znacznie skuteczniej kompensowane są przez modyfikatory. Przedstawiona dychotomia zachowań modelu prowadzi do znacznej nierówności w rozkładzie naprężeń. Część elementów nośnych bierze nieodnotowywalnie niski udział w przenoszeniu naprężeń podczas gdy pojedyncze pręty pozostają znacznie przeciążone. Dla żadnego z badanych przypadków nie odnotowano wzrostu wartości wysuwu modyfikatorów o wartość większą, niż 35% zakresu teleskopowania. Oznacza to poprawne dobranie zakresu wysuwu. Jednocześnie średnia wartość wysuwu wynosiła 9-11%. Średnio 21% siłowników pozostawała nieaktywna. Ich lokalizacja przyjmuje formę rozkładu nie podlegającego pod proste tendencja czy pracę wzajemną elementów. Równomiernie siłowniki zerowe rozmieszczone były względem podpór, naroży struktury oraz prętów ukośnych, a także ortogonalnych. Wszystkie pręty wraz z modyfikatorami zebrane są w jednej puli elementów dla przedstawienia maksymalnych naprężeń. Naprężenia modyfikatorów stanowią dla zdecydowanej większości przypadków 10% najwyższych wartości naprężeń. Maksymalne wartości dla właściwych elementów nośnych pozostają na poziomie 4-5,5 raza mniejszym od prezentowanych wartości maksymalnych.

7.7 Koncepcje architektonicznego wykorzystania rozwiązań responsywności struktur ramowych

Wyniki badań modeli wskazują na duży potencjał zastosowania rozwiązań responsywnych ram w kształtowaniu przestrzeni architektonicznych. Poza wyraźnymi korzyściami podniesienia parametrów statycznych struktur, również ich funkcjonalny aspekt wymaga pogłębienia. Główne korzyści zauważa się w zdolnościach do zachowania stałej topologii i geometrii wszystkich modeli przedstawionych w badaniu. Przedstawiony w pracy moduł strukturalny pozostaje wystarczająco uniwersalny, aby umożliwiał wykorzystanie w szerokiej gamie funkcji architektonicznych. Cechą pozwalającą na uzyskanie multifunkcjonalności jest rozmiar modułu. Sprecyzowane jako skalowalność, ze względu na brak wymagań konkretnych wymiarów elementów, pozwala użycie modułu kwadratowego w zróżnicowany sposób. Mały moduł o wymiarach 2,4m może być upodabniany do typowych systemów wykorzystywanych w obiektach architektonicznych. Jego zdolność do skalowania przejawia się w możliwości doboru odpowiedniej średnicy siłowników oraz elementów sztywnych oraz odpowiednio wytrzymałych materiałów oraz elementów łączących. Nie jest to

proste skalowanie wymiarów wraz z sześcianem szerokości modułu, lecz zbadanie proporcji elementów pozwala na odpowiedni dobór wymiarów, bez konieczności zmiany sposobu działania pojedynczej ramy. Tak dla struktur jednopoziomowych, jak i wielopoziomowych możliwe jest opracowanie układu elementów nośnych tak, aby bez zmiany sposobu działania pojedynczych modułów uzyskać ich funkcjonalność.

Wielkość jest ściśle związana z proporcjami przekrojów elementów do wymiarów modułu. Oznacza to, że dla różnej wielkości struktur uzyskane zostanie zróżnicowane zapotrzebowanie na ilość materiału w ujęciu masy na m^3 struktury. W konsekwencji wymusza to zróżnicowane podejście do zarządzania nasłonecznieniem wnętrza struktury. Dostosowanie liczby otwarć i powierzchni materiałów przepuszczających światło jest ograniczona nakładem materiałowym na przekroje. Zakłada się pominięcie skrajnych wymagań wobec wytrzymałości struktury, co oznacza pewien konflikt między najefektywniejszą grupą geometrii obiektów responsywnych oraz ich funkcjonalnością. Przedstawiono, że responsywność ramowa jest bardzo efektywna dla obiektów wysokich. Te z kolei determinują użycie optymalizacji strukturalnych, które dla istniejących budynków realizowane są na przykład jako zróżnicowanie przekrojów elementów nośnych zgodnie z zasadą malejących wymiarów ku górze. Zasadę tę można wprowadzić w strukturach responsywnych, lecz wpływać będzie ona na stopień zacienienia stref wewnętrznych struktury. Inaczej niż w pełni otwartych strukturach monolitycznych, gdzie występuje pełne doświetlenie poprzez przesunięcie konstrukcji do centralnej części rdzenia obiektu, wystąpi rosnące ku niższym poziomom obiektu coraz mocniej zacieniane strefy. Uniemożliwi to uniwersalne wykorzystanie wszystkich przestrzeni Możliwość doboru różnej wielkości modyfikatorów mógłby pozwolić na częściową redukcję skutków zacienienia, lecz jak przedstawiono w badaniach wielkość siłowników ma wpływ na układ statyczny, co wymusza dokładniejsze analizy potencjału doświetlenia struktury w sposób umożliwiający zakładane wykorzystanie przestrzeni.

Parametrem ściśle strukturalnym, który ma wpływ na funkcjonalność jest zdolność modułów do równoważenia sił przykładanych w różnych strefach struktury. Ponownie zależnie od sposobu użycia obiektu należy spodziewać się odmiennego charakteru obciążeń. Mniejsza lub większa częstotliwość zmian jest ważna, lecz nie priorytetowa. Kluczowy pozostaje rozkład sił, który może być punktowy, powierzchniowy, choć najczęściej łączony i nierównomierny. Zbadanie wpływu skrajnie niesymetrycznych obciążeń, czy ich zróżnicowania na różnych wysokościach jest konieczne i musi być realizowane dla znacznie dokładniejszych przypadków niż dotychczasowe badania. Elementarne pomiary jednak wskazują na ogólnie bardzo duże spektrum reakcji na zróżnicowane siły zewnętrzne. To oznacza, że wraz z rozszerzaniem puli dostępnych funkcji i rozbudowywanej przy tym grupie typów obciążeń coraz bardziej złożonym problemem jest zapewnienie odpowiedniego poziomu odpowiedzi geometrycznych. Jednocześnie zauważa się, że nie znaleziono w badanych przypadkach obciążeń układu, który generowały trudności w podnoszeniu efektywności responsywnością. Dalsze badania są konieczne, lecz wstępnie zasadne jest założenie, że moduły mogą przyjąć pełne spektrum funkcjonalności dla nich przewidywanych przy doborze odpowiednich przekrojów elementów.

Cyrkularność stanowi kolejne zagadnienie wymagające ewaluacji w drodze badań. Struktury responsywne dotychczas badane były pod względem efektywności energetycznej, lecz wskaźnik ten ze względu na miękkie parametry, często arbitralnie określane nie jest miarowy. Zdolność do ponownego wykorzystania elementów struktury responsywnej po okresie jej użytkowania stanowić może odpowiedź na potrzebę skwantyfikowania efektywności. Czynnikami które mogą ograniczać cyrkularność są częstotliwości modalne, w jakich powinny pracować siłowniki, co poruszano w pracy, lecz również konieczność opracowania metod ewaluacji stanu struktur po demontażu, przed ponownym użyciem. Sposób pracy elementów ruchomych musi być wystarczająco uniwersalny, aby umożliwiać wykorzystanie elementu ruchomego w wielu różnych strukturach. Alternatywnym rozwiązaniem może być realizacja systemu kilku zróżnicowanych w działaniu elementów, spośród których możliwe jest wykonywanie struktur o maksymalnie nieograniczonych formach. Cyrkularność nie jest obecnie powszechna i wymaga szeregu zmian w sposobie planowania i

realizacji struktur, aby uzyskać satysfakcjonujący poziom skuteczności, lecz pozostaje najbardziej miarodajnym wskaźnikiem stopnia wykorzystania składowych struktur. W prezentowanych w rozdziale modelach można doszukiwać się cech systemu, który może być dostosowany na potrzeby cyrkularności. Zachowanie pełnej modularności i uniwersalizacji elementów jak przedstawiono to na strukturach ortogonalnych, jest jednym z najefektywniejszych obecnie sposobów opracowywania cyrkularności. Możliwość wykorzystania komponentów pionowych w postaci części poziomych oraz odwrotne działania podnoszą znacząco zdolność systemu do realizacji cyrkularności. Sposób łączenia elementów stanowi jedną z kluczowych kwestii. W celu umożliwienia ponownego montażu elementów konieczne jest wykorzystywanie połączeń nie wymagających trwałego ich niszczenia. Ramy najczęściej w konstrukcjach zachowują sztywność poprzez spawanie oraz analogiczne metody połączeń trwałych. Zakładając jednak podział analizowanych modeli na węzły oraz pręty i siłowniki możliwe jest opracowanie połączeń opartych o śruby, umożliwiających demontowalność podnoszącą zdolność do cyrkularności systemu. Stosowanie śrub zwykłych lub sprężających odporniejszych na wibracje modelu może pozwolić na uzyskanie pełnej demontowalności. Konieczne jest jednak jednoczesne opracowanie systemu zarządzania elementami, sposób oceny ich zdolności do ponownego montażu oraz zasady konserwacji, demontażu i montażu elementów. Cały proces musi podlegać parametryzacji, aby podnieść automatyczność wszystkich działań co pozwoli na uzyskanie możliwie dużych korzyści z implementacji cyrkularności.

We wszystkich próbach badawczych analizie podlegała zmienność geometryczna. Przemieszczenia węzłów oraz prętów liczone były w celu określenia zdolność modelu do zachowania referencyjnej geometrii i osiowości elementów. We wszystkich próbach zdolność ta została wykazana, co oznacza, że przy odpowiednio szybkim systemie reakcji możliwe jest uniknięcie chwilowych odkształceń i zachowanie wysokiej sztywności modelu. Pozwala to na bardzo intuicyjne kształtowanie sposobów użycie przestrzeni wewnętrznej. W przeciwieństwie do dotychczas poddawanych analizie modeli o zmiennej geometrii, ruch ramy responsywnej jest minimalny i nie wpływa na umiejscowienie elementów strukturalnych. Minimalizacja ugięć jest konieczna, lecz najczęściej stanowi zabezpieczenie użycia modelu, a nie jego stateczności. Gdy strukturę połączy się z materiałem pozwalającym na maskowanie minimalnych ruchów strukturalnych, sposób percepcji przestrzeni podczas użycia może nie odbiegać od powszechnych rozwiązań architektonicznych. Modele responsywne poprzez małe zmiany geometrii charakteryzują się prostym definiowaniem zakresu przestrzeni dla elementów nośnych oraz przestrzeni funkcjonalnej. Oznacza to, że dowolnie duże obciążenia w zakresie funkcjonalności nie wpływają na zdolność struktury do wykorzystania w architektonicznym kontekście. Jest to różnica względem struktur wcześniej omawianych, których zmienność geometrii wymusza stosowanie przestrzeni buforowych na potencjalny ruch struktury.

Możliwość łączenia struktury z materiałami zewnętrznymi oraz rozwiązaniami systemowymi zapewniona jest przez modularność. Podobnie do budynków struktura zachowuje pojedynczą geometrię modułu, który wypełniony może być dowolną formą wydzielenia przestrzeni. Brak wyróżnienia elementów struktury przynależnych pionowemu i poziomemu układowi jest założeniem koncepcyjnym i może ulec zmianom i indywidualizacji w procesie dalszych badań, lecz w dalszym ciągu moduły pracować będą w przedstawiony w badaniach sposób i zachowywać będą układ kwadratowy. To oznacza, że prowadzenie wszelkich instalacji, okablowania na cele poprawnego funkcjonowania struktury możliwe jest w przestrzeni wydzielenia struktury. Między prętami i siłownikami możliwe jest trasowanie wszystkich wymaganych elementów bez wpływu na zdolności dostosowywania długości siłowników.

Badania obciążeń poziomych i ich wpływ na deformację struktury wykazał, że analogiczne obciążenia wiatrem dla struktury o podobnej geometrii i topologii elementów, do wysokiej wartości oddziaływania nie wywoływałoby trudności funkcjonowania obiektu. Duża odporność na siły poziome przedstawiona w badaniu wykazuje zdolność modułów do implementacji w strukturach wysokich. Dominujące oddziaływanie wiatru ma pozytywny wpływ na efektywność pracy struktury. Zwiększa intensywność pracy elementów ruchomych, lecz jednocześnie redukuje wymaganą masę struktury prowadząc do oszczędności materiałowej.

7.8 Podsumowanie

W szeregu badań określono zdolność użycia systemu modyfikatorów w strukturach ramowych i prętowych. Stanowi to rozwiązanie o charakterze innowacyjnym, charakteryzujące się bardzo dużą potrzebą dalszego pogłębienia zagadnień. Bardzo zróżnicowane wyniki badań nakreślają typy struktur w których zasadnym może być stosowanie systemów. Bardzo duża skuteczność modyfikacji modeli o powtarzalnej modułowej geometrii i prostych formach argumentuje rozwój badań w kierunku zdolności do skalowania rozwiązań przy większej liczbie modyfikatorów dla bardziej rozbudowanych obiektów. Szczególnie korzystne, na podstawie wyników jest lokalizowanie modyfikatorów w dolnych sekcjach struktury. Elementy te przenoszą większe naprężenia niż siłowniki wyższych partii modelu, dlatego też zasadne jest różnicowanie przekrojów i nośności elementów ruchomych na podstawie indywidualnych obliczeń strukturalnych.

W trakcie badań systemy pozostawały najskuteczniejsze dla redukcji ugięć, tak lokalnych pojedynczych elementów obciążonych ramowo, jak i węzłowo obciążanych struktur prętowych. Przemieszczenie pozostaje najważniejszym parametrem w badaniu efektywności wykorzystania systemów modyfikatorów. Opracowany w wyniku badań i określonych tendencji zachowań model aktywacji i sterowania kolejnymi siłownikami przynosi znaczny wzrost oszczędności zasobów przy realizacji i obsłudze struktury.

Orientacja modyfikatorów jest ściśle powiązana z rodzajem obciążeń na jakie efektywnie reaguje system. Szczególnie dla modeli o znacznej wysokości korzystne jest orientowanie siłowników w układzie horyzontalnym co pozwala na znacznie lepsze zachowanie osiowości poszczególnych elementów oraz geometrii struktury jako całości. Jedynie w dolnych partiach obiektu konieczne jest lokalizowanie pełnych zestawów siłowników, pozwalających na uzyskanie większej puli ruchów i reakcji systemu na obciążenia zewnętrzne.

Badania proporcji rozmiarów elementów ruchomych do statycznych przyniosło jednoznaczne wyniki dla struktury o schematycznym układzie modułowym. Elementy ruchome o długości zbliżonej do rozmiarów elementów statycznych, pozwalają na największą redukcję parametrów statycznych. Najlepsze wyniki uzyskano dla modułów o rozpiętości ½ boku modułu kwadratowego co całkowicie zmieniało układ statyczny struktury, tworząc dodatkowe węzły. W celu dokładniejszego badania efektywności należy uwzględnić również nakłady na realizację i obsługę struktur o większych elementach ruchomych, gdzie sterowanie i zarządzanie ruchem stanowić będzie wymierną część kosztów całkowitych struktury w rozumieniu zapotrzebowania energetycznego i materiałowego. Analiza uwzględniająca okres trwałości struktury może wyznaczyć efektywne wymiary elementów ruchomych.

Struktury ramowe jako kolejny spośród rodzajów struktur poddany ewaluacji efektywności użycia responsywności, wykazały zasadność stosowania takich rozwiązań, lecz wyłącznie dla struktur modularnych o prostej budowie. Szczególnie modele o dominującym wymiarze wysokości pozwalają na znaczne redukcje nakładów materiałowych. Jednocześnie przedstawiono zalety stosowania modeli hybrydowych zachowań w miejsce algorytmów ewolucyjnych. Najefektywniejszym model był system złożony z iteracyjno-heurystycznego algorytmu, co potwierdza słuszność pierwszej tezy pracy, dowodząc, że algorytm ewolucyjny może stanowić główny moduł zachowań, lecz nie może funkcji tej pełnić w sposób samodzielny. Brak przewidywalności wyników, nierówny czas generowania odpowiedzi

geometrycznych i zróżnicowane sposoby reagowania na układy obciążeń uniemożliwiają samodzielną pracę algorytmu. Przyspieszenie pracy elementów responsywnych oraz podniesienie skuteczności generowania wynikowych geometrii predestynuje modele hybrydowe potwierdzając poprawność pierwszej tezy pracy.

Algorytm ewolucyjny jednak stanowi, jak w przypadku innych typów struktur, odpowiedni model sterowania geometrią na cele poszukiwania tendencji zachowań. Model hybrydowy powstały w wyniku analizy obserwacji geometrii uzyskanych algorytmem ewolucyjnym swoją skutecznością argumentuje zdolność do rozpoznawania zależności architektonicznych w modelach badawczych. Dla każdego kształtu struktur zakłada się podobną zdolność do generowania wyników przez przedstawiony w rozdziale sposób sterowania strukturą. Waliduje to drugą tezę postawioną w pracy odnoszącą się do zdolności uzyskiwania przez algorytm ewolucyjny wyników pozwalających na odnajdywanie powiązań między zachowaniami struktur responsywnych w dowolnie złożonych strukturach. Poprawność twierdzenia dowiedziono dla struktur ramowych. Ważne jednak jest, aby każdorazowo określać stopień złożoności badanej struktury, liczby jej modułów oraz regularności ich układów, ponieważ wraz ze wzrostem liczby nieregularności formy i części statycznych oraz ruchomych rośnie pula minimalnej liczby przypadków obciążeniowych jakie należy przebadać, aby uzyskać wymierną grupę badawczą. Grupa ta jednak złożona z odpowiedniej liczby pomiarów zawsze zawiera dane na temat najefektywniejszych sposobów sterowania modelem.

W dalszej kolejności należy zbadać bardziej złożone schematy zachowań dla struktur o powtarzalnej geometrii dla których opłacalne jest wprowadzanie systemów modyfikatorów. Nie badano dotychczas zachowań pod obciążeniem punktowym charakterystycznym dla obciążeń zmiennych wywoływanych przez użytkowanie. Opracowanie podstawowych schematów reakcji lub modelu zachowań pozwalającego na kompensowanie ich skutków w czasie eksploatacji struktury stanowi kolejne zagadnienie wymagające pogłębionej analizy. Kompensacja lokalnych naprężeń uzyskała dotychczas mało uwagi badawczej, lecz dla modeli dyskretnych stanowić może dziedzinę naukową dążącą nie tylko do redukcji nakładów na użytkowanie co wzrostu bezpieczeństwa przy wyjątkowych sytuacjach skutkujących lokalnym przeciążeniem pojedynczych elementów. Rozwinięciem badań w kolejnych etapach może być zdolność zapobiegania kaskadowemu niszczeniu struktur w przypadku przeciążenia jednego elementu skutkującego dalszym postępem zniszczenia w konsekwencji prowadzących do zawaleń i rozległych zniszczeń.

8. Podnoszenie skuteczności reakcji modeli zachowań przy użyciu preakcji

8.1 Teoria modeli zachowań w kontekście wymogu użycia preakcji

Żadna struktura responsywna nie jest zdolna do realizacji ruchu przy wykorzystaniu wyłącznie jednego głównego modelu zachowań opartego na zasadzie działania algorytmu ewolucyjnego jak zostało to podane w tezie nr 1 pracy. Wszystkie dotychczas badane modele charakteryzują się trudnościami związanymi z gwarancją redukcji naprężeń lub ugięć. Każdy model realizuje zmiany geometrii w zróżnicowany sposób przez co niemożliwe jest określenie czasu obliczania reakcji. Czas ten ponadto, uzależniony jest od wartości wejściowych zmiennych odpowiadających za ruch, przypadku obciążeniowego, stopnia złożoności struktury i systemu ruchu oraz sposobu realizacji ruchu. Ostatni parametr pozostaje bardzo złożonym zagadnieniem badawczym, ponieważ jak stwierdzono w szeregu dotychczasowych badań istnieją struktury i sposoby ruchu wymagające kompleksowych reakcji lub jednoczesności działania wielu elementów w bardzo ścisły sposób. Znacząco wydłuża to czas obliczeniowy. Wszystkie te czynniki składają się na konieczność implementacji rozwiązań ruchu opartych na innych zasadach, niż stosowane dotychczas.

W badaniach literaturowych zauważalny jest nurt modelowania zachowań obiektów w oparciu o ścisłe formułowania matematyczne. Wykluczana jest z nich losowość [93], [170] lub pozostaje ona marginalnym elementem nie wpływającym w znaczącym stopniu na efektywność modelu [83], [173]. Znaczna część modeli zachowań poddawana jest analizie czasu potrzebnego na obliczenie ostatecznej geometrii [54], [69]. Zauważa się, że od początku lat XXI wieku kolejne koncepcje modeli zachowań, najpierw cięgien w strukturach tensegrity [90], [104], następnie wspomagane siłownikami struktury prętowe [64], [68], [71], aż do obecnych czasów i modeli ciągłych wspomaganych stężanymi zbrojeniami [79], [80], [84], [113] podlega badaniu pod względem maksymalnego czasu reakcji jaki dana struktura potrzebuje na dostosowanie geometrii do aktualnego przypadku obciążeniowego. Obecnie zauważa się bardzo dużą potrzebę pogłębienia nauki w kierunku reakcji na obciążenia zmienne [70]. Dotychczasowe realizacje i koncepcje struktur desygnowane były do ruchu pod wpływem obciążeń stałych oraz quasi-stałych [67]. Jednocześnie szeroko podnoszoną kwestią staje się zapewnienie bezpieczeństwa struktur w sytuacji wystąpienia wyjątkowych obciążeń lub nieprzewidywanych skoków naprężeń, bądź ugięć [92], [111], [142]. Bezpieczeństwo to jest realizowane przede wszystkim w sposób fizyczny poprzez nadmiarowość elementów stałych i ruchomych, fizyczne blokady siłowników aktywowane w sytuacjach utraty zasilania [75] lub poprzez zabezpieczające stężenia.

Próby optymalizacji modeli zachowań orientowane są na redukcję czasu obliczeń [69], [70], jak również zwiększenie pewności uzyskania efektywnego wyniku [74], [152] bądź zmniejszenie zużycia energii użytkowej poprzez optymalizację toru ruchu elementów strukturalnych [87]. Modele te oparte są w znacznej części o matryce wpływów elementów na statykę struktury [68]. Znaczna część modeli zachowań opiera się również o działanie iteracyjne pozwalające podczas pracy na uzyskiwanie pośrednich efektywnych geometrii. Modele te często rozwijane są jako kompleksowe systemy dzielone na części odpowiedzialne za inne etapy życia struktury. Najbardziej kompleksowe w pierwszej kolejności wyznaczają układ siłowników jaki jest najkorzystniejszy energetycznie dla danej indywidualnej struktury, a następnie bazując na zgromadzonych podczas optymalizacji danych dobiera metody ruchu, matryce sztywności i wpływów oraz sposoby reakcji systemu na obciążenia w danym zakresie kierunków i wartości sił [87].

W dotychczasowych badaniach znaczną trudnością modelu pozostawał czas oczekiwania na wynik obliczeń reakcji. Działanie oparte na algorytmie ewolucyjnym, jak zostało to określone w rozdziale nr 1 nie może pełnić samodzielnej funkcji sterowania strukturą. Każdy model obsługiwany musi być z wykorzystaniem kilku modeli i systemów ruchu. Jednocześnie w celu rozwoju struktury w czasie jej użytkowania konieczne jest zapewnienie systemu wyposażonego w uczenie maszynowe, bądź inną formę uzyskiwania informacji na potrzeby dalszego ruchu, na podstawie wcześniejszych doświadczeń systemu. Minimalnym jednak początkowym zestawem modeli jest moduł podstawowy, którego przykłady licznie modelowane i analizowane w pracy mogą opierać się o algorytm ewolucyjny lub ściśle liniowy sposób działania oraz moduł preakcji. Preakcje pierwszą odpowiedź na zmianę warunków obciążeniowych. Zgodnie z założeniami ich praca realizowana jest natychmiast po wystąpieniu nowego przypadku obciążeniowego i wykorzystywane są do momentu obliczenia bardziej efektywnej reakcji przez właściwy moduł zachowań. Oznacza to, że charakteryzują się one podniesieniem efektywności względem statycznych struktur, lecz wykazują mniejszą redukcję naprężeń i ugięć niż właściwe moduły zachowań. Moment zmiany przypadku obciążeniowego jest kluczowy jak wykazano we wcześniejszych badaniach, ponieważ może prowadzić do kilkukrotnego wzrostu naprężeń w przypadku wystąpienia niekorzystnego obciążenia. Oznacza to, że zmiana musi nastąpić możliwie szybko. Najbardziej podstawową reakcją jest powrót do geometrii wyjściowej struktury, lecz jest to tylko jedna z bezpiecznych geometrii, która w mniejszym zakresie sił o ponadstandardowej wartości obciążenia może doprowadzić do zniszczenia lokalnego lub globalnego struktury.

8.2 Opis rozwiązań modeli i sposobów ich działania

8.2.1 Zastosowanie i teoria kształtowania modeli preakcji

W celu realizacji odpowiednio szybkich i pewnych reakcji należy opracować model zachowań oparty o inny niż dotychczasowe system. Nie może on wykorzystywać na żadnym etapie działania algorytmu ewolucyjnego, ani rozwiązań losowych lub pseudolosowych. Należy, wykorzystując możliwie proste zależności geometryczne, uzyskać zmiany geometrii dające redukcje naprężeń lub ugięć przed wystąpieniem zmiany przypadku obciążeniowego. Sam model szybkich zmian nazwany w pracy preakcjami może przyjmować zróżnicowane formy, które należy przebadać pod względem skuteczności. Preakcje powinny dla każdego przypadku obciążeniowego, dowolnie złożonego pozwalać na uzyskanie geometrii w takim samym lub bardzo podobnym czasie podczas pojedynczego działania algorytmu. Działanie to musi być jednoznaczne i wykonalne co oznacza zdolność modelu do geometrycznej zmiany. Warunek jest istotny, ponieważ przed przystąpieniem do użycia algorytmu należy zbadać wszystkie ruchy w puli preakcji. To dalej implikuje, że powinna istnieć skończona liczba preakcji, dla których należy określić zdolność redukcji skrajnych wartości parametrów statycznych w danym przypadku obciążeniowym. Struktury podczas użytkowania poddawane są obciążeniom tak punktowym jak i powierzchniowym co wskazuje na konieczność dostosowania reakcji do obu rodzajów obciążeń. Skala reakcji może być dla wszystkich obciążeń jednakowa lub zmienna, proporcjonalna do obciążenia. Proporcja ta jednak musi posiadać ograniczenia do określonego zakresu zmiany geometrii. W przypadku skalowanych reakcji osobnym badaniom poddane muszą być wartości proporcji zmiany do przyłożonej siły. Przebadać należy zależność pod kątem jej liniowości oraz zakresu reakcji jeśli dotyczy ona obciążeń punktowych mogących wpływać w stopniu znaczącym, tak na część struktury, jak i jej całość. Preakcje odmiennie od głównego modułu zachowań podczas eksploatacji obiektu nie ulegają modyfikacjom, ani rozszerzeniu puli zmian geometrii. Pierwotnie zaprogramowany układ ruchu zmienny jest jedynie ze względu na degradację struktury. Zjawisko to jest ściśle powiązane z trwałością struktury oraz co kluczowe – jej elementów. Przytaczany w pierwszym rozdziale problem niedokładności realizacji ruchu związany jest z pierwotnymi imperfekcjami wykonawczymi modelu. Niedokładności te w czasie ulegają nawarstwieniu o deformacje, przeciążenia, czy zmianę struktury materiału i powierzchni kontaktu elementów. Preakcje zmieniać się mogą jedynie w zakresie wymuszonym, przez poprawę dokładności realizacji

geometrii, przy degradacji struktury i jej elementów przenoszących siły. Z czasem możliwe jest zastąpienie preakcji gotowymi zachowaniami struktury w pełni przebadanej.

Modele architektury responsywnej mogą być wyposażone wyłącznie w systemy preakcji nie posiadając modułu głównego. Nieskończenie sztywny most realizacji Gennaro Senatore [71] stanowi przykład modelu fizycznej struktury opartej o szybki system reagowania porównywalny w liniowości i zakresie ruchów do modelu preakcji. Jest on strukturą skwantyfikowaną o stosunkowo małej liczbie elementów i węzłów, gdzie opłacalnym działaniem było opracowanie indywidualnych geometrii dla każdego węzła, dla każdego przypadku obciążeniowego. Jedynie zależnie od skali sił dostosowaniu ulega skala reakcji. Ostateczny cel jednak w modelu jest znacznie zredukowany względem planowanych badań modeli preakcji. Skupiał się on wyłącznie na kompensacji ugięć bez analizy naprężeń. Zabezpieczenie przed przeciążeniem struktury realizowane było nadmiarowością materiału w przekroju modelu, a realizacja ruchu nadal potrafiła być iteracyjna ze względu na przytoczoną wcześniej kompensację imperfekcji i stopnia eksploatacji struktury.

8.2.2 Opis 4 modeli zachowań preakcji na cele badania skuteczności ich użycia

W celu przebadania zdolności preakcji do zwiększenia bezpieczeństwa użytkowania struktury oraz zapewnienia redukcji parametrów statycznych opracowane zostaną 4 modele zachowań dla pojedynczej formy struktury. Zostanie zdefiniowany ich uniwersalny sposób działania oraz ograniczenia funkcjonalności. Następnie modele poddane zostaną badaniom pod kątem efektywności i skali reakcji. Ze względu na możliwość porównania skuteczności wszystkich modeli między sobą oraz ze strukturą statyczną możliwe będzie opracowanie hybrydowego modelu preakcji bazującego na wszystkich 4 modelach dobieranych każdorazowo jednoznacznie zależnie od sytuacji obciążeniowej w danym przypadku statycznym.

Każdy system preakcji musi być realizowany indywidualnie w oparciu o formę struktury dla której jest desygnowany. Oznacza to konieczność zbadania tendencji struktur do zachowań pod wpływem obciążeń oraz zależności obciążeń kierunkowych o danych wartościach, od efektywnych w ich przypadku geometrii. Model hybrydowy musi w takiej sytuacji jasno definiować rozgraniczenie pomiędzy poszczególnymi modelami. Nie zwiększa to jednak poziomu złożoności ewaluacji, której wykonanie jest konieczne dla realizacji modelu preakcji. Ewaluację stanowi sprawdzenie minimalnych wartości wzrostu efektywności struktury w przypadku użycia danego modelu preakcji. Wartość minimalnego wzrostu spośród wszystkich badanych przypadków obciążenia stanowi o oszczędności jaką responsywność gwarantuje co w konsekwencji przekłada się na zmniejszenie nakładów materiałowych dla struktury lub energetycznych na obsługę i sterowanie ruchem.

W celu badania preakcji zamodelowano podstawową strukturę na której prowadzone będą wszystkie pomiary. Stanowi ona sprawdzoną bazę geometryczną, przebadaną w szeregu wcześniejszych analiz. Strukturą jest kratownica przestrzenna rozpięta na wycinku sfery przez sześcian. Model kratownicy oparty na tym kształcie powłoki zrealizowany funkcją ***„SpaceTruss 1”*** powstał przy określeniu parametru głębokości kratownicy równym 1m. Wartość ta jest zachowana dla dowolnego punktu węzłowego struktury. Model rozciąga się na długość 6 ogniw w każdym kierunku. Oparty jest na 4 narożnych podporach zlokalizowanych pod dolnym pasmem struktury. Są one nieprzesuwne, obrotowe w każdym kierunku. Model ma rozpiętość określoną na 20m między sąsiednimi podporami, a pręty mają przekrój pierścieniowy o wymiarach 20cm oraz 17cm kolejno średnicy zewnętrznej oraz wewnętrznej. Obciążenia przykładane mogą być w każdym węźle górnego pasma i stanowią w każdym osobny atraktor preakcji. Oznacza to, że każde obciążenie każdego węzła z osobna wywołuje odpowiednio przeskalowaną reakcję natychmiastową zgodną z danym modułem preakcji. Dzięki takiemu opracowaniu modelu bazowego możliwe jest zgodne z założeniem badanie

obciążeń punktowych oraz powierzchniowych, a także jednocześnie występujących obciążeń obu rodzajów.

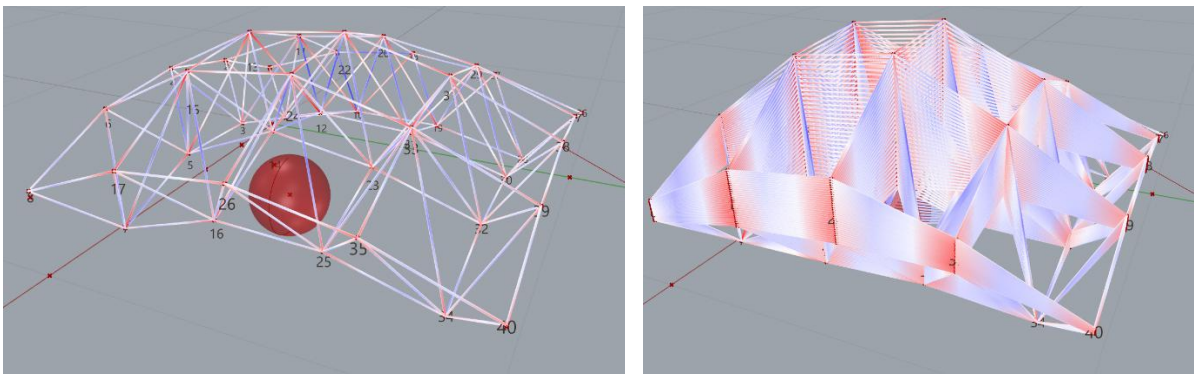
8.2.2.1 Model operowania grubością kratownicy przestrzennej

Pierwszy moduł zachowań oparty jest o proste zjawisko pogłębiania kratownicy. Oznacza to, że przyłożenie siły w danym punkcie węzłowym wywołuje przesunięcie węzłów dolnego pasma w dół. Każdy węzeł jednak reaguje w sposób indywidualny, zależny od odległości od osi obciążenia. Oznacza to, że wpływ na reakcję mają trzy parametry. Kolejno jest to punkt przyłożenia siły, wartość siły definiująca skalę pogłębienia modelu oraz kierunek przyłożenia siły. Oznacza to dalej, że przyłożenie siły pod małym katem względem pasma górnego kratownicy wywoła reakcję pogłębienia w znacznej odległości od punktu jej przyłożenia. Spośród tych czynników sparametryzowana jest wartość skali, która podlega badaniu. Model ten zbudowano poprzez pobieranie informacji o kierunku przyłożenia siły z wektora poprzez funkcję ***„direction”***. Na kierunku wektora zamodelowano linię będącą osią, a następnie metodą ***„length 3D”*** określano odległość wszystkich punktów węzłowych od osi działania siły. Atraktorem jest punkt przyłożenia siły, lecz parametrem pozostaje odległość. Liczona jest w metrach, a następnie mnożona przez bezwymiarowy współczynnik skali początkowo określony jako 0,1. Najwyższa wartość teleskopowania określona arbitralnie dla modelu to 0,5m, co wymusza dobór siłowników o odpowiednim zakresie wysuwu. Po przemnożeniu odległości przez współczynnik skali, uzyskaną wartość odejmuje się od skrajnego wysuwu 0,5m. Następnie wynikową wartość mnoży się przez spierwiastkowaną wartość długości wektora siły przyłożonej w danym punkcie. Uzyskana wartość długości definiuje wartość pogłębienia kratownicy co oznacza, że każdy metr odległości od osi przesuwa węzeł dolnego pasma o 10cm w kierunku zgodnym z wektorem normalnym do powłoki w miejscu wystąpienia punktu węzłowego. Dla każdego węzła wartość ta jest indywidualnie wyliczana, co również indywidualizuje reakcję każdego fragmentu struktury. W celu wzmocnienia reakcji dla części przypadków stworzono dodatkową funkcję podniesienia węzłów górnego pasma analogicznie na podstawie odległości od osi. Jeśli wstępuje więcej, niż jedna siła zewnętrzna przyłożona jednocześnie do modelu, następuje superpozycja wszystkich reakcji. Model jednocześnie liczy odległości węzłów od osi obu sił, a następnie sumuje wynikowe długości. Nadal jednak algorytm jest ograniczony przez maksymalny wysuw 50cm oraz maksymalne skrócenie do 0cm wysuwu. Oznacza to, że model może ulec jedynie pogłębieniu. Spoczywa on w stanie minimalnej energii podczas całego okresu użytkowania poza sytuacjami obciążenia zewnętrznego, jednocześnie zapewniając znaczną przestrzeń użytkową poniżej struktury, przez możliwie długi okres użytkowania.

Zwiększanie wyłącznie jednego wymiaru struktury oznacza konieczność użycia elementów teleskopowanych o różnym wysuwie. Dla pionowych i ukośnych elementów wartość wysuwu pozostaje największa, z kolei dla elementów pasm najmniejsza. Wszystkie reakcje wygenerowane w opisany sposób charakteryzują się regularną zmianą geometrii. Nigdzie na powierzchni struktury nie występują uskoki lub nieciągłości. Reakcji nie podlegają węzły, natomiast strefy wokół podpór mają zredukowaną możliwość reakcji, mogąc kolejno przemieszczać węzły o 20 i 40cm w zależności od odległości od podpory. Od trzeciego najbliższego podporze węzła określa się możliwość operowania na pełnej skali wartości wysuwu. Zdecydowano się na ruchy węzłów dolnego pasma mimo odnotowywalnie lepszych wyników, podczas wcześniejszych badań dla pasma górnego analogicznych kratownic, ze względu na trudności w realizacji ruchu podczas obciążenia struktury w kierunku przeciwnym do występującej siły. W założeniu zachowania, model zmienia geometrię w najbardziej znaczący sposób w otoczeniu wystąpienia siły zewnętrznej. Oznacza to konieczność przemieszczania węzłów i prętów o największym stopniu wytężenia w kierunku przeciwnym do siły zewnętrznej. Znacznie zmniejsza to bezpieczeństwo użycia struktury ze względu na możliwość wystąpienia przeciążeń i utraty osiowości podczas ruchu oraz znacznie wzrasta energia kinetyczna potrzebna do przeprowadzenia procesu zmiany geometrii. Poruszana w szeregu opracowań kwestia minimalizacji energii całkowitej, w którą wliczana jest również energia kinetyczna, stanowi jeden z głównych argumentów za ograniczeniem użycia znacznej

liczby modeli zachowań[70], [87]. Wyniki badań określają ruch w kierunku przeciwnym do przyłożonej siły jako stanowiący nieefektywną reakcję, znacznie podnoszącą nakład materiałowy i energetyczny.

Jak przedstawiono wcześniej, istnieje możliwość doboru skali reakcji co bezpośrednio wiąże się z liczbą węzłów objętych modyfikacją w danym przypadku obciążeniowym oraz wartością pogłębienia każdego z nich. Aby móc efektywniej badać podane parametry opracowano metodę przekrojowej analizy wyników przypadków statycznych. Dla każdego obciążenia algorytm generuje 30 reakcji przestrzennych opartych na opisanej metodzie. Każda jednak jest indywidualna pod względem skali reakcji i zakresu. Jednocześnie badanych jest 30 geometrii, a wyniki przedstawiane są w formie wykresu zmiennego w czasie rzeczywistym. Na bieżąco wszystkie wyniki zestawiane są w formie podsumowania, a najefektywniejsza forma reakcji zapisywana jest tworząc pulę gotowych reakcji. Algorytm rozpoznaje jednocześnie tendencje wykresu i zmiany wartości poszukiwanych parametrów statycznych. W sytuacji wykrycia braku ekstremum lokalnego o minimalnej wartości parametru wymusza zwiększenie liczby badanych jednocześnie form do maksymalnie 100. Funkcja ta opracowana została w oparciu o tezę istnienia optymalnej reakcji dla każdego przypadku obciążeniowego i możliwości zlokalizowania zakresu w jakim się znajduje w przypadku badania szeregu kolejnych geometrii modelowanych w oparciu o zasady rosnącej deformacji modelu referencyjnego będącego kratownicą, w której żaden z węzłów nie uległ translacji.



Grafika 56.Schemat działania modelu zwiększania grubości kratownicy. Na grafice prawej widocznych jest wszystkie 50 geometrii badanych jednocześnie. Model stanowi załącznik nr 8.b pracy.

Na Grafika 56 przedstawiono kratownicę oraz lokalizację przyłożenia siły zewnętrznej. Po lewej stronie widać pojedynczą reakcję algorytmu, natomiast po prawej jednoczesne wygenerowanie 30 geometrii. Każda jest osobno analizowana w sposób nieliniowy modułem analizy Newtona-Rhapsona. Model analizy dobrano ze względu na dużą zgodność wyników dla znacznych deformacji modelu.

8.2.2.2 Model agregacji węzłów

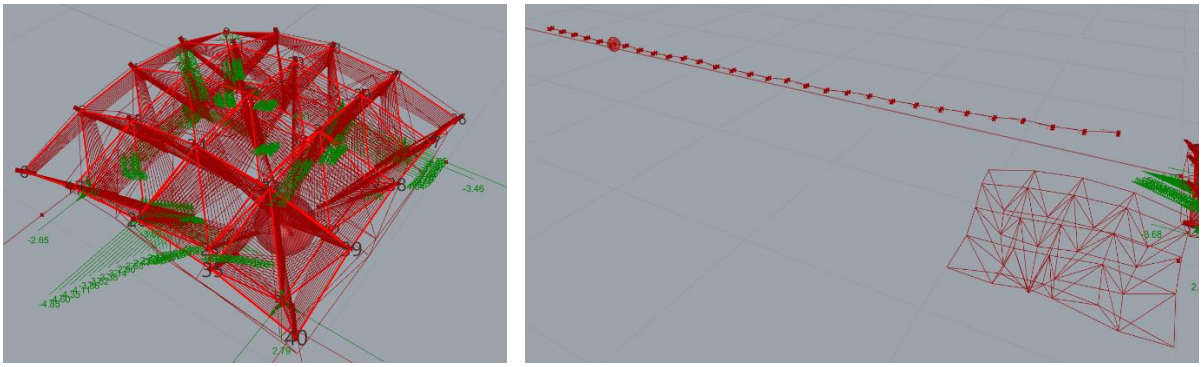
Ze względu na możliwość wystąpienia obciążeń punktowych modele zachowań powinny być kształtowanie w sposób umożliwiający lokalną deformację geometrii przy minimalizacji zmian całego modelu. Zauważa się jednocześnie, że optymalizacja struktur statycznych często dąży do wzrostu liczby elementów strukturalnych, które w wyniku multiplikacji zmniejszają swoje wymiary cząstkowe [172], [174]. Oznacza to jednocześnie wzrost liczby elementów co zwiększa stopień złożoności struktury ze względu na liczbę węzłów oraz połączeń. Stan ten sprzyja redukcji trwałości obiektu i zwiększa ryzyko wystąpienia niedokładności wykonawczych oraz wzrostu kosztów wykonania i zarządzania strukturą [175]. Stateczność takich struktur dodatkowo ulega redukcji, a możliwość wystąpienia nagłego zjawiska zniszczenia elementu strukturalnego wzrasta, prowadząc do kaskadowego zniszczenia obiektu [176]. Sam proces multiplikacji elementów nośnych jest trudny w implementacji. W rozdziale 9.5 przedstawiono propozycję samoekspandującej struktury pozwalającej pod pewnymi statycznymi i geometrycznymi warunkami na taki proces, lecz stopień złożoności kratownicy przestrzennej pozostaje zbyt wysoki, aby możliwe było

wykorzystanie technologii samoczynnego wzrostu struktury. Należy więc ograniczyć zmiany modelu do przemieszczeń pierwotnie wyznaczonych w nim prętów oraz węzłów. Proces ten ponownie bazuje na translacji elementów w sposób skoordynowany, lecz zindywidualizowany dla wszystkich elementów strukturalnych. Określono ponownie maksymalny wysuw siłowników jako równy 0,5m, a maksymalne przemieszczenie jako 0,35m.

Rozwiązaniem pozwalającym na zmniejszenie wpływu opisanych wad systemów jest agregacja węzłów w obu płaszczyznach struktury. Rozwiązania oparte o podobny sposób pracy modelu badane były wcześniej w pracy [177], gdzie statyczne struktury podlegały deformacji, w celu uzyskania wzrostu nośności lub redukcji ugięć. Głównym rozwiązaniem strukturalnym była agregacja punktów bazując na zasadzie rozkładu ładunków wokół jądra atomowego. Układ elektronów na kolejnych orbitach definiował układ węzłów, które dla fizycznej struktury przemieszczane były uzyskując redukcję długości elementów oraz większą krzywiznę w miejscu wystąpienia siły. Krzywizna ta odpowiadała za wzrost sztywności, natomiast sama redukcja długości elementów nośnych za ujednolicenie rozkładu naprężeń w strukturze. Końcowa efektywność modelu optymalizacji siatek prętowych przedstawiona i opisana metodą, przynosiła wymierne redukcje nakładów materiałowych i wzrost wyników statycznych, co argumentuje przeprowadzenie badań analogicznego systemu jako preakcji w strukturze ruchomej o teleskopowanych wszystkich elementach przestrzennych. Ponownie każda siła zewnętrzna przyłożona węzłowo do modelu stanowi atraktor reakcji, co oznacza, że wszystkie podlegające reakcji węzły przemieszczane są w kierunku wystąpienia siły. W wyniku działania preakcji skróceniu ulegają elementy struktury w otoczeniu przyłożonej siły co ma redukować przede wszystkim wartości naprężeń. Jednocześnie wydłużeniu ulegają pręty w większej odległości od punktu wystąpienia siły, kompensując nieregularność. Naraz modyfikacji podlegają oba pasma struktury, lecz dolne reaguje w mniejszej skali ze względu na bazową większą odległość od punktu przyłożenia siły. Model wykonano w programie Grasshopper analogicznie do modelu pogłębiania kratownicy. Każda siła ma punkt przyłożenia do modelu. Dla każdego węzła liczona jest jego odległość od punktu przyłożenia. Odległość ta definiuje skalę reakcji. Funkcja translacji węzłów stanowi parametr zmienny. Może być zdefiniowana liniowo, lub w formie funkcji wyższego stopnia. Na cele pierwszego badania zdefiniowano ją jako pierwiastek odległości, lecz maksymalny zasięg atraktora deformującego strukturę może wynosić 6m, co również zostało określone w sposób arbitralny. Przemieszczenie odbywa się w kierunku przyłożenia siły, więc w celu wyznaczenia wektora zmian należy dla każdego węzła używając funkcji ***„line DK”,*** wyznaczyć linię biegnącą przez niego oraz punkt przyłożenia siły. Następnie trzeba wyznaczyć kierunek i zwrot wektora między oboma punktami. Na tożsamym wektorze następnie wyznaczyć długość odcinka translacji poprzez przemnożenie spierwiastkowanej odległości przez wartość skali reakcji. W ostatnim etapie odbywa się kontrola, czy wartość nie przekracza założonego zakresu. Jeśli znajduje się ona poza dopuszczalnym spektrum redukowana jest tak, aby spełniać jego warunek. Reakcja odbywa się natychmiastowo i może być realizowana dla wielu sił jednocześnie poprzez superpozycjonowanie. Odmiennie jednak od wcześniejszego modelu każde kolejne przyłożenie siły wywołuje obliczanie translacji względem już zdeformowanej wcześniejszą siłą geometrii. Każda kolejna siła ma więc mniejszy impakt na strukturę, co wynika z obranej funkcji pierwiastkowej oraz arbitralnie określonych granic deformacji.

Analogicznie jak dla modelu pogłębianej kratownicy jednocześnie badaniu podlega 30 kolejnych wersji zachowań, zróżnicowanych pod względem stopnia przemieszczenia elementów. Funkcją rysowania wykresów przedstawiane są kolejne uzyskane geometrie, a system samodzielnie poprzez sortowanie i dobór pierwszego elementu wybiera układ o największym wzroście efektywności, definiowanym jako największa redukcja poszukiwanego parametru. Jednocześnie w sytuacji wystąpienia konieczności redukcji zakresu, algorytm nie rozszerza puli przypadków, nawet jeśli wykryje brak ekstremum lokalnego w danym zakresie wartości funkcji. W przypadku gdy jednak zakres nie ulegnie redukcji ze względu na spełnienie wymagania przez wszystkie geometrie, możliwe jest podobnie jak dla pierwszego modelu, rozszerzanie puli rozwiązań do 100 układów. Podczas każdego badania poza wartością skali i funkcją definiującą długość translacji zapisywana jest geometria najefektywniejszego modelu.

Odpowiada jej oznaczenie wartości funkcji na wykresie co przedstawiono na Grafika 57. Zauważalne jest, że w przypadku wystąpienia dowolnej siły zewnętrznej zmniejszeniu ulega głębokość kratownicy w miejscu wystąpienia siły. Jest to zjawisko wymagające osobnego przebadania pod kątem wpływu na układ naprężeń. Należy porównać go z alternatywną wersją modelu dla którego w miejsce spłycenia modelu następuje jego pogłębienie, co łączy dwa pierwsze z opisanych modeli preakcji.



Grafika 57.Schemat geometrii dla modelu nr 2 uzyskiwanych jednocześnie wraz z wykresem zależności ugięć od stopnia deformacji geometrii modelem zachowań. Model stanowi załącznik nr 8.D pracy.

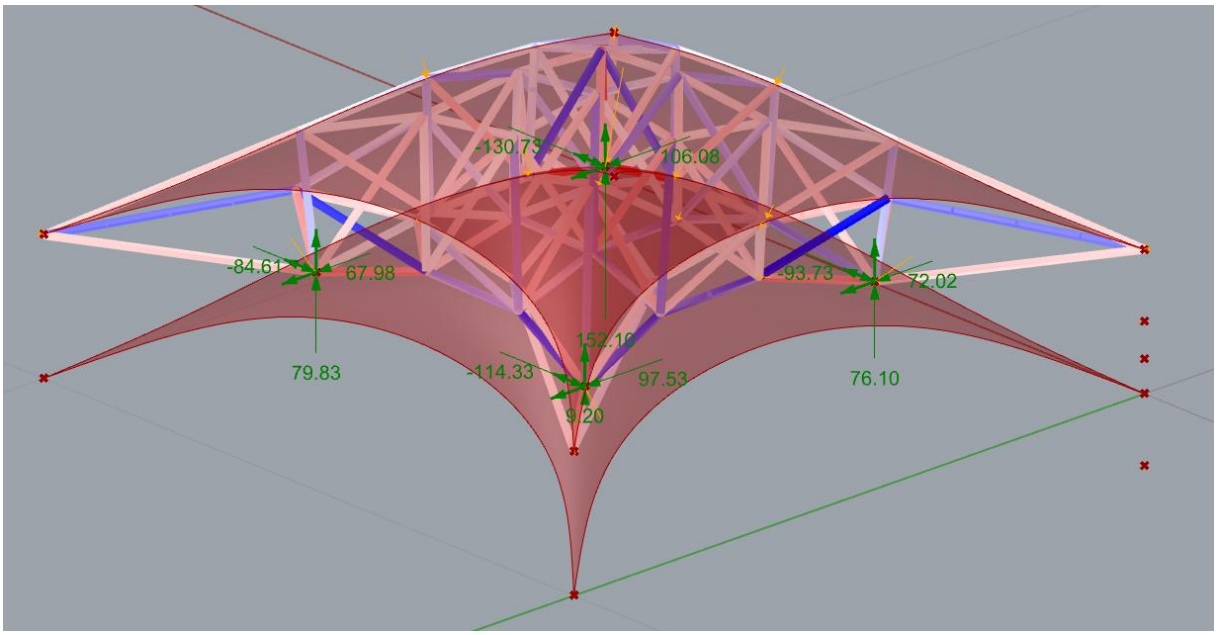
8.2.2.3 Model sterowany geometriami uzyskiwanymi w wyniku symulacji z użyciem algorytmu dynamicznych relaksacji

Trzeci model zachowań oparty jest na uproszczonej względem poprzednich rozdziałów reakcji membrany na układ obciążeń. Ponownie wykorzystywany jest model poszukiwania formy. Zamodelowany jest on poprzez stworzenie kwadratowej płaszczyzny zamocowanej we wszystkich 4 narożach w sposób nieprzesuwny, a następnie nadanie jej właściwości fizycznych jak sztywność, siła naciągu, elastyczność, modułami przynależnymi dodatkowi do programu Grasshopper o nazwie ***„Kangaroo 2”***. Wykorzystano formułę ***„pressure”*** w celu nadania stopnia naciągu płaszczyzny, funkcję ***„EdgeLength”*** definiując maksymalne rozciągnięcie krawędzi, oraz ***„anchor”*** umożliwiającym określenie punktów mocowania. Następnie zdefiniowane zostały parametry obciążenia ciśnieniem skierowanym zgodnie ze zwrotem wektora ***„z”***. Wszystkie cechy składowe modelu połączono modułem ***„merge”*** oraz dodano polecenie ***„show”*** umożliwiające wizualizacje zmian geometrii modelu w czasie rzeczywistym. Moduł łączący następnie podpięto do algorytmu obliczania relaksacji dynamicznych, odpowiadający za znajdowanie wynikowych geometrii płaszczyzny o nazwie ***„zombieSolver”***, która w wyniku szeregu modyfikacji przekształcana jest w powłokę o złożonej krzywiźnie w każdym kierunku. Algorytm oblicza ostateczne geometrie w celu przyspieszenia działania programu. Działa więc odmiennie od funkcji ***„KangarooSolver”***. Ze względu jednak, na konieczność badań szeregu geometrii, jednocześnie zdecydowano się na redukcję wymagań szybkości obliczeń modelu.

Na funkcjonalnej powłoce po każdorazowej zmianie geometrii rozpinana jest kratownica funkcją ***„SpaceTruss1”*** definiowana powłoką pasma dolnego prętów oraz głębokością w punktach węzłowych. Głębokość kratownicy określono na 1m w każdym punkcie, a liczbę modułów jako równą wcześniejszym modelom zachowań wynoszącą 4 w każdym kierunku. Struktura nieobciążona posiada 4 osie symetrii. Każde obciążenie poza oddziaływaniem grawitacyjnym na układ statyczny struktury prętowej, sprowadzane jest do prostego ciśnienia kierunkowego na model powłoki. W wyniku działania siły, deformacji ulega powłoka definiująca dolne pasmo kratownicy. Odmiennie od wcześniejszych modeli preakcji model membranowy ujednolica reakcje sił przykładanych w różnych punktach. Każde obciążenie zdefiniowane jest kierunkiem przyłożenia i wartością siły. Wyłącznie te parametry decydują o rodzaju reakcji. Oznacza to, że pula różnych form jest znacznie ograniczona, co upraszcza zbudowanie z modelu preakcji systemu geometrii bezpiecznych, również w trakcie użytkowania modeli, których celowość opisywano w rozdziale nr 2.

Model ten odmiennie od pozostałych preakcji nie uwzględnia w modyfikacji geometrii wszystkich sił, a jedynie reaguje na pojedynczą, najbardziej znaczącą. W celu selekcji odpowiedniej siły zamodelowano formułę analizy przykładanych sił. Gdy wartość co najmniej dwóch sił jest różna o mniej niż 20% wartości oraz w symulacji obciążania mniejszą siłą referencyjnej struktury statycznej wywołuje ona deformacje mniejsze od największej siły o mniej niż 20% następuje sumowanie sił poprzez dodawanie wektorowe. Sumowaniu takiemu podlega dowolna liczba składowych sił. Oznacza to możliwość przyłożenia siły powierzchniowej, która dyskretyzowana jest na poszczególne węzły zależnie od kąta padania na powłokę. Sumowane są wtedy jej oddziaływania sprowadzane do pojedynczego wektora oddziaływania. Wektor ten następnie przykładany jest w postaci ciśnienia w środku ciężkości struktury, odkształcając powłokę na której rozpięta jest kratownica. Każda nie pierwsza siła mniejsza od wiodącej o więcej niż 20% jest pomijana przez algorytm i nie wpływa na modyfikację geometrii.

Struktura podlega badaniu skali reakcji, lecz zakres zawsze pozostaje jednakowy i dotyczy całej struktury. Konieczne jest określenie zdolności modelu do kompensacji obciążeń punktowych, których nie badano wcześniej w rozdziałach 4 oraz 5. Jako niezmienną wartość określono liczbę iteracji algorytmu obliczeniowego. Jest ona równa 200 pętlom obliczeniowym co stanowi bezpośrednie przełożenie wyników wcześniejszych badań na warunki obliczeniowe badanego systemu. Nadal maksymalne teleskopowanie dowolnego pręta wynosi 0,5m. Przewiduje się, że wartość ta w pierwszej kolejności ograniczać będzie elementy ukośne pionowe oraz pionowe łączące oba pasma elementów. Model preakcji przedstawiono na Grafika 58.

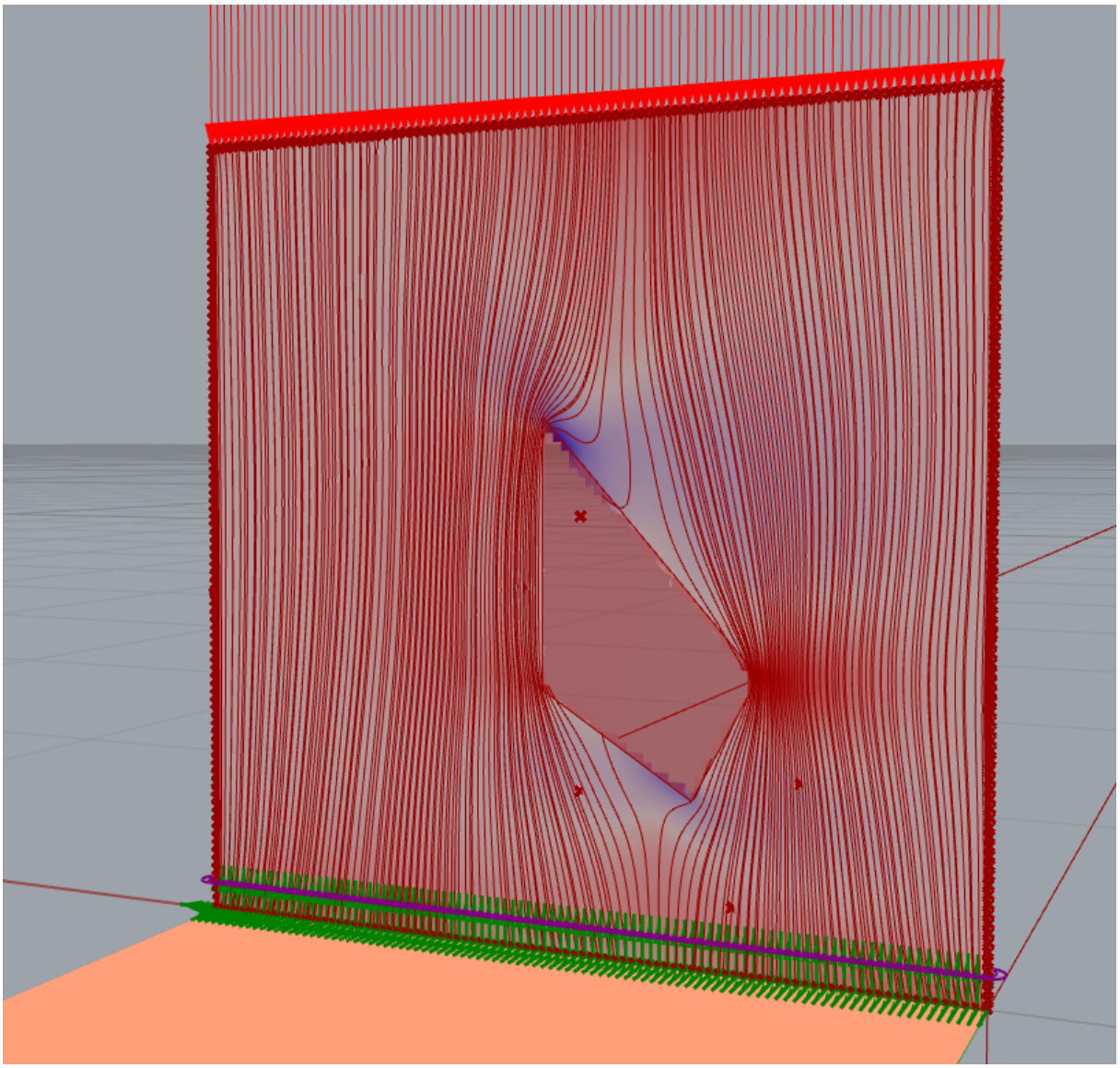


Grafika 58.Model uzyskany w wyniku działania algorytmu dynamicznych relaksacji. Model stanowi załącznik nr 8.E pracy.

8.2.2.4 Model oparty o koncepcję rozważań teoretycznych W. Zalewskiego w odniesieniu do wykresów strumieni sił

Ostatni poddawany badaniu model oparty jest na teorii strumieni sił opracowanej i propagowanej przez prof. Wacława Zalewskiego. Teoria pozwala na określenie kierunków przepływu głównych naprężeń w strukturze ciągłej [178]. Na jej podstawie określane są fragmenty modelu monolitycznego materiału poddawane największym naprężeniom oraz dalej odkształceniom. Model zachowań wymaga większego nakładu obliczeniowego w celu wygenerowania geometrii i bazuje na wirtualnym modelu powłoki ciągłej. Teoria w głównej

mierze opracowana w celu wizualizacji architektonicznej kierunków dystrybucji naprężeń i głównych sił propagujących się w strukturze [179], z czasem wykorzystywana była również przy obliczeniach prostych form przestrzennych stanowiących znaczne wyzwanie inżynierskie. Metoda przeznaczona wyłącznie do prowadzenia obliczeń komputerowych wymagająca szeregu obliczeń zależnych od wymaganej skali dokładności tożsama jest z metodą elementów skończonych, lecz spektrum jej zastosowań ogranicza się wyraźnie do modeli



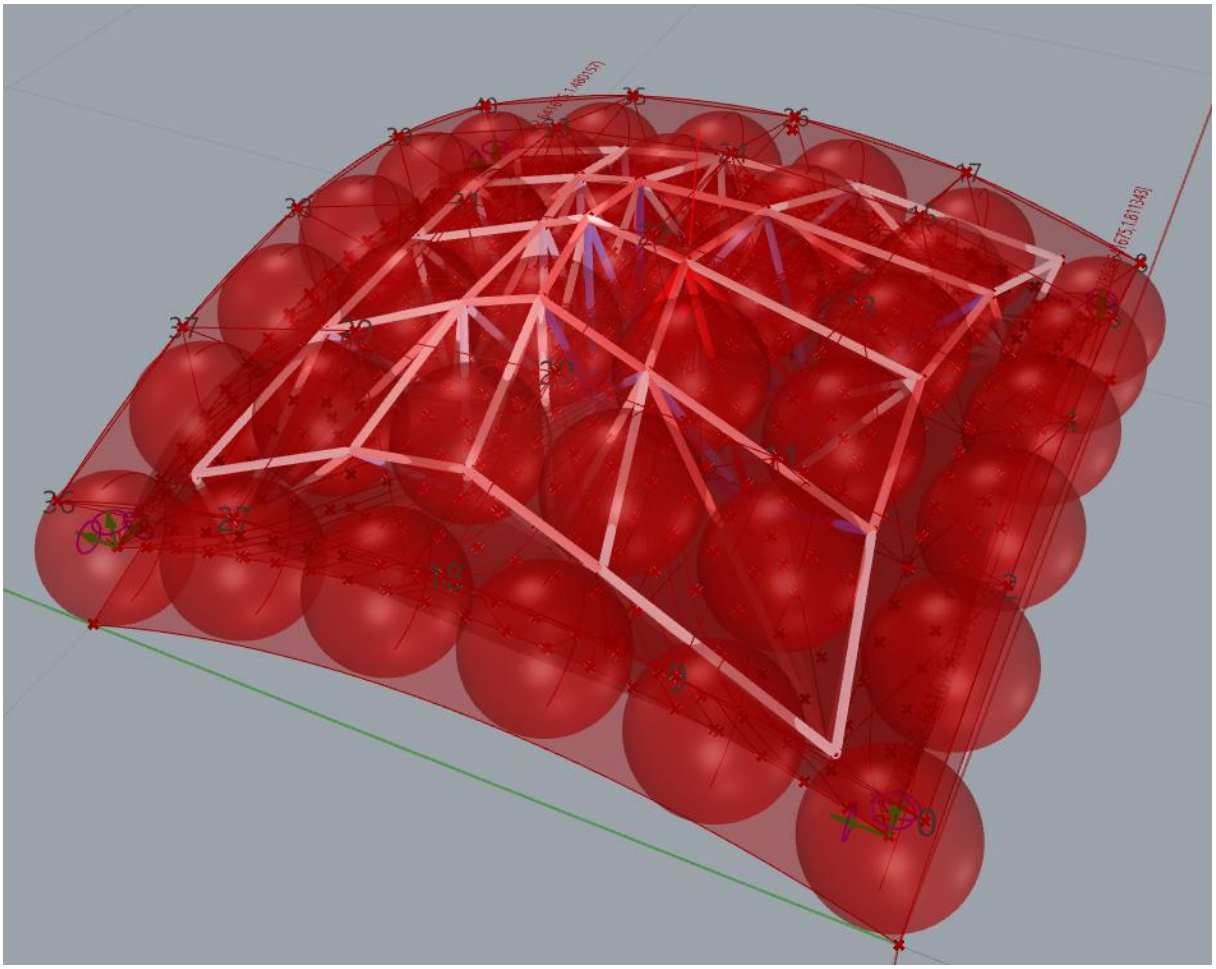
Grafika 59.Przykładowy wykres strumieni sił według teorii rozkładu naprężeń według prof. Wacława Zalewskiego. Widoczny jest wpływ naroży otworowań na rozkład strumieni. Układ strumieni sil jest komplementarny z mapą naprężeń. W miejscu zwiększonego zagęszczenia linii strumieni mapa przyjmuje wyraźniejszy kolor sygnalizując większe naprężenia.

ciągłych oraz ram. Przykład działania metody strumieni sił przedstawiono na Grafika 59.

Główne założenie, na którym bazuje się model zachowań postuluje możliwość definiowania przepływu strumieni sił w strukturach dyskretnych, jeśli forma elementu strukturalnego zachowuje rozkład materiału zgodny z rozkładem głównych naprężeń w modelu ciągłym. Kolejne założenie mówi o możliwości znacznej oszczędności materiału oraz energii przy realizacji i obsłudze struktury w przypadku kierowania się rozkładem jej elementów przestrzennych zgodnie z wynikami metody strumieni sił. Oczywistym jest, że każdy przypadek obciążeniowy wywołuje całkowicie indywidualny rozkład strumieni sił uniemożliwiając

stworzenie modelu statycznej struktury dostosowanej do wszystkich przypadków obciążeniowych, bądź wymiernej ich części.

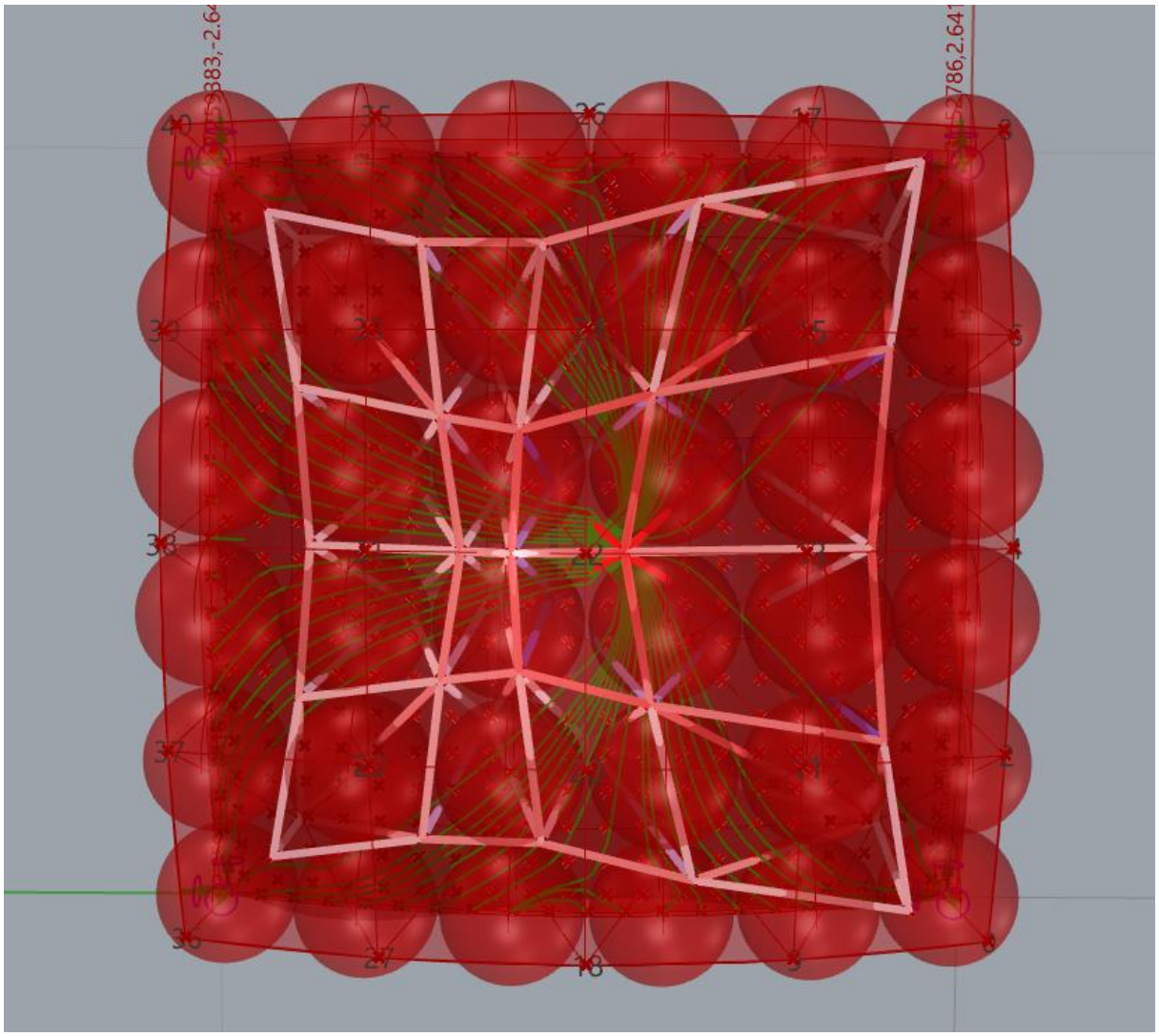
Próby stworzenia statycznych struktur, których realizacja zakończona była sukcesem określanym jako znaczna redukcja masy własnej przy zachowaniu nośności w wielu przypadkach odznaczały się bardzo niestabilną pracą pod niekontrolowanymi obciążeniami, rozumianymi jako nieprzewidywalny rozkład punktów obciążenia lub złożone przypadki obciążeniowe, redystrybuujące w sposób nieprzewidywany strumienie główne sił. Koncepcje, których optymalizacja zakończona była rzeczywistym wzrostem efektywności wykorzystania materiału stanowiły głównie prefabrykowane płyty stropowe [180]. Opracowane jako jednorozmiarowe elementy o kwadratowym obrysie stosowane do wypełnienia przestrzeni między belkami stropowymi pozwalały na redukcję masy względem nieoptymalizowanych płyt stropowych o minimum 45%. Ideę optymalizacji prostej płyty prefabrykowanej udało się następnie rozszerzyć do optymalizacji układu płaskich siatek ramowych z wykorzystaniem rozkładu strumieni sił dla struktur masowych, odpowiadających zewnętrzną formą strukturze dyskretnej[181]. Koncepcja więc uzyskała rozszerzenie tak na powłoki jak i przestrzenne struktury nieciągłe, w obu przypadkach pozwalając na uzyskanie odnotowywalnych redukcji masy przy zachowaniu nośności. Proces modelowania geometrii był w obu przypadkach prosty i oparty o liniowy schemat działań. W pierwszej kolejności modelowano bryłę pełną o geometrii zewnętrznej odpowiadającej ostatecznej strukturze. Następnie modelowano punkty podparcia i siły przykładane do modelu. Algorytm obliczał główne strumienie sił w przestrzeni trójwymiarowej w obrębie kubatury modelu pełnego. Tworzyło to szkielet dla trasowania sił. W kolejnym etapie definiowano otoczenie wokół wynikowego szkieletu tworząc żebrowaną strukturę w obrębie kubatury uproszczonej. Szkielet ten tworzył często złożone struktury o licznych zakrzywieniach definiowanych wyższymi funkcjami kształtu. Trudnością jednak pozostawało zawsze wystąpienie sił w miejscach niesymulowanych lub o wyjątkowych wartościach. Generowało to przepływ sił w miejscach nietożsamych ze szkieletem struktury, prowadząc do nagłego zniszczenia struktury. Rozwiązaniem mogło być uzupełnienie ażurowej struktury o materiał dystrybuujący naprężenia wyjątkowych sytuacji obciążeniowych, lecz uwzględnienie znacznej liczby przypadków obciążeniowych wypełniało objętość struktury prowadząc do znacznego wzrostu masy, czyniąc model niskoopłacalnym ze względu na trudności wykonawcze. Sam proces wykonawczy z kolei wymuszał opracowanie nowej techniki druku 3D stosującego piasek jako materiał dla produkcji form, zalewanych następnie betonem [180]. Konieczność wprowadzenia pewnej formy zmiany geometrii był wymagany dla zwiększenia stopnia bezpieczeństwa wykonanej w tej technologii struktury.



Grafika 60.Przykład geometrii kratownicy uzyskany w wyniku działania modelu opartego o koncepcję strumieni sił. Każda ze sfer reprezentuje zakres wpływu strumieni na poszczególne węzły.

Rozwiązaniem zastosowanym w algorytmie preakcji jest wykorzystanie rozkładu strumieni sił do określenia kierunków deformacji struktury prętowej w celu redukcji ugięć pod wpływem obciążeń zewnętrznych. Model oparty o opisane wcześniej zasady wykonano również w oprogramowaniu Grasshopper. W pierwszej kolejności zamodelowano identyczną do wcześniejszych modeli powłokę na której rozciągnięto dwa osobne modele struktur. Pierwszą była kratownica o 4 modułach kwadratowych w każdym kierunku, oparta na wszystkich 4 narożach w sposób obrotowy nieprzesuwny. Drugą, powłoka o grubości 20cm, której spodnia powierzchnia była tożsama z powłoką. Dla każdego węzła kratownicy zdefiniowano następnie kubaturę wpływu. Określona była ona jako sfera o średnicy równej 1,1 odległości między sąsiednimi węzłami. Modelowana była w przestrzeni trójwymiarowej tak, aby w każdym przypadku dwóch sąsiednich węzłów istniała przestrzeń wspólna obu zakresów wpływu. Wszystkie siły jakim ma podlegać struktura kratownicowa w pierwszej kolejności przykładane są do struktury pełnej. Na powłoce w wybranym miejscu definiuje się siłę punktową. W przypadku określenia siły powierzchniowej również musi ona podlegać podziałowi na węzły. Odpowiedni algorytm zlicza siły zamienne, dyskretyzujące obciążenie ciągłe. Funkcją ***„trim”*** powłoka na której przyłożona jest siła powierzchniowa dzielona jest sferami stref wpływów. Dla wycinka powłoki przynależnemu do danego węzła wyznaczane jest pole powierzchni powłoki. Następnie mnożone jest przez wartość obciążenia powierzchniowego. Wynik stanowi wartość wektora siły przyłożonej na kierunku osi normalnej do powłoki w miejscu wystąpienia węzła kratownicy. Uproszczenie sił ma na celu zapobieganie wystąpieniu zjawiska wyginania pojedynczego pręta i tworzeniu ramy przestrzennej z kratownicy. Jednocześnie siła przyłożona w sposób precyzyjny do powłoki wywołuje naprężenia. Te przeliczane są algorytmem nieliniowym Gaussa. Następnie rozpoczyna się

proces wizualizacji danych. Na podstawie wynikowego rozkładu naprężeń kształtowane są strumienie sił modułem ***„forceflow”*** stanowiącym element nakładki ***„Karamba 3D”*** do programu Grasshopper. Funkcja ta pozwala na przedstawienie rozkładu strumieni sił w przestrzeni lub na płaszczyźnie, w dowolnej strukturze pełnej, zdefiniowanej jako powłoka. Na potrzeby symulacji nie określano płaszczyzny badania układu sił, lecz określono przebieg strumieni w płaszczyźnie równoległej do powłoki. Pozwoliło to na prezentację głównych trasowań strumieni dla zakrzywionego modelu, w którym w każdym punkcie wykres sił jest rysowany dla normalnego do powłoki wektora. Wykres może podlegać dostosowaniu pod względem dokładności rysowania przekładającego się na zmianę liczby punktów kontrolnych każdej linii strumienia oraz dokładności prezentacji strumieni poprzez zwiększenie liczby linii reprezentujących strumienie. Linie strumieni rozłożone są w objętości skorupy ciągłej rozpiętej na powłoce co oznacza, że wszystkie przecinają strefy wpływów poszczególnych węzłów. Funkcją ***„extract lines”*** linie strumieni zamieniane są na linie łamane definiowane początkiem, punktami kontrolnymi oraz końcem. Średnia liczba linii dla pojedynczego przypadku obciążeniowego wynosi od 17 do 25 tysięcy, a przykład wyniku przedstawiono na Grafika 60. Każda z linii badana jest pod względem przecięcia z dowolną strefą wpływów. Dla każdej strefy wpływów sumowana jest liczba przecięć. Wartość ta stanowi współczynnik wpływu będący jednocześnie atraktorem deformacji geometrii kratownicy. Im więcej dana strefa posiada przecięć z liniami strumieni sił, tym silniej przyciągać będzie sąsiednie węzły. Dla każdego węzła obliczany jest wskaźnik jego atraktora, a następnie siła oddziaływania sąsiednich węzłów na niego. Wartość oddziaływania obliczana jest jako odwrotność odległości mnożona przez wartość atraktora. Wartość ta jest wektorem posiadającym zwrot na linii między przesuwanym węzłem, a atraktorem oraz punkt przyłożenia w miejscu danego przesuwanego węzła. Gdy dla danego węzła przeliczone zostają wszystkie wektory przyciągania, następuje ich sumowanie. W wyniku działania otrzymywany jest składowy wektor wypadkowy. O jego wartość długości na kierunku przez niego definiowanym przemieszczany jest dany węzeł. Dla każdego kolejnego węzła czynność jest powtarzana. W wyniku działania algorytmu powstaje geometria, w której węzły agregują się w miejscu wystąpienia największych naprężeń. Model automatyzuje zagęszczanie siatki w miejscach wymagających wzmocnienia, natomiast przerzedza ją w odciążonych strukturach. Jednocześnie prowadzi do ukierunkowania elementów strukturalnych zgodnie z rozkładem strumieni sił. Wszystkie elementy poddawane są bardziej osiowemu obciążeniu. Jednocześnie redukowane jest zagrożenie wyboczenia elementu. Maksymalne przemieszczenie pojedynczego węzła określono jak w poprzednich modelach na 0,5m. Jedynie skrajne podporowe węzły nie ulegają deformacji. Dla różnej liczby linii strumieni wyniki są różne, co wymusza ujednolicenie wartości dla wszystkich badań. Przyjęto 400 linii uzyskując średnie zagęszczenie 20 linii na każdy metr przekroju modelu. Jak przedstawiono wcześniej, strefy wpływu wzajemnie się nakładają. Oznacza to, że część linii przechodząca jednocześnie przez dwie sąsiednie strefy wpływu jest liczona przez obie. W wyniku zwielokrotnienia takiego zjawiska wektory znoszą się w większym stopniu, pozwalając na uzyskanie bardziej wyśrodkowanego rozkładu węzłów. Nie przewiduje się dodatkowego stężania struktury w miejscu wystąpienia strumieni sił w strefie o zmniejszonej gęstości węzłów. W wyniku działania algorytmu powstaje całkowicie nieregularna struktura. Model wymaga znacznego nakładu obliczeniowego, co wymusza jednoczesne badanie wyłącznie jednego układu statycznego gotowej struktury naraz. Podczas badań efektywności modelu strumieni sił należy określić wartości zakresów brył oddziaływań, skali reakcji modelu oraz możliwości skuteczniejszego bazowania na strumieniach sił obliczanych i rysowanych w innych płaszczyznach. Sposób działania wraz ze wszystkimi elementami analizy geometrycznej strumieni sił przedstawiony został na Grafika 61.



Grafika 61.Układ geometryczny w widoku z góry. Zauważalny jest największy wpływ węzłów środkowych na geometrię kratownicy referencyjnej. Model stanowi załącznik nr 8.C pracy.

8.2.3 Obsługa modeli preakcji podczas badań

W przypadku każdego opisanego modelu nałożono dodatkowy wymóg zdolności struktury do realizacji poprzez rotację na węźle. Opisywane wcześniej w pracy zagadnienie obrotu centrycznego oraz niecentrycznego, reprezentowane jest w każdym modelu poprzez wymóg rotacji mniejszej niż 18 stopni względem referencyjnej geometrii. Dla każdego wzrostu skali reakcji obrót ten rośnie dlatego w sytuacji wykrycia przekroczenia przez co najmniej jedną geometrię wartości dopuszczalnego obrotu algorytm wyszukuje ostatnią geometrię jaka spełnia warunek i spośród w ten sposób zawężonej grupy przypadków dobiera jeden o największej redukcji poszukiwanego parametru.

Dla każdego z modeli zachowań istnieje nieskończona pula reakcji pod względem wartości skali deformacji, uwzględniając możliwość liniowej zmiany wartości. Niemniej liczba schematów preakcji tworzonych przez algorytm jest ograniczona a kwantyfikacja skal jest działaniem zwiększającym szybkość poszukiwania geometrii. Nie zmieniają one w żadnym przypadku topologii układów, połączeń w węzłach lub na podporach, ani sposobu pracy struktury. Nadal jednak liczba sposobów deformacji modelu pozostaje znaczna. W pierwszej kolejności konieczne jest zbadanie efektywnych skal reakcji, funkcji translacji dla części z modeli zachowań oraz zmian efektywności przy zmianie wartości sił zewnętrznych dla sytuacji wyjątkowych.

Działanie preakcji oparte jest o jak najszybszą odpowiedź geometryczną modelu w celu uniknięcia przeciążenia struktury. Do pewnego stopnia możliwa jest redukcja czasu obliczeniowego, skrócenie przedziału czasu potrzebnego na realizację ruchu z kolei pozostaje znacznym wyzwaniem mechatronicznym, szczególnie w dużej skali. Oznacza to, że większych oszczędności czasu należy poszukiwać w rozwiązaniach predykcji obciążeń. Dla części obciążeń zmiennych jak wiatr możliwe byłoby wykorzystanie dwóch systemów czujników. Bezpośrednich mocowanych na samej strukturze oraz predykcyjnych lokalizowanych w pewnej odległości. Wykrycie obciążenia na czujnikach predykcyjnych pozwala na rozpoczęcie reakcji modelu przed wystąpieniem danego obciążenia na samej strukturze. To z kolei niweluje zjawisko nałożenia newralgicznego przypadku obciążeniowego na niedostosowaną geometrię. Badanie takie jednak leży poza zakresem badawczym pracy. Dotychczasowe badania prezentowały ponad trzykrotny ponadnormowy wzrost naprężeń w analogicznych przypadkach. Konieczne jest jednak opracowanie systemu predykcyjnego dla wiatru, który jednocześnie pozwalałby na pozostawianie rezerwy wytrzymałościowej na znacznie trudniejsze w przewidywaniu obciążenia użytkowe. Ich nieprzewidywalny charakter kierunku, wartości i szybkości zmian wymaga wyłącznie zapewnienia strukturze zakresu bezpiecznego obciążenia punktowego w dowolnym węźle podczas całego procesu zmian geometrii. Możliwe musi być naruszenie granicy dopuszczalnych odkształceń jeśli struktura pozostaje w granicach maksymalnych naprężeń. Dopiero taki warunek pozwala na uzyskanie efektywności argumentującej użycie systemów mechatronicznych [125]. Znaczną trudnością charakteryzuje się wykonanie systemu predykcji. Zagadnieniem trywialnym jest określenie siły wiatru w zadanym kierunku, lecz określenie dokładnego przestrzennego kierunku siły innej niż powierzchniowej wymaga opracowania systemu czujników nieinwazyjnych dla oddziaływania sił na strukturę pozostaje zagadnieniem o dużej złożoności. Tworzenie systemu predykcji nie leży w zakresie badań preakcji i powinno stanowić osobny zakres badań zindywidualizowanych dla danej metody realizacji preakcji.

8.2.4 Przygotowanie przypadków obciążeniowych

W celu określenia skuteczności redukcji naprężeń oraz ugięć przy zastosowaniu preakcji opracowano zestaw przypadków obciążeniowych pozwalających na przekrojową analizę predefiniowanych zachowań. Grupę badań dobrano tak, aby uwzględnić wszystkie rodzaje potencjalnie niebezpiecznych sytuacji obciążeniowych. Są one dobrane na podstawie wyników badań [66], wskazujących zróżnicowanie w sposobie efektywnego reagowania modeli. W zbiorze przypadków obciążeniowych znajdują się przypadki statyczne oraz quasi-zmienne w formie zdyskretyzowanych zmian obciążeń. Sumarycznie badaniu podlegają struktury w 40 przypadkach obciążeniowych pogrupowanych według tendencji jednoczesności wystąpienia. Badanie ruchu użytkownika podzielone na 10 kolejnych układów obciążenia jest przykładem jednej grupy badawczej.

Pierwsze 5 przypadków stanowią układy gradacji wzrostowej siły obciążającej strukturę niesymetrycznie w sposób pionowy. W kolejnych przypadkach kolejne rzędy węzłów obciążane są pionowymi siłami o wartości 10kN każde. W ostatnim przypadku obciążenie jest symetryczne i pokrywa całą strukturę co utożsamia je z obciążeniem powierzchniowym pełnym. Badania pierwszych 4 przypadków ma na celu określenie reakcji niesymetrycznej i skoku naprężeń jaki następuje między obciążeniem struktury, a reakcją, co ma bezpośredni związek z bezpieczeństwem struktury. Ostatni piąty przypadek pozwala na określenie różnicy geometrycznej między przypadkami niesymetrycznymi oraz symetrycznym.

Przypadki od 6 do 10 stanowią powtórzenie wcześniejszych układów przyłożonych sił, lecz wektor w każdym przypadku przyjmuje kierunek ukośny ze składowymi X,Y oraz Z kolejno 5kN, 5kN, -5kN. Wyniki będą porównywane z wcześniejszymi przypadkami.

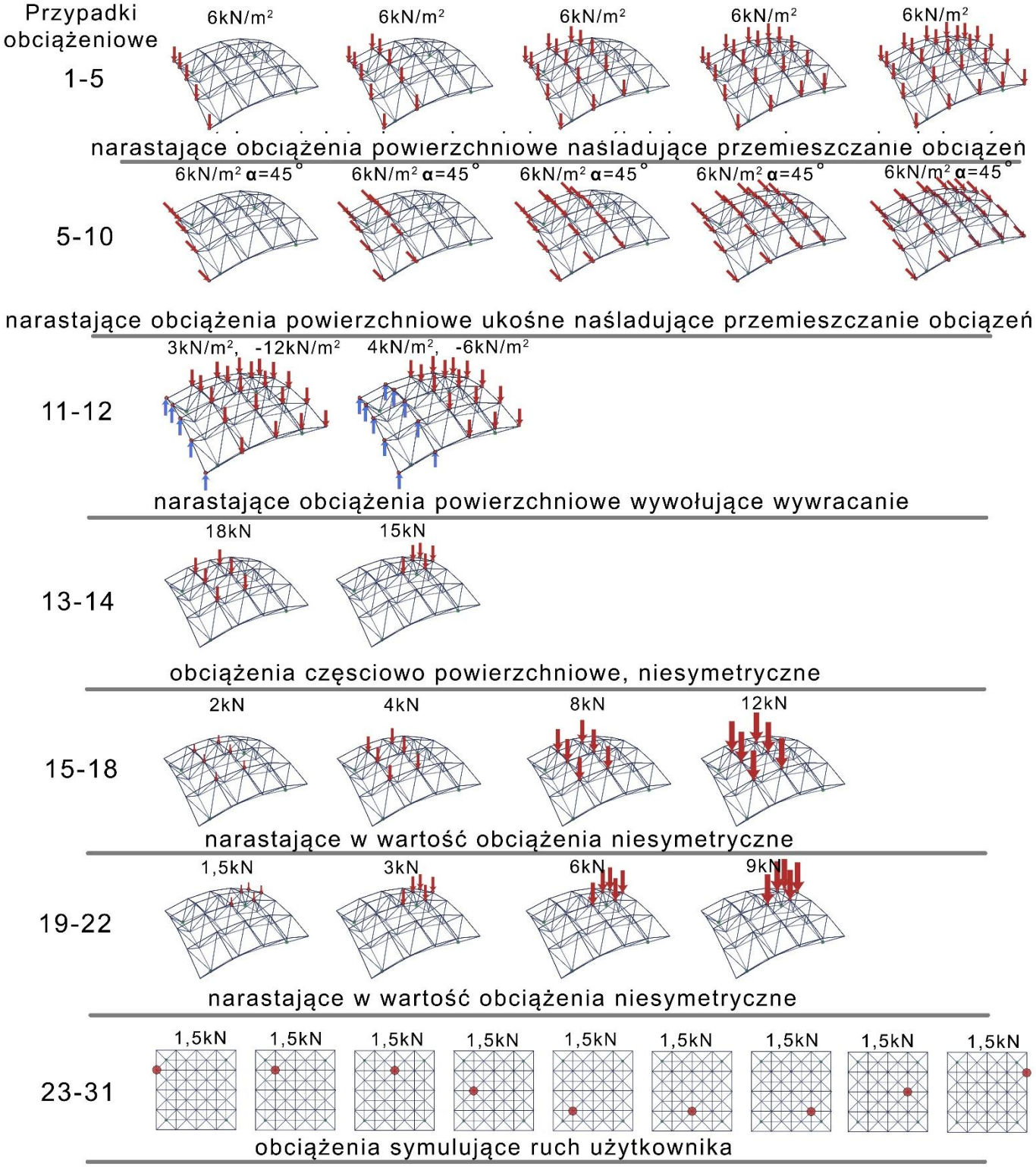
Następne przypadki nr 10 oraz 11 reprezentują przypadek dwukierunkowego obciążenia niesymetrycznego, wywołującego znaczne skręcanie całej struktury i nierówny charakter naprężeń na podporach. 3 z 5 lub 4 z 5 rzędów węzłów górnych struktury obciążonych jest pionowo z góry przeciwnie do wektora „Z". Pozostałe węzły z kolei podlegają obciążeniu o przeciwnym zwrocie. Siły te reprezentują zjawiska naturalnych nieregularnych obciążeń charakterystycznych dla struktur wielkoskalowych. Złożone oddziaływania stanowią jedną z głównych przyczyn nagłych zniszczeń struktur prętowych [182]. Zjawisko to nie jest jednak typowe dla struktur o średniej skali oraz małej. Z kolei skala stanowi w architekturze responsywnej jeden z głównych czynników odpowiedzialnych za wzrost lub spadek ekonomiczności implementacji ruchu [69]. Wymusza to badanie postępującego w dwóch przypadkach obciążeniowych układu wywracającego strukturę, który oddziałuje na modele o różnej wartości smukłości elementów przestrzennych.

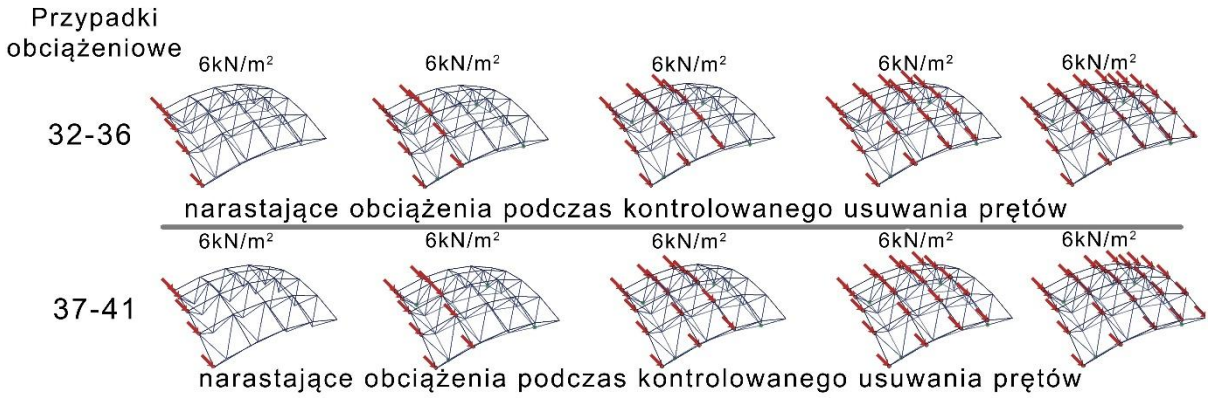
Kolejne dwa przypadki wywołują obciążenia strefy środkowej struktury. Oba układy są niesymetryczne z dominującym kierunkiem obciążenia kolejno zgodnie ze zwrotem osi X oraz Y w układzie czworokątnym na powierzchni kratownicy, przy dyskretyzacji obciążenia na 4 sąsiednie węzły. Analogiczne obciążenia stanowią kolejne 8 przypadków obciążeniowych w dwóch grupach obciążeń. Dla każdej grupy zdefiniowany osobny układ obciążeń, który przez kolejne 4 przypadki przyjmuje coraz większe wartości wektorów kolejno -1kN, -2kN, -4kN oraz -6kN. Badanie ma na celu uproszczone określenie wpływu zmienności obciążeń w czasie. Badaniu w każdym przypadku podlegają statyczne układy obciążeń. Na podstawie wyników badań serii uzyskane zostaną dane na temat zmienności reakcji dla różnych skal wartości. Identyczność reakcji wskazywać będzie na mniejszą istotność badań geometrii pośrednich, lecz zróżnicowanie efektywnych odpowiedzi struktury argumentować będzie pogłębione dalsze badania przejścia struktury między geometriami.

Dalej przebadany zostanie przypadek obciążeń ukośnych niesymetrycznych dla kolejnych 4 przypadków zróżnicowanych skalą sił i lokalizacją obciążonych węzłów. Dalsze 10 przypadków zdefiniowane zostało w celu badania uproszczonego zjawiska obciążenia, o charakterze nawiązującym do obciążeń użytkowych. Zdefiniowano teoretyczną ścieżkę przemieszczania obciążenia między kolejnymi węzłami, skutkując koniecznością interpolacji w postaci 10 przypadków obciążeniowych. Obciążenia takie dla części struktur lub elementów responsywnych stanowić mogą dominującą część sił przykładanych w czasie eksploatacji obiektu. Wymusza to przebadanie zachowań modelu na ich zmienność, bardziej niż na samo wystąpienie obciążeń. Ich natura determinuje ciągły ruch, co oznacza że głównymi czynnikami poddanymi badaniu będzie zdolność odpowiednio szybkiej zmiany geometrii kratownicy w czasie, konieczność uzyskania rezerwy wytrzymałościowej kompensującej niezdolność nadążania za zmianą obciążeń lub maksymalne tempo zmian miejsc przyłożenia danej siły. Badanie to można całościowo określić jako określenie zdolności przyjęcia sił o zmiennej w czasie wartości i położeniu.

Preakcje mają zapewniać wzrost pewności uzyskania w krótkim czasie satysfakcjonującego wzrostu wytrzymałości co jest zagadnieniem pokrewnym z pewnością uzyskanych geometrii. Pewność określa w responsywności zdolność zachowania niskiego naprężenia nawet w wyjątkowej sytuacji utraty ciągłości jednego z elementów struktury. Dla struktur kratownicowych nieciągłość taka jest początkiem scenariusza nagłej kaskadowej utraty całkowitej nośności modelu. Alternatywą opisywanej wcześniej nadmiarowości może być szybka reakcja preakcją, redystrybuująca siły w modelu o losowo zredukowanej liczbie elementów nośnych. Ostatnie 10 przypadków obciążeniowych wybiera 10 elementów strukturalnych, które polegają symulowanemu nagłemu usunięciu. W wyniku działania struktura podawana jest przeciążającym naprężeniom. Badane jest zmniejszenie ich wartości poprzez wprowadzenie nowych geometrii typowymi zachowaniami preakcji.

Sumarycznie 41 przypadków tworzących serię badań przedstawioną na Grafika 62 poddanych będzie analizie. Określone dla nich zostaną najefektywniejsze parametry modyfikacji geometrii oraz zakresy stosowalności poszczególnych modeli.





Grafika 62. Zestawienie przypadków obciążeniowych dla modeli preakcji. Wszystkie przypadki symulowane są grupami obciążeń punktowych lub obciążeniami powierzchniowymi o stałym charakterze oddziaływania.

8.2.5 Wyniki badań

Wyniki badań 4 kolejnych modeli preakcji zebrano w tabeli. Pełny zestaw wyników stanowi załącznik nr 8.A do badań w formie arkusza programu Microsoft Excel. Dla każdego z 41 przypadków obciążeniowych uzyskano pełny zakres danych. We wszystkich przypadkach udało się uzyskać wyniki lepsze niż referencyjne dla struktury statycznej. Struktura niepoddawana modyfikacji geometrii analizowana była wyłącznie pod kątem naprężeń maksymalnych oraz strzałki ugięcia. Wszystkie kolejne struktury, ujednoliconym modelem analizy uzyskiwały dane na temat proporcji długości najdłuższego do najkrótszego pręta, co jest bezpośrednim indykatorem stopnia rozbudowania puli elementów przestrzennych, z jakich złożona może być fizyczna struktura. Wskaźnik nie był częścią badań efektywności. Jest on informacją z jakiego rzędu wartościami liczby różnych siłowników należy planować realizację modeli ruchomych. Kolejnym dodanym do analizy elementem jest numer oraz skala reakcji. Są to wartości względne, które należy interpretować w odniesieniu do budowy algorytmu preakcji. Numer reakcji wskazuje która w szeregu 30 lub więcej geometrii wynikowych była najefektywniejsza. Wartość ta dopiero dla pełnego spektrum badań prezentuje tendencje czy model powinien operować w zakresie skrajnie deformowanych geometrii, czy w środku zakresu. Wraz z numerem reakcji występuje wartość skali reakcji, odnotowywana w celu uzyskania powtarzalności wyniku.

8.2.5.1 Wpływ responsywności na ogólne wyniki

Dla prawie każdego przypadku poza układem obciążeń nr 18 uzyskano redukcję ugięcia i naprężeń względem modelu referencyjnego. Dla różnych przypadków i serii przypadków obciążeniowych największą efektywnością odznaczały się różne modele. Sumarycznie najczęściej najefektywniejsze geometrie uzyskiwał model nr 4 bazujący na idei użycia teorii strumieni sił przez Wacława Zalewskiego, w 15 z 41 przypadków obciążeniowych uzyskując najlepszy wynik, a dla szeregu przypadków pozwalając na znaczną redukcję naprężeń. Drugim najskuteczniejszym modelem był model nr 3 wykorzystujący rozwiązania poszukiwania form poprzez odkształcenia membrany. Obie metody reakcji pozwalają razem na stworzenie efektywnego modelu preakcji. Odpowiedzialne są za 70% najefektywniejszych odpowiedzi geometrycznych. W 96% przypadków nadal uzyskałyby wyższe wyniki niż model referencyjny, a największy spadek efektywności wyniósł niespełna 15%. Wartość ta mimo znacznego wpływu na stateczność struktury stanowi niereprezentacyjną część badań statycznych. Minimalny model może więc być złożony z dwóch ostatnich modeli cząstkowych. Jednocześnie żaden model samodzielnie nie umożliwia implementacji ze względu na pojedyncze znaczne wzrosty naprężeń lub ugięć. Wszystkie wyniki zebrane i przedstawione w arkuszu uzyskiwane były w identycznym czasie obliczeniowym mierzonym programowo przez Grasshopper. Czas oczekiwania na każdy wynik wynosił 1,7 sekundy. Wartość ta

stanowi zmniejszenie czasu pierwszej reakcji o co najmniej 1 rząd wielkości, w odniesieniu do wcześniejszych badań gotowych modeli modułów głównych.

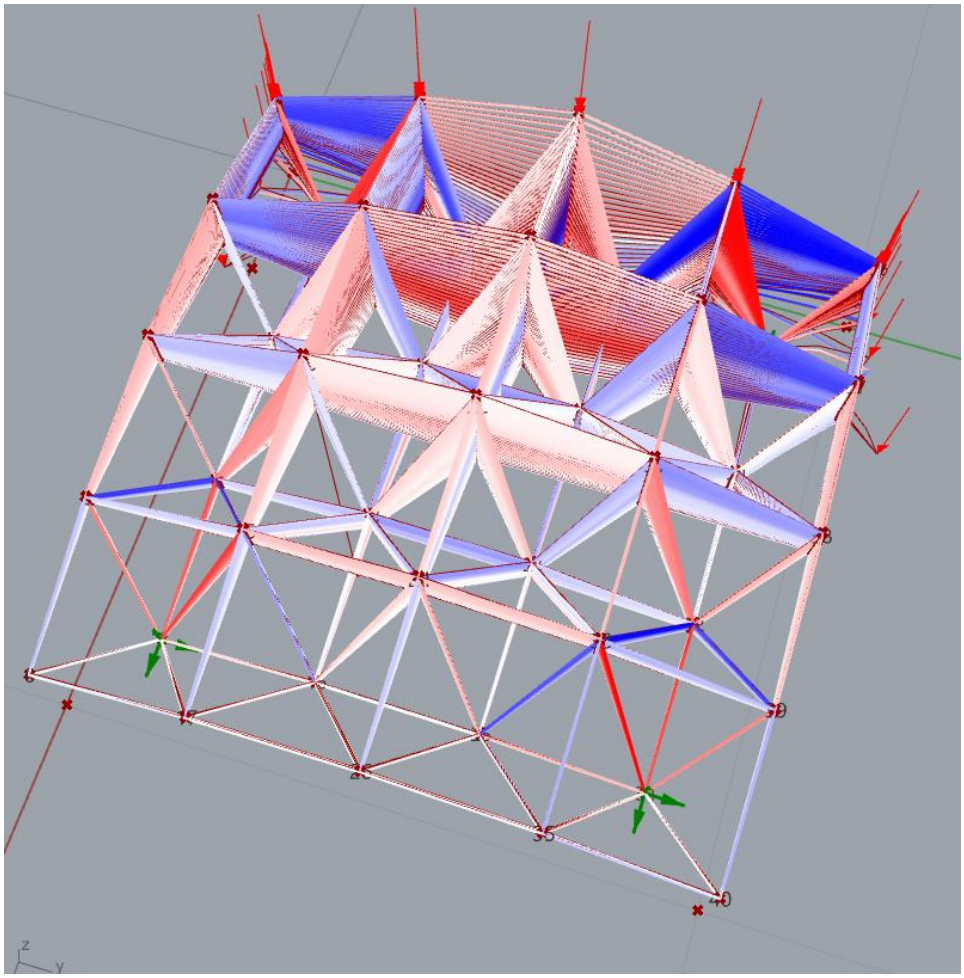
Średnia wartość wzrostu sztywności modelu kratownicy wynosi 28%, a wartości skrajne wahają się od 9% do 57%. Znacznie większy zakres definiują naprężenia, które najczęściej wzrastają przy wzroście skali reakcji modelu, co określa granice wykorzystania zachowań preakcji. Modele te pozwalają na kontrolę strzałki ugięcia, lecz w 3 z 41 przypadków nie umożliwiły redukcji maksymalnych naprężeń. Jedynie model strumieni sił nr 4 w każdym przypadku obciążeniowym redukował naprężenia w stopniu minimalnym lub znaczącym. Nadal jednak dynamika zmian wartości przy małej redukcji naprężeń uniemożliwia zastosowanie samodzielnie modelu zachowań ze względu na naprężenia. Wszystkie pozostałe modele uzyskiwały znacznie mniej stałe wartości naprężeń. W zdecydowanej większości przypadków skrócenie części elementów strukturalnych wymuszało znaczne wydłużenie pozostałych, zlokalizowanych często w otoczeniu podpór tym samym wywołując na nich znaczny wzrost naprężeń.

8.2.5.2 Model cząstkowy nr 1

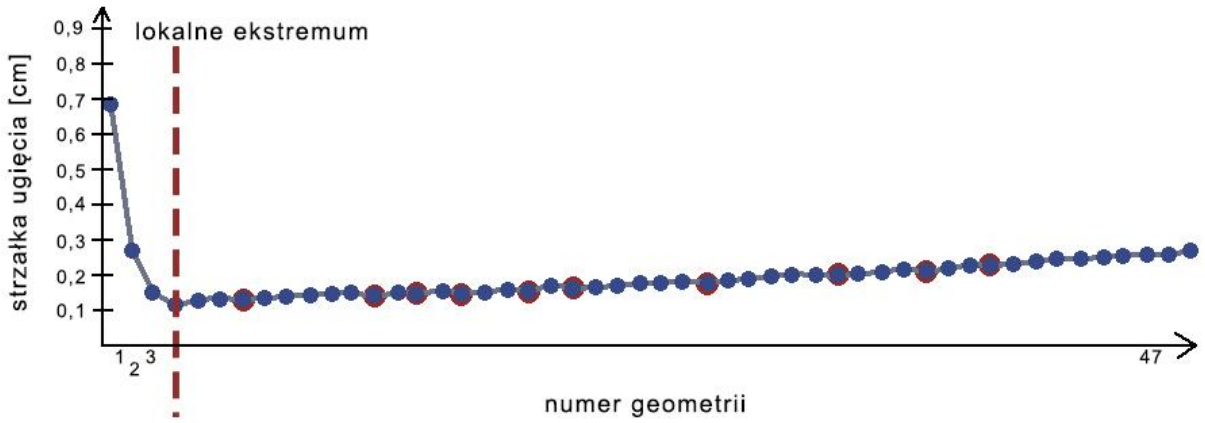
Model nr 1 charakteryzował się małą skutecznością w całkowitym modelu hybrydowym preakcji. W większości przypadków generował najbardziej nieefektywne geometrie. Było to spowodowane wyłącznie wydłużaniem elementów pionowych i ukośnych bez wykorzystywanej w kolejnych modelach redukcji długości prętów. Skutkowało to znacznym zmniejszaniem wytrzymałości szczególnie ukośnych elementów w otoczeniu podpór. Przenosiły one znaczne naprężenia przekierowując główny rozkład sił z górnego pasma na dolne, w efekcie znacząco podnosząc maksymalne naprężenia. Elementy takie występowały w każdej geometrii modelu 1 przy obciążeniach powierzchniowych, szczególnie przypadków od 1 do 10, lecz jednocześnie elementów o znacznie przekroczonej nośności pozostawało mało. Wszystkie pozostałe pręty spełniały warunki skutecznego przenoszenia sił co oznacza niejednolitą pracę struktury, w której wyraźnie odznaczają się elementy narażone na wystąpienie zniszczenia kaskadowego o nagłym charakterze. Rozszerzone badania przypadków obciążeniowych od 1 do 5 pokazały, że kontrolowane usunięcie jednego z przeciążonych elementów nośnych prowadzi do przeciążenia odpowiadającego mu elementu górnego pasma co natychmiastowo wywołuje jego zniszczenie. Prowadzi to do sytuacji utraty stateczności przez strukturę i zamianę ustroju sztywnego w mechanizm.

Na Grafika 63 przedstawiono opisywane zjawisko. Największe naprężenia na sąsiednich względem podpór prętach ukośnych skierowanych do środka ciężkości struktury redukowane są wraz ze wzrostem wartości skali reakcji. Oznacza to, że dla mocno zmodyfikowanych geometrii ujednolicenie naprężeń w strefach rośnie, lecz kosztem bardzo szybkiego wzrostu naprężeń poziomych elementów do nich przystających. Reprezentowane są one poprzez najintensywniej niebieskie linie w modelu. Ich wzrost wartości rozciągania jest znacznie dynamiczniejszy niż redukcja ściskania ukośnych elementów, co prowadzi do wytworzenia się ekstremum lokalnego każdego przypadku.

Wykres wartości strzałki ugięcia odpowiadający geometriom z grafiki został przedstawiony poniżej. Jest on przykładem prostego zakresu doboru geometrii, w którym jedno z ekstremów lokalnych można z dużym prawdopodobieństwem uznać za globalne. Przypadek nr 4, dla którego występuje najniższa wartość, stanowi gotową reakcję w analogicznych przypadkach obciążeniowych przyszłej struktury fizycznej. Na wykresie zaznaczono również szereg innych wartości spełniających kryterium ekstremum lokalnego. Konieczne są więc dodatkowe wymagania nałożone przed przystąpieniem do badania jak maksymalny wysuw siłowników lub maksymalne naprężenia. Model ten uzyskiwał bardzo zróżnicowaną redukcję ugięć. Zawierała się ona w przedziale 11%-51%. Najskuteczniej model reagował w przypadku obciążenia ukośnego biegnącego od centrum struktury do jednej z podpór. Pogłębienie kratownicy w połowie rozpiętości między podporą, a środkiem, zmniejszało krzywiznę dolnego pasma kratownicy lub zmieniało kierunek zakrzywienia co wpływało na wzrost sztywności. Z kolei największy spadek odnotowywano dla sekwencji obciążeń symulujących ruch użytkownika. Co najmniej 2-krotny wzrost ugięć oraz 10-krotny wzrost naprężeń czynił model wysoce nieefektywnym dla wszelkich przypadków obciążeń punktowych. Najczęściej, gdy najmniej efektywnym był model nr 1, najwyższym spadkiem ugięć charakteryzował się model 3. Zależność ta wystąpiła w 68% przypadków. Model najlepiej działa w przypadkach obciążeń wywołujących znaczne skręcanie. Wysoka skuteczność modelu pogłębianego zauważalna jest w przypadkach nr 5, 12, 15 oraz 16. Zwiększenie lokalne wysokości pozwala na lepszą dystrybucję naprężeń, szczególnie przez pręty ukośne co wiąże się z zależnością przedstawioną wcześniej na Grafika 63.



Grafika 63.Zestawienie wyników geometrycznych reakcji modelu na jeden z przypadków obciążeniowych wraz z graficzną reprezentacją naprężeń policzonych z użyciem MES.



Grafika 64.Wykres zależności wartości strzałki ugięcia od stopnia intensywności reakcji modelu. Zauważalne jest jedno wyraźne ekstremum globalne oraz szereg ekstremów lokalnych wpływających na trudność uzyskiwania najefektywniejszych wyników poszukiwania geometrii z użyciem algorytmu ewolucyjnego.

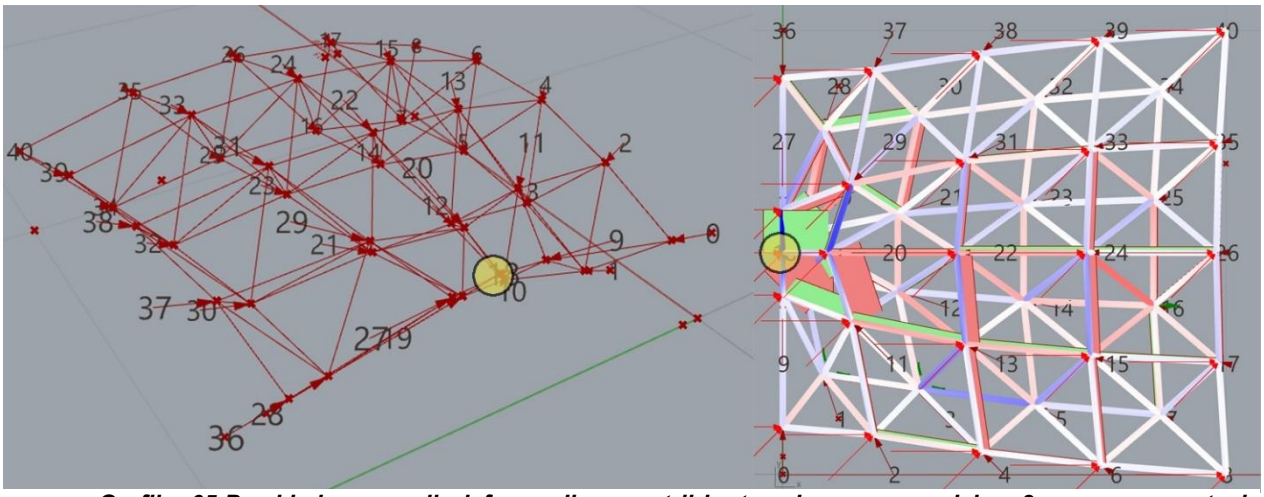
8.2.5.3 Model cząstkowy nr 2

Model nr 2 stanowił najefektywniejszą odpowiedź systemu w najmniejszej liczbie przypadków. Jednocześnie dla zdecydowanej większości przypadków obciążeniowych wykazywała największy spadek efektywności. Dla modelu jednocześnie wzrastały wartości ugięć i naprężeń. Zachowywał on proporcjonalny wzrost we wszystkich przypadkach odmiennie od pozostałych modeli. Agregacja punktów dla modelu modyfikowała geometrię zbyt intensywnie. Model najczęściej blokował efektywność poprzez dużą różnicę długości elementów nośnych w jednym przypadku oraz zbyt małą modyfikację w sąsiednim. Efektywność wzrastała wyłącznie w przypadkach, gdy model agregował punkty wzdłuż jednej z krawędzi. Przypadki 1, 14 oraz 41 dla których agregacja następowała na linii krawędzi pozwalały na znaczny wzrost sztywności. Zjawisko to występowało ponieważ na linii między punktem przyłożenia atraktora, a przeciwległymi podporami odległość była wystarczająco duża, aby redystrybuować naprężenia prętami najbliższymi od zlokalizowanych w otoczeniu prostej łączącej.

Jednocześnie model zachowuje największą stałość sztywności dla zróżnicowanych przypadków obciążeniowych. Cecha ta pozostaje istotna ze względu na łatwość zapewnienia bezpiecznych reakcji dla dużej grupy zróżnicowanych obciążeń jednocześnie. W celu określenia skali tempa zmian naprężeń i ugięć podczas stopniowej zmiany kierunku i punktu obciążenia przeprowadzono dodatkowe badanie. Każdy z modeli obciążono ponownie przypadkami nr 20-29. Dla każdego modelu badanie powtórzono 5 razy. Każda seria pomiarów odbywała się dla zablokowanego w jednym miejscu atraktora reakcji co oznacza, że podczas wszystkich 10 przypadków reagowała jedna geometria wynikowa. Badanie miało na celu określenie zakresów naprężeń i ugięć jakie uzyskane zostaną przez modele podczas stopniowego oddalania punktu obciążenia od punktu reakcji symulując opóźnienie w reakcji struktury oraz w celu wyznaczenia najbardziej uniwersalnych reakcji. W wyniku badania uzyskano dane potwierdzające, że dla modelu nr 2 wartości obu kluczowych parametrów zmieniają się w 2,4 raza mniejszym zakresie niż w przypadku pozostałych modeli. Oznacza to konieczność stworzenia znacznie mniejszej bazy gotowych reakcji dla modelu zachowań korzystającego z uczenia maszynowego w przypadku autonomicznych struktur responsywnych co ułatwia sterowanie fizycznym modelem. Duża skuteczność zachowania efektywności mimo ciągłych zmian obciążeń tłumaczona jest dużym zakresem agregacji punktów. Poprzez zaprogramowanie opcji dostosowania zakresu z jakiego dla danej siły agregowane są węzły, uzyskano możliwość sterowania pośrednio precyzją reakcji oraz jej uniwersalnością. Jeśli wartość zasięgu pozostaje duża, nawet przesunięcie obciążenia na sąsiedni węzeł nie skutkuje wyprowadzeniem obciążenia ze strefy wpływów modelu. Obciążenie nadal znajduje się w zakresie agregacji. Dopiero jedno z kolejnych przesunięć

przemieszcza zbyt daleko, lecz spadek efektywności następuje dużo później niż w przypadku innych modeli. Zjawisko to nie jest zauważalne dla modelu nr 1 ponieważ największe usztywnienie następuje w miejscu przegięcia krzywizny modelu. Oznacza to, że uzyskanie stożkowej dynamicznej geometrii w miejscu przyłożenia siły jest znacznie efektywniejsze od samego zwiększenia wysokości kratownicy. Wniosek ten prowadzi do stwierdzenia, że dla struktur dużych i wielkoskalowych reakcja agregacji o odpowiednio dużym zasięgu pozwoli na najstabilniejsze zabezpieczenie struktury na punktowe przypadki obciążeniowe. Skala niweluje szybkość reakcji systemu. Właściwa problematyka skalowania wymaga analizy zmian zachowań wraz ze wzrostem skali, przed przystąpieniem do badań wielkoskalowych. Obserwację tą należy przebadać w osobnych badaniach dla różnych sposobów definiowania zakresów atraktorów.

Dla większości przypadków obciążeniowych największe naprężenia dla geometrii generowanych modelem nr 2 występowały dla prętów najbliższych punktowi przyłożenia sił. Żaden rodzaj naprężeń nie dominował w ustrojach. Porówno było prętów o największym obciążeniu siłami rozciągającymi oraz ściskającymi. Dalej siły te rozdzielane były między kolejne pręty nie wywołując większych naprężeń. W kierunku dalszych podpór rozdzielane były one bardzo płynnie i regularnie na kolejne elementy strukturalne. Najbliższe przyłożonym siłom podpory przenosiły największe siły, lecz nieproporcjonalnie małe w stosunku do odległości od punktu wystąpienia siły.



Grafika 65.Przykładowy wynik deformacji geometrii kratownicy przez model nr 2 wraz z prezentacją wykresów naprężeń dla poszczególnych prętów. Zauważalne są główne kierunki przenoszenia naprężeń w stronę wszystkich podpór modelu. Im bardziej linia łącząca punkt przyłożenia siły z podporą pokrywała się z układem prętów, tym większy wzrost efektywności model wykazywał.

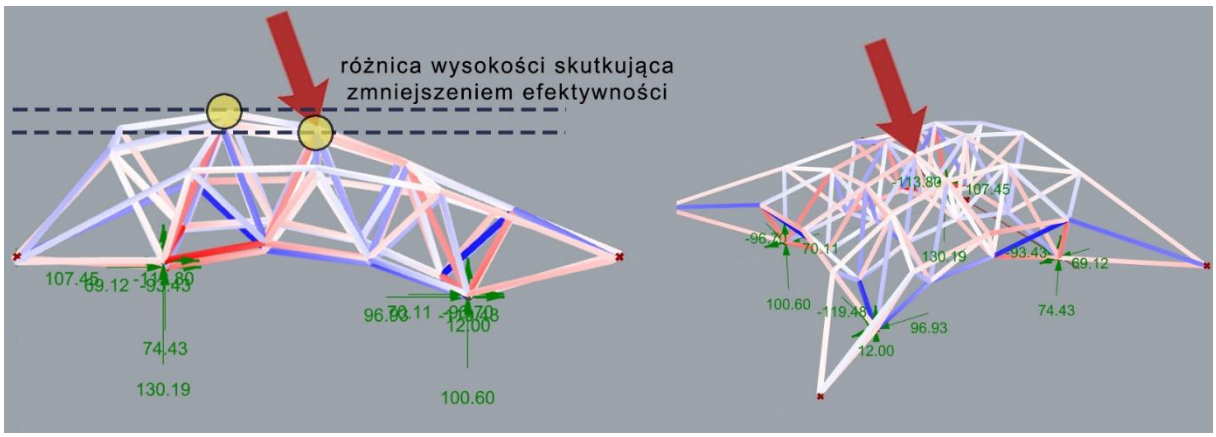
8.2.5.4 Model cząstkowy nr 3

Model nr 3 oparty o poszukiwanie form z użyciem zachowań membran naprężanych generował wyniki zdecydowanie najefektywniejsze dla przypadków obciążenia symulującego ruch użytkownika. Identyfikując podobne wartości skali reakcji jako odpowiadające minimalnym ruchom, wywoływał znaczną redukcję naprężeń. Ważną cechą pozostaje stałość maksymalnych osiągniętych wartości strzałki ugięcia. Wzrastały one w nieznacznym stopniu, nie generując zagrożenia przekroczenia dopuszczalnych wartości. Zakres ugięć uzyskanych przez model był 2,6 raza mniejszy niż dla drugiego najstabilniejszego modelu nr 2. Problematyka znacznie większego wzrostu naprężeń związana jest ściśle z niedokładnością generowania odpowiedzi geometrycznej. Model zyskuje na redukcji wszystkich parametrów, gdy punkt przyłożenia siły zewnętrznej jest jednocześnie najwyższym węzłem wysuniętym ze struktury w kierunku ku górze. Wysunięcie to jak określono wcześniej powinno odbywać się przed przyłożeniem siły w celu zmniejszenia zapotrzebowania na energię dla ruchu przemieszczenia węzła i siły. W przypadku modelu bazującego na zachowaniu membrany sterowanie samą skalą reakcji jest niewystarczające ponieważ prowadzi do uzyskania opływowej geometrii czułej na ugięcia. Redukcja krzywizny, występująca dodatkowo z

nieprecyzyjną odpowiedzią geometryczną, objawiającą się poprzez maksymalne wysunięcie w osi Z węzła innego niż obciążony. W takiej sytuacji siła znajduje się na zboczu deformacji, a nie jej wierzchołku, co dodatkowo redukuje korzystny aspekt reakcji. Wzrost efektywności poprzez taką miejscową deformację określić można poprzez „zjawisko stożka". Możliwa jest kompensacja takiego zjawiska poprzez iteracyjny dobór ostatecznej wartości reakcji, prowadzący do kilkukrotnej zmiany pośredniej geometrii, lecz działanie takie przeczy idei preakcji uzyskiwanych każdorazowo w sposób natychmiastowy.

Pogłębione badania z użyciem iteracyjnego modelu przeprowadzono w ramach badań maksymalizacji skuteczności modelu membranowego. W tym celu ponownie obciążono 5 przypadkami obciążeniowymi model i dobierano ręcznie wartości reakcji. Wybrane do badania przypadki stanowiły układy 6-10 przedstawione na Grafika 66. Poza skalą reakcji operowano również skalą kierunku wektora odpowiedzialnego za deformację membrany będącej referencyjną powłoką dla rozpięcia kratownicy. W wyniku badania uzyskano za każdym razem lepszy wynik odpowiedzi geometrycznej. Średnio redukcja ta wynosiła 12%, a maksymalnie 26%. Dla każdego przypadku wynik ostateczny uzyskiwano po przebadaniu maksymalnie 50 geometrii. Badanie wskazuje na zasadność dalszych badań nad matematyczną formułą operującą skalą reakcji modelu bazującego na zachowaniu membrany w zależności od kierunku, punktu przyłożenia i wartości siły obciążenia.

Wartości wyższe skali reakcji w całym badaniu zauważano dla obciążeń punktowych. Szczególnie przypadki nr 23-26 oraz badanie nr 30. Wartości te determinują bardziej dynamiczną geometrię wykorzystującą zjawisko stożka. Wartości reakcji często przekraczają górne 60% zakresu reakcji. Z kolei dla obciążeń powierzchniowych lub częściowo powierzchniowych wyniki najsztywniejszych form bazują na niskich wartościach skali reakcji, nie osiągających 30% zakresu wartości. Na Grafika 66 przedstawiono zjawisko wierzchołka. W przypadku dostosowania geometrii tak, aby punkt przyłożenia siły zlokalizowany był w najwyższym punkcie struktury redukcja naprężeń wyniosłaby 16%, a maksymalne ugięcie spadłoby o 14%



Grafika 66.Przykladowy wynik geometrycznej modyfikacji kratownicy wraz z przedstawionym problemem skali reakcji wpływającym na nieefektywną proporcję wysokości poszczególnych węzłów modelu.

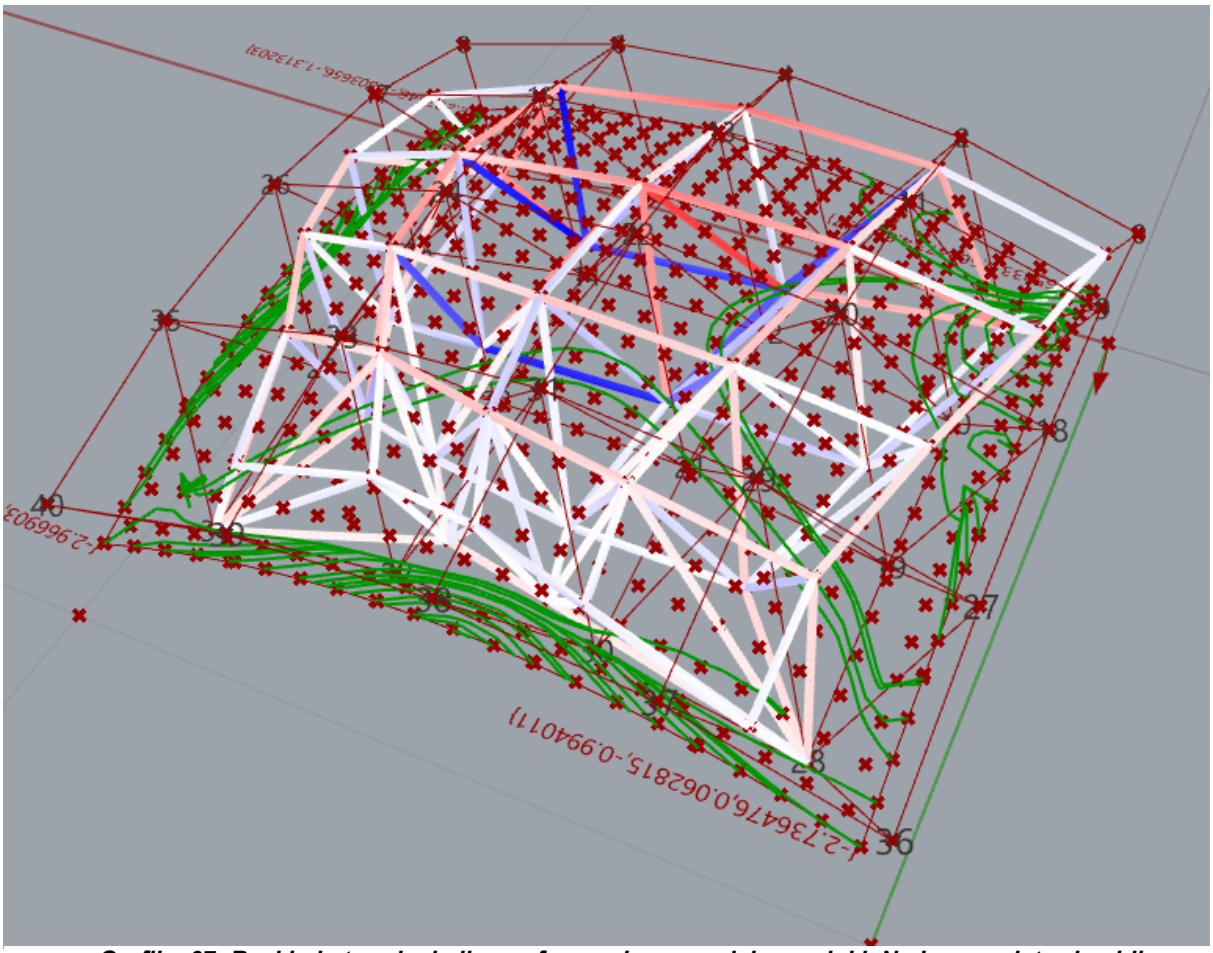
Model ma tendencję do lokalizowania prętów o dużej różnicy długości we wzajemnym ścisłym sąsiedztwie. W przeciwieństwie do wcześniejszych modeli nie jest on oparty o funkcję stopniowej zmiany długości prętów. Ich długość jest wynikową zmian sterującej nią geometrii. Oznacza to, że nie istnieje żadne ograniczenie w funkcji modyfikacyjnej. Jedynie zewnętrzny algorytm dla każdej geometrii samodzielnie sprawdza maksymalne proporcje długości elementów uzyskanych względem referencyjnych. Problem jest zauważalny szczególnie dla geometrii nr 18-20, gdzie proporcje długości prętów wynoszą ponad 5,0 dochodząc do 15,0. W każdym przypadku najdłuższymi pozostają pręty górnego pasma nad podporami. Każdorazowo na nich indukowane byłyby największe naprężenia. Przyjmowałyby one

charakter ściskania co dodatkowo wpływałoby na bezpieczeństwo struktury. Przeniesienie wszystkich podpór pod pasmo dolne zgodnie z układem z Grafika 66 zapobiega niekorzystnemu wpływowi obecności przedłużonych prętów. Zgodnie z rozkładem naprężeń przedstawionych na grafice przenoszą one częściowo duże naprężenia, lecz każdorazowo są one poddawane wyłącznie rozciąganiu. Zmiana ta wpływa dodatkowo korzystnie na rozkład naprężeń na strukturze. W standardowej kratownicy referencyjnej siły rozciągające przenoszone są dolnym pasmem, natomiast ściskające górnym. Przeniesienie podpór odwraca charakter naprężeń czyniąc dolne pasmo zdominowanym przez siły ściskające, jednocześnie przenosząc rozciąganie w kierunku górnych elementów strukturalnych. Dolne elementy pozostają znacznie krótsze, co zwiększa ich wytrzymałość na wyboczenia, poprawiając skuteczność generowania efektywnych geometrii i w konsekwencji zmniejszając szansę uzyskania zniszczenia nagłego, niesygnalizowanego.

8.2.5.5 Model cząstkowy nr 4

Model nr 4 charakteryzujący się największym udziałem wśród efektywnych geometrii generuje formy, które do analizy wymagają kontekstu w postaci wykresu strumieni sił. Model nie tworzy prostych zależności geometrycznych, jak gradacja wielkości kolejnych modułów kwadratowych w pasmach górnym i dolnym dla pośrednich ruchów. Stopniowa zmiana długości sąsiednich siłowników w wynikowych geometriach tworzy układy pozornie chaotyczne, jednak geometrie końcowe charakteryzują się dużą homogenizacją naprężeń ze względu na równoległość do odpowiadających im strumieni. W mniejszej liczbie przypadków prowadzi to do uzyskania odpowiednio dużej redukcji strzałki ugięcia. Model skutecznie generuje odpowiedzi na obciążenia ukośne. 62% przypadków sił przyłożonych pod kątem względem osi pionowej najskuteczniej było kompensowanych przez model nr 4. Ze względu na prostą manipulację wyłącznie jednym parametrem skali reakcji uzyskane wyniki znajdują się w otoczeniu wartości optymalnej dla modelu. Odwrotnie niż dla wcześniejszych modeli skala reakcji maleje wraz ze wzrostem wartości sumarycznej sił przyłożonych do modelu. Wynika to z wcześniej opisanej tendencji dużej pozornej chaotyczności układu elementów przestrzennych przy reakcjach wykorzystujących do 60% zakresu reakcji. Dlatego też zdecydowana większość reakcji jest spolaryzowana między minimum oraz maksimum skali. Wzrost skali wymusza zwiększenie długości translacji każdego węzła. To z kolei prowadzi w konsekwencji do dużego nakładu energetycznego, potrzebnego do ruchu modelu. Problem widoczny jest jednak wyłącznie przy skrajnych reakcjach, które stanowią pomijalną część odpowiedzi geometrycznych. W większości przypadków model odpowiada na podobne obciążenia bardzo podobnym układem prętów charakteryzując się dużą stałością uzyskiwanych form.

Maksymalna różnica długości prętów w badaniu dla opisywanego modelu wyniosła 3,73, a średnio 2,03 co pozostaje najlepszym wynikiem spośród badanych modeli. Parametr ten wpływa na trudność operowania zmianami geometrii i ma bezpośrednie przełożenie na trudności wykonawcze i koszty przygotowania elementów przestrzennych na potrzeby złożenia modelu.



Grafika 67. Rozkład strumieni sił na referencyjnym modelu powłoki. Na jego podstawie obliczana jest deformacja kratownicy. Wynik deformacji przedstawiony jest wraz z graficznym wynikiem rozkładu naprężeń na grafice.

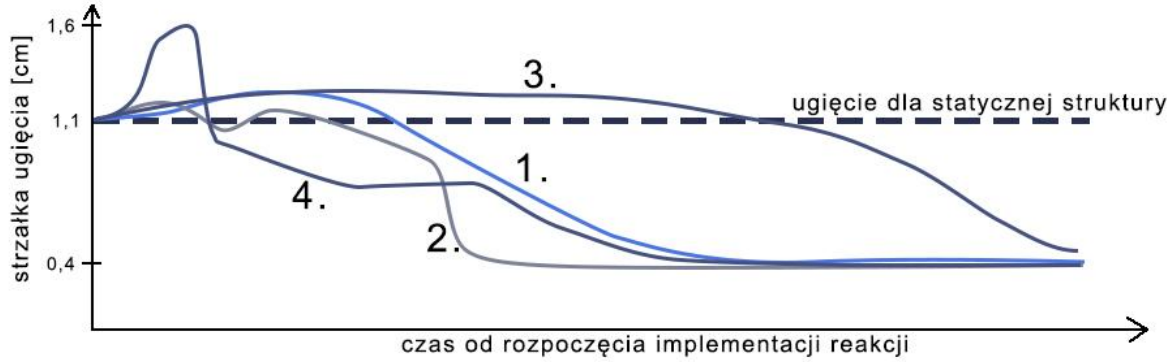
Niską efektywnością charakteryzowały się przypadki dla których siły zewnętrzne przyłożone były na krawędziach modelu. Krawędź pozostaje najbardziej podatną częścią struktury , która wymaga reakcji analogicznej do modelu bazującego na membranie. Model strumieni sił generuje nieefektywne geometrie ze względu na niekorzystne trasowanie strumieni sił. Na Grafika 67 przedstawiono problematykę zagadnienia. Siły przyłożone na krawędzi wywołują strumienie silnie równoległe do krawędzi. To czyni zewnętrzne węzły struktury wyraźnymi atraktorami dla pozostałych węzłów. W konsekwencji struktura wydłuża centralne pręty, przerzedza układ węzłów w środku modelu agregując je wzdłuż najsilniej naprężonych krawędzi. Te z kolei pozostają najbardziej wypłaszczonymi strefami struktury. Zakrzywienie modelu rośnie wraz z przybliżaniem się do jego centrum. Krawędź o małym zakrzywieniu ma niską skuteczność redukcji naprężeń, a zdecydowaną większość obciążeń przenosi centralna część struktury. Co widoczne jest na grafice w otoczeniu środka ciężkości elementu znajdują się najmocniej wytężone elementy przestrzenne. Głównym naprężeniem jest jednak rozciąganie, które dominuje pomimo silnie ściskających sił zewnętrznych. Naprężenia ściskające charakteryzują się małymi wartościami, co korzystnie wpływa na stateczność struktury i bezpieczeństwo sygnalizowania stanów przeciążenia zewnętrznymi obciążeniami.

8.2.5.6 Wyniki zmian naprężeń i ugięć modeli podczas ruchów pośrednich między geometriami docelowymi

Dotychczasowe badania preakcji skupione były na uzyskaniu ostatecznych geometrii o wymaganych cechach. Szybka reakcja jest kluczowa, lecz wymusza również szybką zmianę geometrii modelu. Przejście między aktualną formą struktury oraz nową, wymuszoną przez zmianę przypadku obciążeniowego stanowi zagadnienie nietrywialne, wymagające dokładnych badań. Zmiana w dłuższym zakresie czasu, powodowana zmianami reologicznymi materiału, czego przykładem jest beton, może być w łatwy sposób kontrolowana i mierzona w czasie rzeczywistym. Dynamika zmian nie wymaga stałego monitorowania, lecz regularnej diagnostyki i konserwacji. Wraz ze zwiększeniem tempa zmian sił wewnątrz oraz z zewnątrz struktury należy zakładać spadek przewidywalności jej skutków. Większość struktur responsywnych desygnowana jest do przenoszenia obciążeń zmiennych długookresowych, quasi stałych lub stałych [68], [74], [89]. Większe tempo zmian wymaga systemów predykcyjnych oraz systemów preakcji. Podczas badania na przypadkach obciążeniowych 23-31 analizie poddawano skwantyfikowany proces obciążania kolejnych węzłów, symulując precyzyjnie dynamikę zmian geometrii podczas ruchu użytkownika.

Badanie to stanowi odpowiedź na wyraźną potrzebę prowadzenia badań w tematyce kontroli procesu ruchu responsywnej architektury bez wprowadzania uproszczenia analizy do ostatecznych geometrii. Badanie nadal jednak w pełni nie oddaje stopnia złożoności zagadnienia. Ruchowi podlega jedynie struktura. Jednocześnie występują skokowe zmiany wartości obciążeń. Konieczne do uzyskania satysfakcjonującego poziomu zgodności z fizycznymi strukturami jest prowadzenie badań w oparciu o płynność zmian form, przyspieszeń, wartości sił, ich kierunku oraz wprowadzenie w systemowy sposób niedokładności i możliwości ich wpływu na wyniki. Na cele badania wprowadzono jedynie płynną zmianę geometrii, w celu naświetlenia głównych problemów jakie pomijane są podczas całkowitej dyskretyzacji. Nadal jednak, nawet wśród niewystarczającej zapotrzebowaniu grupie prac badawczych na temat ruchu pomijane są kwestie związane z całościowym spojrzeniem na strukturę. Opracowania jak [94] skupiają się na wyekstrahowanych przypadkach fragmentów struktur. Dla struktury statycznej bardzo trudnym jest modelowanie odpowiadających fizycznemu modelowi warunków brzegowych. Problem ulega pogłębieniu dla struktury ruchomej, szczególnie gdy uwzględniona zostanie dokładna zmienność obciążeń zachowująca ciągłość w całym procesie. Dynamika zmian wszystkich oddziaływań możliwa jest do zbadania na satysfakcjonującym poziomie jedynie przy uwzględnieniu w badaniu pełnoskalowego samodzielnego modelu.

Na Grafika 68 przedstawiono w formie wykresu wyniki pomiarów ugięć podczas zmian geometrii między kolejnymi formami wynikowymi.

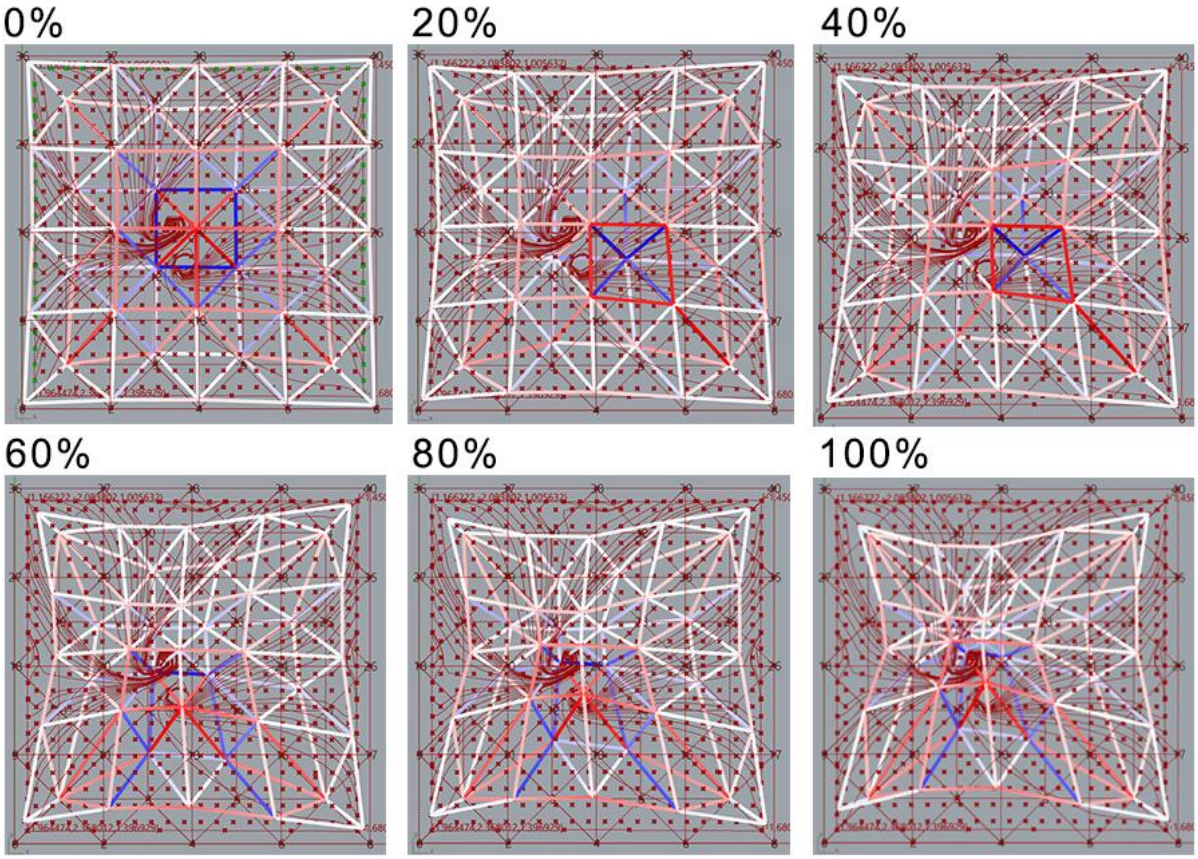


Grafika 68.Wykresy zmian wartości ugięć podczas ruchów pośrednich dl a wszystkich modeli. Zauważalne jest, że wszystkie modele przekraczają chwilowo maksymalne naprężenia referencyjnej struktury statycznej.

Przedstawiono na nim reakcje wszystkich 4 modeli podczas zmiany układu węzłów oraz prętów. W celu zamodelowania zjawiska przygotowano odpowiedni model w oprogramowaniu Grasshopper. Wykorzystując nakładkę programową ***„Pufferfish”*** stanowiącą rozszerzenie modułu podstawowego programu uzyskano 30 geometrii pośrednich każdego z modeli. Dla wszystkich modeli przeanalizowano wartości ugięć. Założono, że określona liczba geometrii pośrednich jest wystarczająca dla uzyskania informacji o wszystkich zmianach tendencji wzrostu lub spadku strzałki ugięcia podczas pojedynczego procesu liniowej zmiany geometrii. Podczas analizy nie uwzględniono czasu potrzebnego na przeprowadzenie obliczeń. Zestawienie zbiera informacje wyłącznie dotyczące procesu fizycznej zmiany geometrii. Cały zakres ruchów oszacowano jako równy dla wykresu 3,5s przy uwzględnieniu przeciętnej prędkości ruchu pojedynczego siłownika jako równej 15mm/s.

Wykres przedstawia złożoność problematyki ruchów pośrednich. W żadnym przypadku zmiana nie następowała w sposób liniowy lub skokowy, redukujący strzałkę ugięcia. Każdy model reagował w indywidualny sposób i w różnym czasie. Dla uzyskania odniesienia do przypadków statycznych oznaczono jak hipotetycznie zachowałaby się struktura statyczna we wszystkich elementach strukturalnych. Jej wartość ugięcia pozostaje referencyjna i wskazuje na dużą trudność realizacji ruchu w modelach. Początkowa wartość ugięcia wszystkich modeli jest jednakowa i w każdym przypadku rośnie ona natychmiast po rozpoczęciu procesu modyfikacji. Wraz z rozpoczęciem zmiany geometrii i redukcji długości jednych siłowników, wysunięciu podlegają pozostałe. Utrata regularności siatki kwadratowej pasma górnego i dolnego w pierwszej fazie realizacji ruchu zawsze dominuje ponad synchronizowaną redukcją długości w miejscach kluczowych struktury. Wywołuje to wzrost naprężeń oraz strzałki ugięcia. Oznacza to, że model wymaga większego nakładu energii na redukcję ugięcia powstałego w wyniku ruchu oraz równoważenia w ruchu większych naprężeń. Wzrost jest nieznaczny i dla większości przypadków zamyka się w wartości 8%, lecz dla sporadycznych przypadków dochodzi do 14%. Wzrost ten jest chwilowy i zależnie od modelu trwa od 1s do 2s. Czas ten nie wykazuje zależności od rodzaju obciążenia lub lokalizacji punktu przyłożenia siły. Przekroczenie naprężeń najczęściej występuje na prętach najszybciej teleskopowanych, co w znacznej większości przypadków oznacza elementy przynależne do podpór. Widoczne jest podobieństwo zmian wartości ugięcia między modelem nr 1 oraz nr 3, lecz różna pozostaje skala czasu. Jest ona ściśle związana liczbą zmian pośrednich jakie model musi wykonać w celu przeprowadzenia pełnej zmiany geometrii. Model nr 1 oferuje prostą modyfikację, efektywną pod względem użycia energii, lecz oferującą małą redukcję naprężeń i ugięć. Model nr 3 wykonuje modyfikację wykorzystującą w podobnym stopniu ruch we wszystkich 3 kierunkach przestrzennych, co oznacza, ze ruch będzie wykonywany również w kierunku niekorzystnym z punktu widzenia kąta półpełnego siły zewnętrznej względem części siłowników. Opisywana sytuacja odnosi się do konieczności wypchnięcia węzła obciążonego siłą pionową zwróconą w dół. Wypchnięcie to działa przeciwnie do kierunku zwrotu siły przeciwdziałając jednocześnie przyłożonej sile oraz grawitacji. Model ten wymaga znacznych nakładów energetycznych, wymuszanych znaczną różnicą wysuwów między kolejnymi reakcjami. Model nr 2 ma charakterystyczny przebieg wykresu ze względu na często występujący w strukturze przypadek reakcji pozornej. Widoczne na wykresie ekstremum lokalne osiągane w początkowej fazie ruchu dla wszystkich przebadanych przypadków znajdowało się w ścisłym otoczeniu wartości referencyjnej. Najczęściej pierwsze 4-6 geometrii pośrednich uzyskiwało liniowy spadek ugięć by na kolejne 3-5 geometrii tendencja uległa odwróceniu. Zjawisko to miało swoje odbicie w wykresach zmian efektywności dla różnych skal reakcji. Ponadto w ostatniej fazie struktura charakteryzowała się dużą czułością zauważalną w stromym zboczu funkcji ugięć przed jej całkowitym wypłaszczeniem. Jest to model pozwalający na najszybsze uzyskanie geometrii w czasie do 1,5s, lecz dla fizycznej struktury zakłada się wydłużenie czasu ze względu na czułość modelu i konieczność podniesienia precyzji kosztem szybkości reakcji. Zauważono, że wykres zachowuje się symetrycznie przy dalszym wzroście wartości reakcji, czyli przy dalszej agregacji węzłów. Szybki wzrost ugięć powodowany jest zbyt ścisłym sąsiedztwem węzłów, które nie zachowują odpowiednio dużych kątów między sobą. Model nr 4 z kolei ze względu na liczbę

najefektywniejszych geometrii najbardziej wpływowy spośród badanych ma najbardziej nieregularny przebieg. Jest to wynikiem sposobu dostosowywania geometrii. Model natychmiast traci powtarzalność modułów kwadratowych. Są one deformowane, lecz w pierwszej kolejności w sposób pozornie chaotyczny. Pierwsze kilka geometrii maksymalnie do 40% całkowitej deformacji nie zachowuje kierunków, ani proporcji ostatecznej struktury. Dla nowego przypadku obciążeniowego model odpowiada w sposób pozornie niezrozumiały. Dopiero w ostatnich 30% ruchu klaruje się forma odpowiedzi. Zdecydowana większość prętów układa się zgodnie z rozkładem strumieni sił, a rozkład sił wewnętrznych upodabnia się do niego. Oczekiwane główne trasowania naprężeń zaczynają występować po przeprowadzeniu średnio 80% transformacji. Wszystkie wcześniejsze spadki naprężeń powodowane są losowym czynnikiem chwilowej zgodności modelu w dowolnym fragmencie z przebiegiem strumieni sił. Oznacza to, że chwilowe nagłe zmniejszenie naprężeń i ugięć występuje, gdy co najmniej kilka prętów ma układ równoległy do strumieni na wirtualnym modelu powłoki. Na Grafika 69 przedstawiono w skróconej formie przebieg zmian modelu między geometrią referencyjną oraz docelową. Mimo iż w pierwszej fazie do 20% ruchu moduły wyglądają na podobne, pojawiają się wśród nich minimalne fluktuacje zauważalne szczególnie przy analizie rozkładu naprężeń i minimalnych różnicach wartości. Widoczne jest również początkowe skupienie naprężeń dominujących w centralnej części modelu. Wraz ze spadkiem ich wartości oraz redukcją strzałki ugięcia pula najmocniej wytężonych prętów rośnie, zwiększając równomierność rozkładu naprężeń. Zmianie ulega jednocześnie charakter naprężeń na ukośnych elementach. W początkowej fazie dominuje wśród nich ściskanie, by w miarę postępu modyfikacji ustępować dominującym naprężeniom rozciągającym.

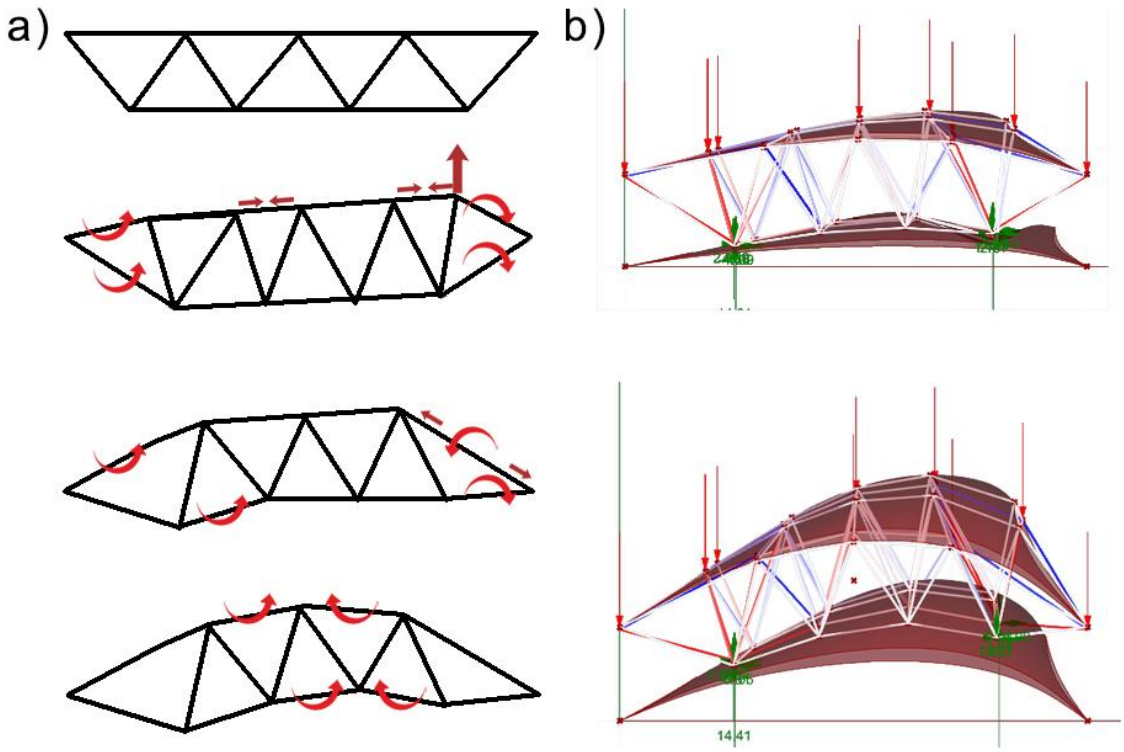


Grafika 69. Kolejne fazy zmiany geometrii struktury sterowanej modelem nr 4 między geometrią referencyjną, a docelową. Zauważalne są znaczne zmiany układu naprężeń wymagające pogłębionej analizy statycznej.

Modele 1, 2 oraz 3 ze względu na stosunkowo spokojny przebieg zmian geometrii przy minimalnej nadmiarowości materiałowej przekroju struktury nie wymagają nadzoru podczas ruchu, ani analizy trasowania modyfikacji geometrii, co oznacza, że model może zmieniać geometrię w sposób liniowy. Z kolei dla modelu nr 4 konieczne jest opracowanie analizy ruchu i systemu jej trasowania polegającego na doborze nieliniowej zmiany geometrii, pozwalającej na uniknięcie fluktuacji wartości ugięć oraz naprężeń.

8.2.5.7 Wyniki ruchu modelu operowanego dynamicznymi relaksacjami wraz z koncepcją podniesienia efektywności jego pracy

Wszystkie modele pozwalają na prostą modyfikację między kolejnymi geometriami. Oznacza to, że algorytm liniowego podziału ruchu zastosowany dla każdego siłownika pozwala na uzyskanie płynnej zmiany geometrii. Konieczna jest jednak pełna synchronizacja wszystkich aktuatorów. Możliwa jest również segmentacja ruchów w sposób zaburzający liniowe przejście między geometriami, lecz wymaga ono osobnej analizy. Jego celowość może być argumentowana redukcją skokowej wartości naprężeń podczas zmiany formy struktury lub redukcją energii potrzebnej na zmianę. Drugi przypadek stanowi przykład dalszej optymalizacji modelu, lecz jego zastosowanie może być efektywne dla modelu nr 3. Zachowanie na podstawie ruchów membrany znacząco podwyższa strukturę jednocześnie zwiększając jej krzywiznę szczególnie w paśmie górnym. To z kolei wymusza szereg ruchów siłowników w kierunku pionowym o zwrocie w górę. Energia potrzebna do takiego ruchu jest znacząca, ponieważ zależy od biernego obciążenia węzła przemieszczanego. Korzystnym jest więc przejście między geometriami rozdzielić na fazy, pozwalające na pominięcie ruchów pionowych. Począwszy od zewnętrznych modułów kratownicy należy zakrzywiać model fragmentarycznie do uzyskania lokalnie docelowej krzywizny. Następnie można kolejno postępować analogicznie z coraz bardziej centralnymi pierścieniami modułów. Model dzięki



Grafika 70."a)"przykład modelu stosującego sekwencjonowanie ruchu podczas zmiany geometrii. "b)"zmiana geometrii modelu podczas prostej transformacji między kolejnymi geometriami. Model sekwencjonowany uzyskuje znaczną redukcję naprężeń podczas ruchu względem modelu referencyjnego.

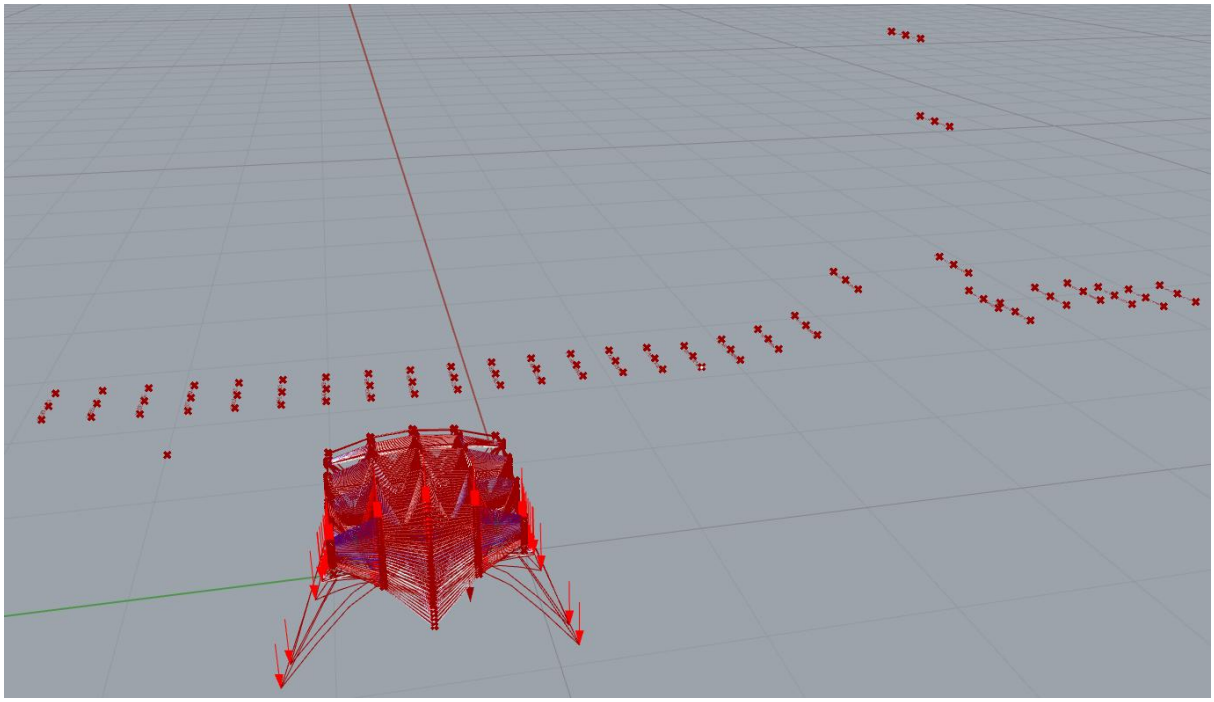
takiemu prowadzeniu procesu zmiany geometrii pośrednimi geometriami i stopniowemu podnoszeniu nawiązuje do sposobu wznoszenia struktur opracowanego przez Mamoru Kawaguchi dla struktur nazywanych Pantadomes[183]. Mimo iż ich przeznaczeniem było podniesienie bezpieczeństwa realizacji większości konstrukcji na niewielkich wysokościach oraz redukcja kosztów pochłanianych przez specjalistyczne urządzenia oraz rusztowania to metoda tworzenia ramienia obrotu kolejnych coraz mniejszych fragmentów struktury jest analogiczna do idei ruchów pośrednich responsywnej struktury może służyć również do redukcji energii kinetycznej potrzebnej do zmiany geometrii modelu między kolejnymi przypadkami obciążeniowymi.

Na Grafika 70 przedstawiono przykładowy model zachowania struktury sterowanej ruchem membrany. „b)" prezentuje sytuację ruchu liniowego gdzie w prosty sposób dokonuje się transformacja wszystkich siłowników i węzłów. Model ten wykorzystuje znaczne zasoby energii czyniąc responsywność mniej efektywną. Przykład ruchu przedstawiony w części „a)" cechuje się minimalizacją ruchu w kierunku pionowym i równoległością kierunków przemieszczeń prętów względem największych sił zewnętrznych obciążeń. Model ten zużywa mniej zasobów, lecz wymaga więcej czasu obliczeniowego oraz potrzebnego na realizację ruchu. Zmiana geometrii odbywa się sekwencjami, począwszy od zewnętrznych prętów miarowo poruszając coraz bardziej centralne pręty. Finalnie oba modele uzyskują identyczną geometrię. Każdy sposób ruchu pozwala na pełny zakres uzyskiwanych form, lecz podczas ruchu sekwencjonowanego występuje znacznie więcej fluktuacji ugięć, niż w modelu o liniowym ruchu. To wymusza użycie modelu predykcji, który rozbija poszczególne sekwencje na cząstkowe zmiany geometrii i kolejno bada ich stateczność symulując z wyprzedzeniem zachowania modelu fizycznego.

8.2.5.8 Wyniki czasu obliczeniowego w zależności od rodzaju obciążenia oraz tendencje uzyskiwanych geometrii

Dla każdego przypadku obciążeniowego każdy model potrzebował zawsze takiego samego czasu na przeliczenie reakcji. Kolejno dla modelu nr 1 było to 2,3s, dla modelu nr 2 1,9s, dla modelu nr 3 3,6s oraz dla modelu strumieni sił 3,4s. Stopień złożoności przypadków nie wpływał na czas obliczeniowy. Oznacza to, że pod względem czasu reakcji wszystkie modele spełniały wymagania im stawiane. Sumarycznie wraz ze średnim czasem potrzebnym na przeprowadzenie procesu fizycznej zmiany geometrii najszybsze reakcje pozwala uzyskać model nr 2. Wartość ta jest równa 5,2s. Z kolei najwolniej uzyskiwana jest w uśrednieniu reakcja modelu nr 3 wymagająca do 9,3s na reakcję. Obie wartości są porównywalne co oznacza, że wszystkie modele mogą współpracować w celu tworzenia modelu hybrydowych zachowań.

Odnotowywalne jest, że dla dużych wartości skali reakcji uzyskiwane są znaczne wartości naprężeń. Najczęściej modele najefektywniejsze zawierają się w przedziale do 40% całkowitego zakresu badanych reakcji. Ze względu jednak na dużą łatwość zdefiniowania ekstremów lokalnych funkcji naprężeń oraz ugięć, zakresy badań wszystkich modeli uznaje się za odpowiednie. Pozwoliły one na wybór pojedynczej, najodpowiedniejszej odpowiedzi w każdym przypadku obciążeniowym dla każdego modelu oraz identyfikację w jakich granicach racjonalne pozostaje badanie reakcji. Na Grafika 71 widoczny jest zestaw 30 geometrii jednocześnie badanych dla modelu zachowań nr 1 w przypadku obciążeniowym nr 17. Na pierwszym planie widoczne są wszystkie modele, natomiast na drugim wartości funkcji wzrostu naprężeń przy wzroście wartości skali reakcji modelu. Widoczny jest skokowy wzrost wartości dla przypadków nr 29-35 dla których wyniósł on do 390% początkowej wartości. Za pikiem wartości wszystkie reprezentowane przez wyniki geometrie dalej przyjmują znacząco niekorzystne wartości. Cały efektywny zakres badania zamykał się więc w wartościach przypadków od 0 do 24. Zdolność algorytmu do wstępnej oceny analogicznej skuteczności mogłaby pozwolić na dodatkowe przyspieszenie reakcji. Algorytm jednak nie posiada funkcji doboru zakresu efektywnych poszukiwań formy co wymusza każdorazowe poszukiwanie w pełnym zakresie minimum 30 geometrii.



Grafika 71. 50 kolejnych geometrii modelu nr 1 wraz z wykresem wartości ugięć dla każdej badanej formy kratownicy.

Na grafice widoczne są głównie skrajne geometrie podlegające deformacji. Widoczny jest ich stopień ugięcia, znacznie wykraczający poza dopuszczalne wartości. Geometrie te, odpowiadają przytoczonemu wcześniej zakresowi 29-35 przypadków obciążeniowych, pomijanych przez algorytm ze względu na przekroczenie dopuszczalnej proporcji długości najdłuższych do najkrótszych elementów strukturalnych.

8.2.5.9 Wyniki zachowania poziomu sprawności struktury podczas kontrolowanego losowo sterowanego usuwania pojedynczych elementów nośnych

Podczas badań bezpieczeństwa uzyskiwanych geometrii dobrano 5 jednakowo zlokalizowanych prętów, które usuwane były pojedynczo ze struktury, w celu określenia bezpieczeństwa jej obciążania i zapobiegania wystąpieniu kaskadowego zniszczenia przy lokalnym przeciążeniu. W pierwszym badaniu usuwany był najbardziej wytężony pręt. Najczęściej stanowił on jeden z elementów połączonych z podporą. W wyniku jego usunięcia redystrybucji ulegały naprężenia w całej strukturze. Modele nr 1 oraz 2 pozwalały na zachowanie najmniejszych wartości ugięć. Mimo początkowo niskich wartości redukcji ugięć charakteryzowały się geometrią znacznie stabilniejszą na usunięcia prętów. W przypadku obu modeli ich regularność geometryczna uzyskiwana dla każdego przypadku obciążeniowego pozwalała na dobrą redystrybucję naprężeń w przypadku usunięcia kluczowego elementu modelu. Modele nr 3 oraz 4 z kolei silnie indywidualizowane geometrycznie, znacznie słabiej kompensowały zjawisko kontrolowanego zniszczenia jednego z elementów. Ich duży wzrost ugięć najczęściej miał związek z usunięciem jedynego elementu jaki w danej części struktury odpowiadał za przenoszenie równoległych do niego strumieni sił. To z kolei powodowało nieefektywną redystrybucję znacznie większych naprężeń. W każdym z badanych przypadków zniszczenie znacznie podnosiło ugięcia i naprężenia, lecz jedynie w przypadku 3 ostatnich prób obciążeniowych modele nr 3 oraz 4 prowadziły do sytuacji utraty stateczności, poprzez wystąpienie obrotu na jednym z węzłów sąsiednich do podpór, w wyniku czego model struktury stawał się mechanizmem. Modele 1 oraz 2 spełniają więc kryteria zabezpieczenia struktury w sytuacji wyjątkowej. To wymusza stworzenie bardziej złożonego modelu preakcji który osobno dobiera najefektywniejsze geometrie, lecz jednocześnie oblicza symulacje zniszczenia najbardziej wytężonego w danym

przypadku elementu. Wraz ze zmianą najmocniej wytężonego pręta powinno nastąpić ponowne przeliczenie symulacji stanu przeciążenia oraz dobór geometrii zapasowej. Oznacza to konieczność wyszukiwania dwóch istotnych form przestrzennych. Obie reakcji mogą nie być geometrycznie podobne ze względu na przedstawioną zależność. Czas przejścia między obiema geometriami również powinien być czynnikiem branym pod uwagę, ponieważ wzrost różnic w formach jest zbieżny ze wzrostem czasu potrzebnego na realizację ruchu przez układy fizyczne.

8.2.5.10 Wnioski z badań zachowań modeli

Wszystkie modele zachowań w wyniku deformacji struktury referencyjnej wywołują utratę wszystkich osi symetrii modelu. Staje się on znacznie bardziej złożony tak w symulacji jak i realizacji. Zastąpienie regularnych komórek kwadratowych górnego oraz dolnego pasma prętów nieregularnymi czworokątnymi układami generuje trudność zapewnienia bezpieczeństwa użytkowania modelu, poprzez zróżnicowane działanie pod wpływem nie tylko niesymetrycznych obciążeń, lecz również symetrycznych układów sił na niesymetryczny model. Dalsze badania mogą skupić się na wprowadzeniu preakcji zachowującej symetryczność struktury, która jak przedstawiono w badaniach struktur z użyciem algorytmu dynamicznych relaksacji, w celu obliczania geometrii przyniosła pozytywne skutki w wartościach poszukiwanych parametrów. Symetria ta znacznie zmniejszy pulę dostępnych zachowań reakcji, umożliwiając prostsze tworzenie gotowych predefiniowanych odpowiedzi geometrycznych, bez konieczności użycia modeli o niepełnej pewności reakcji.

Działanie modelu opartego na strumieniu sił propagowanym przez prof. Zalewskiego mimo znacznego zróżnicowania wynikowych form każdorazowo generuje struktury o podobnych tendencjach rozkładu węzłów. Wszystkie strumienie sił zbiegają się w podporach, co stanowi podstawową zasadę rozkładu strumieni. To implikuje zagęszczenie strumieni w otoczeniu podpór. Węzły podporowe wykluczone są z analizy i dla nich nie jest liczony współczynnik przyciągania, lecz dla sąsiednich węzłów wartości przyciągania uzyskują każdorazowo wysokie wyniki. Odwrotna sytuacja ma miejsce wzdłuż krawędzi, gdzie nie występują strumienie. Struktura więc przyjmuje postać rozpiętej na narożach oraz znacznie cofniętej na krawędziach. Przyjmowaną przez nią formę zewnętrzną przyrównać można do struktury membranowej, której krawędzie ulegają deformacji pod wpływem ciśnienia na powłoce materiału. Z kolei rozkład węzłów ma charakter silnie nieregularny o dużej deformacji kwadratowych komórek do różnobocznych czworokątów. Komórki po obwodzie struktury w każdym przypadku pozostają większe, niż elementy wewnętrzne. Rozkład strumieni sił przebiega w każdym wypadku przez środek lub jego otoczenie co wpływa na zmniejszenie rozmiarów komórek. Procesowi w nierównym stopniu podlegają elementy dolnego oraz górnego pasa. Zauważa się zdecydowanie gęstszy układ strumieni w górnej części struktury, co wymusza przemieszczenia dolnych węzłów w ich kierunku skutkując zmniejszeniem grubości kratownicy. Wywołuje to redukcję sztywności i w każdym zbadanym przypadku obciążeniowym redukuje efektywność zmiany geometrii struktury.

8.3 Badania zachowań struktur podczas realizacji ruchów pośrednich

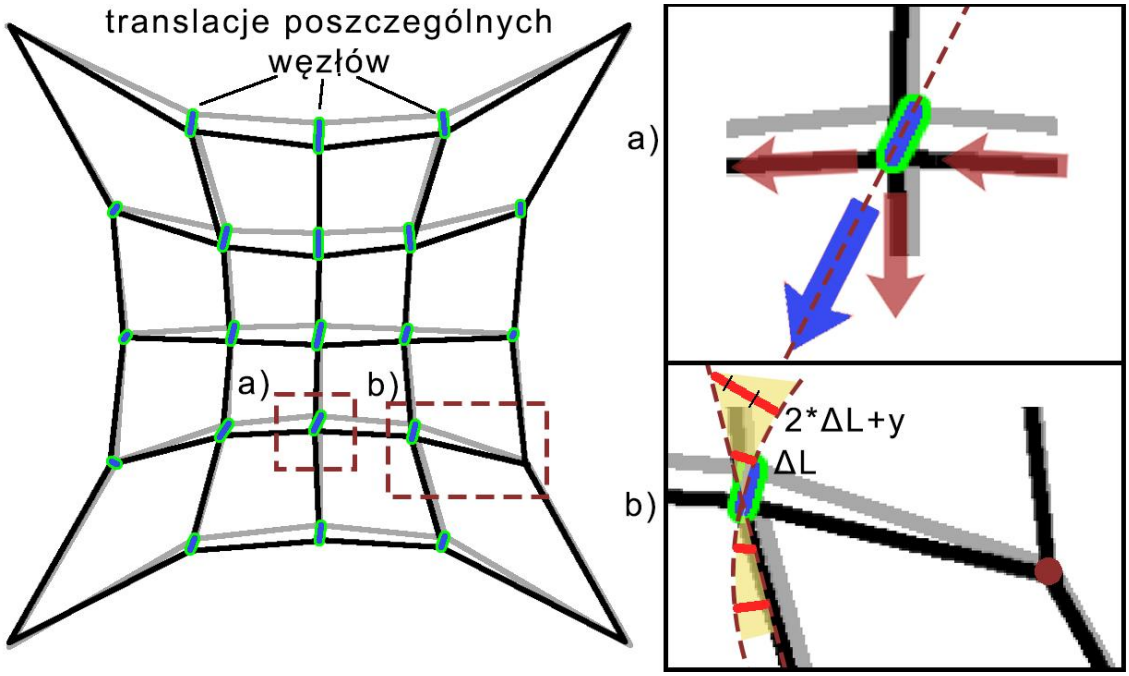
8.3.1 Teoria ruchów pośrednich w oparciu o wyniki badań wstępnych

Opisane w poprzednim badaniu ruchy pośrednie struktury stanowią bardzo ważne i dotychczas niewystarczająco opisane zagadnienie. Określono już, że dla części modeli zachowań preakcji nieefektywne jest trasowanie liniowej zmiany geometrii, ze względu na skoki wartości strzałki ugięcia. Określono też, że odpowiedzią na niekorzystne zjawisko może być sekwencjonowana lub nieliniowa zmiana części ruchu lub całej jego ścieżki. Dotychczas skupiano się wyłącznie na badaniach geometrii wynikowych, pomijając problematykę pojedynczego siłownika. W licznych badaniach zwracana jest uwaga na wymóg tak znacznego uproszczenia ruchu[69], lecz nieliczne opracowania podejmują się opisu zjawisk fizycznych podczas ruchu całościowego modelu w ujęciu wyekstrahowanego fragmentu. Opracowania jak [95] poruszają tematykę, lecz dla wypreparowanych zagadnień i fragmentów modelu. Wymusza to znajomość i odtworzenie warunków brzegowych, które dla ruchu struktury pozostają niezwykle dynamiczne i trudne do symulowania. Ponownie analogię można odnieść do dziedziny, w której znacznie wcześniej zaimplementowano dokładne badania ruchu, ujmujące pojedyncze elementy fizyczne. Opracowania mechatroniczne [184] dla robotów responsywnych topologicznie pozostają jedną z najbliższych architekturze dziedzin. Proces realizacji ruchu jest w nich poruszany w stopniu równym lub wyższym niż pozostałe kluczowe zagadnienia. W mechatronice dopuszczalne jest jednak chwilowe kontrolowane przeciążanie modeli [184], które ze względu na problematykę skali nie jest dopuszczalne w architekturze. Jak wykazano we wcześniejszych badaniach ma ono miejsce, a kompensacja jego skutków może odbywać się poprzez analizę i planowanie tras ruchu między geometriami. W celu przeprowadzenia wstępnych badań efektywności trasowania ruchu opracowano model w oprogramowaniu Grasshopper.

Idea trasowania ruchów modeli oparta jest na twierdzeniu, że ruch między każdymi dwiema geometriami docelowymi można sprowadzić do liniowych zmian pośrednich, nazywanych sub-moves będących kolejnymi geometriami charakteryzującymi się ważonym uśrednieniem geometrycznym wszystkich elementów składowych modelu. Oznacza to, że mając geometrię A, z której model ma zostać zmodyfikowany do geometrii B, należy podzielić ruch ma odpowiednią liczbę mniejszych ruchów, stanowiących cząstkowe kamienie milowe transformacji. Mogą być oznaczone jako procentowy postęp transformacji: A-B(20%), A-B(40%), A-B(60%) oraz A-B(80%). Geometrie te nazwane zostały w pracy ***„sub-moves”***. Wartość w nawiasie informuje o procentowym postępie zmiany długości każdego siłownika. Oznacza to, że gdy struktura znajduje się w pozycji A-B(60%) każdy siłownik zmienił swoją długość w kierunku długości docelowej o co najmniej 60%. Przykładowy ruch miedzy wysuwem A-1,2m a wymaganym w geometrii B-0,9m wyniósłby $1{,}2 + (0{,}9 - 1{,}2) * 0{,}6 = 1{,}02[m]$. Oznacza to, że wartość w nawiasie odnosi się do długości, nie uwzględniając nakładu energetycznego, który może być znacząco różny od prostej translacji. Sub-moves stanowią jednak wyłącznie uproszczenie. Aby spełniać w sposób absolutny opisaną zasadę należy poruszać węzłami wyłącznie wzdłuż osi co najmniej dwóch sąsiednich siłowników oraz prostopadle do wszystkich pozostałych o ile te poruszają się jednostajnie wraz z węzłem co przedstawiono na Grafika 72. Jest to znaczące ograniczenie motoryki uniemożliwiające realizację zdecydowanej większości uzyskiwanych w toku badań geometrii. Jest więc ono nieakceptowalne. Proponowane są dwa niezależne rozwiązania. Pierwszym jest opracowanie formuł ruchu precyzyjnego każdego z siłowników. Dla każdego węzła formuła przyjmuje indywidualną postać i determinuje jego indywidualny sposób ruchu. To jednak oznacza, że każdy pręt zależny jest zawsze od dwóch sąsiednich prętów o niezależnych od siebie formułach ruchu, które z niezerową szansą wymuszą ruch poza skalą szybkości lub zasięgu wysuwu. Przekroczenie to może być kompensowane przez sąsiednie węzły poprzez

wspomaganie ruchu i dostosowanie własnej trajektorii translacji redukującej wymaganą szybkość ruchu sąsiednich siłowników lub poprzez spowolnienie ruchu całego modelu tak, aby narażony na najdynamiczniejsze zmiany aktuator mieścił się w zakresie dopuszczalnych wartości szybkości i teleskopowania. Oznacza to, że model pozostaje tak responsywny jak jego najwolniejszy element.

8.3.2 Idea „sub-moves" jako redukcji wpływu niekontrolowanych ruchów pośrednich na statykę struktur responsywnych



Grafika 72. Schematyczne przedstawienie złożoności ruchu modelu kratownicy, w którym wszystkie elementy nośne pozostają ruchome. Teoria ruchu i nieliniowej pracy siłowników.

Na Grafika 72 przedstawiono trudności zachowania liniowej zmiany długości siłowników podczas ruchu. Na głównej grafice z lewej strony przedstawiony jest ruch między dwoma kolejnymi geometriami. Kolorem niebieskim przedstawiono translacje wszystkich węzłów. Odnotowywalne jest, że każdy węzeł ma wektor zmiany skierowany w innym kierunku co determinuje złożony nieliniowy ruch poszczególnych siłowników. W celu określenia maksymalnego tempa zmian geometrii należy znaleźć dwa sąsiednie węzły, których wektory są najbardziej różne co oznacza najwyższą różnicę działania składania dwóch wektorów. Odejmowaniu podlegają wyłącznie wektory wzajemnie sąsiednie co znacznie zmniejsza liczbę kombinacji koniecznej do przeanalizowania dla wszystkich przypadków jednocześnie.

Grafika „a)" prezentuje rozkład wektora translacji na pręty biorące udział w przemieszczaniu. Pręt schodzący do węzła od góry stanowi odniesienie, co stanowi o jego zamocowaniu nieprzesuwnym względem węzła. Pozostałe pręty podlegają przemieszczeniu poprzez wydłużenie. Może być ono liniowe, wyłącznie gdy układ jest ortogonalny, a pręty prawy oraz lewy przemieszczają się współosiowo, natomiast dolny pręt jednocześnie na obu końcach przemieszczany jest identycznym wektorem prostopadle do osi wyznaczonej przez dwa poziome pręty na wspólnym węźle. Taki liniowy ruch pojedynczego siłownika jednak wymusza nieliniowy ruch obrotowy kolejnych 2 prętów sąsiednich.

Najczęstszym jednak przypadkiem jest sytuacja przedstawiona na grafice „b)". Dla uproszczenia sytuacji określono przemieszczenie prawego węzła jako zerowe. To oznacza, że pręt przemieszczany jest po okręgu zataczając kołową trajektorię przemieszczenia przeciwległego węzła. Jednocześnie wydłużane i skracane są sąsiednie współwęzłowe

siłowniki. Taki złożony układ w celu przeprowadzenia ruchu w kierunku dowolnym innym, niż liniowy równoległy do średnicy lub stycznej trajektorii w punkcie styku, wymusza nieliniowy proces teleskopowania analizowanego siłownika. Na grafice zaznaczono tę nieliniowość. Wraz ze zmianą dwukrotną odległości na trajektorii kołowej w nieprostej proporcji zwiększa się długość siłownika. Różnica ta mimo, że jest nieznaczna pozostaje kluczowa w kwestii precyzji realizacji ruchu i generowania naprężeń w przypadku uproszczeń pomijających nieliniowość. Ruch ten musi więc być sterowany formułami przyspieszeń ruchu na poszczególnych etapach przejścia między geometriami.

Alternatywnym rozwiązaniem pozostaje uproszczenie ruchu w określonych granicach niedokładności. Przyjmując możliwość ruchu każdego węzła w każdym kierunku możliwe jest dalsze założenie jednoczesnego ruchu wszystkich węzłów liniowo w kierunku docelowym. Na początku każdego ruchu zmiany między geometrią A oraz B określane są wektory translacji, rozkładane na sąsiednie pręty. To definiuje sumaryczne przemieszczenie całego pręta między geometrią A oraz B. Nadal możliwy jest podział ruchu siłowników na sub-moves, lecz liczba pośrednich geometrii jest zależna od nieliniowości ruchu modelu. Im bardziej nieliniowy jest ruch, tym więcej pośrednich geometrii wymaga, ponieważ wzrost liczby sub-moves kwantyfikuje funkcję zmian prędkości do dyskretnych liniowych odcinków o jednakowej szybkości lub jednakowym przyspieszeniu. Wzrost ten pozwala więc na minimalizację naprężeń powstających z uproszczenia ruchu do postaci liniowej, ze względu na coraz mniejszą bezwzględną wartość niedokładności obliczeń. W celu odciążenia jednostki obliczeniowej preferowanym rozwiązaniem powinno być sztywne określenie liczby geometrii pośrednich. Oznacza to dalej, że liczba sub-moves powinna być ściśle związana ze stopniem złożoności geometrycznej oraz topologicznej struktury. Badaniu podlegają jedynie struktury charakteryzujące się istotnymi wszystkimi trzema wymiarami co wyklucza z analizy płaskie i zakrzywione siatki prętowe, które problem niedokładności kompensować mogą chwilową niewspółpłaszczyznowością podczas ruchu na cele kompensacji między aktualną długością danego siłownika, a teoretyczną idealną długością. W takich strukturach dochodzi do chwilowego wyoblenia siatki strukturalnej.

Wykorzystując rozwiązanie wymagające zagęszczenia geometrii pośrednich uproszczeniu ulega analiza predykcyjna naprężeń podczas ruchu. Dynamiczna analiza ze względu na wymagania mocy obliczeniowej może być niemożliwa lub kosztowna w implementacji. Korzystając z geometrii pośrednich wystarczające będzie badanie wszystkich kolejnych sub-moves w sposób statyczny. Zasadne jest założenie, że między dwoma kolejnymi geometriami wystąpi maksymalna możliwa dla danego skoku niedokładność wywołująca naprężenia ściskające lub rozciągające wewnętrzne, które należy dodać do wyniku naprężeń przypadków dyskretnych statycznych. Dla kolejnych geometrii należy badać dynamikę zmian naprężeń wywoływanych siłami zewnętrznymi. Przed rozpoczęciem ruchu fizycznego przebadaniu ulec musi cały proces translacji. Jeśli model wykryje znaczące przeciążenie układu na jednej z geometrii należy przeprowadzić proces przetrasowania translacji, co oznacza konieczność zmiany teoretycznie liniowego ruchu na nieliniowy łamany lub łukowy. Podczas badań symulacyjnych do puli rozwiązań wprowadzono wyłącznie liniowe odcinkowe trasy tworzące krzywe łamane. Dzięki zmianom długości prętów oraz chwilowych naprężeń jednocześnie możliwe jest badanie kosztu energetycznego, w celu realizacji ruchu. Badanie ma pozwolić na ocenę efektywności modelu analizy i doboru trajektorii ruchu elementów strukturalnych miedzy kolejnymi geometriami.

8.3.3 Budowa modelu badawczego sub-moves

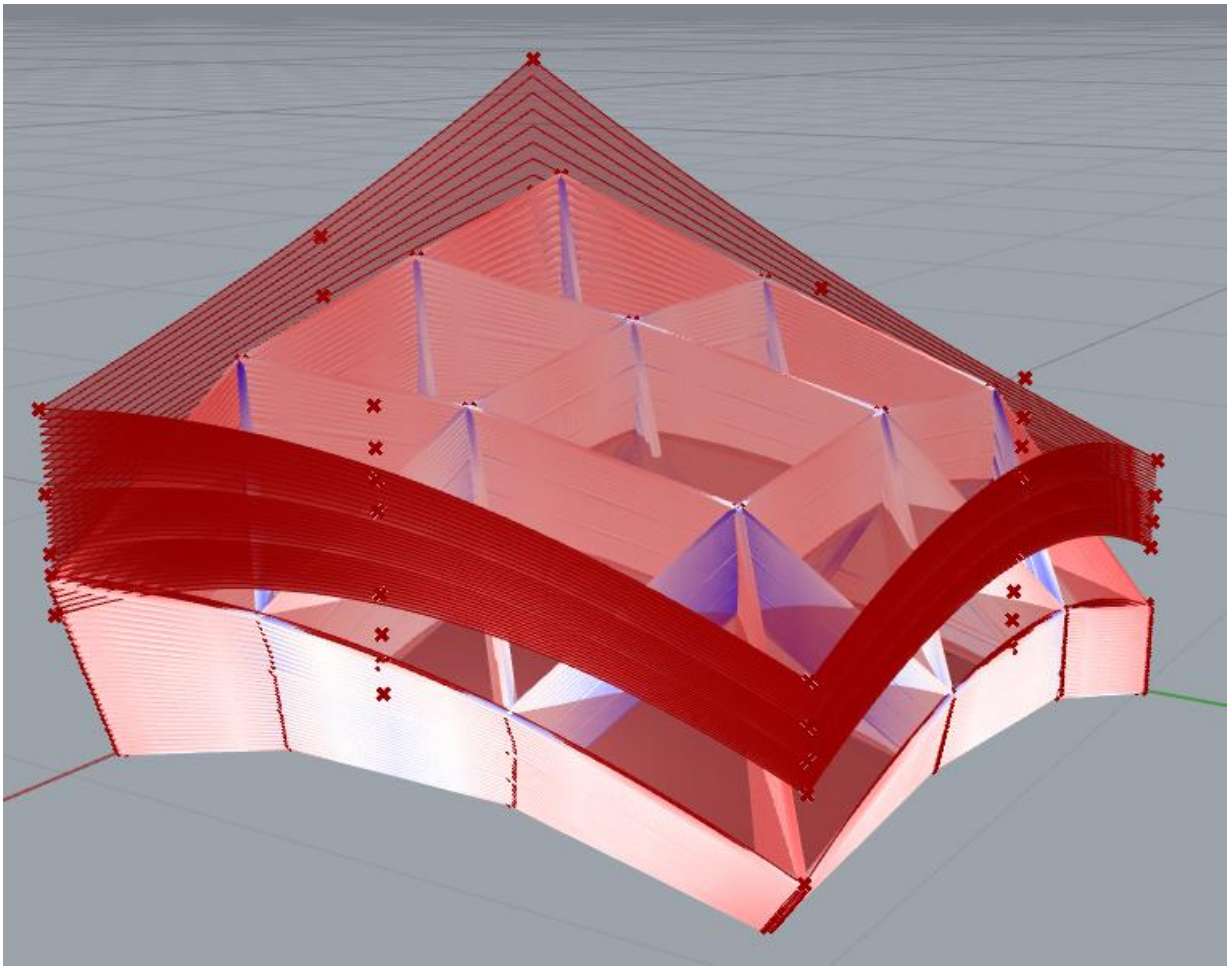
W celu przeprowadzenia badania opracowano model symulacji w oprogramowaniu Grasshopper pozwalający na dobór indywidualnych tras zmian geometrii, ze względu na minimalizację różnych parametrów. Do badań wybrano wykorzystany w poprzednich badaniach kształt przestrzennej kratownicy 16-polowej podpartej w 4 węzłach pasma dolnego. Model składa się z 4 sekwencji niezależnych motorycznie od siebie. Każdy zbudowany jest jako osobny podmodel ruchu. Podmodel składa się z powłoki zamodelowanej jako

„EdgeSurface” na podstawie 4 odcinków tworzących krawędzie. Odcinki te z kolei rozciągnięte są między 4 wierzchołkami stanowiącymi podstawowy element modelu. W celu deformacji modeli krawędzie zamodelowano krzywymi ***„Nurbs”***, dodając dla każdej krawędzi 1 środkowy punkt krzywizny. Pozwala to na tworzenie dowolnych czworokątnych powierzchni jednokrzywiznowych lub wielokrzywiznowych.

Ruch modelu odbywa się jako interpolacja ruchów między dwoma kolejnymi geometriami A oraz B. Obie geometrie zbudowane są w analogiczny do opisanego sposób. Tworzone są przez powłokę, na której następnie rozpięto kratownicę. Kratownica ta ulega takim samym deformacjom jak nadrzędna jej powłoka referencyjna. Oznacza to, że zdefiniowanie geometrii kratownicy jest niebezpośrednie i odbywa się poprzez odkształcanie powłoki. Ruch naroży oraz punktów deformacji krzywych NURBS wpływają na modyfikację kratownicy. W najprostszej formie badań ruchów pośrednich występują wyłącznie dwie geometrie pośrednie. Jest to geometria początkowa oraz końcowa. Interpolacja geometrii między nimi odbywa się z wykorzystaniem modułu ***„Tween Two Surfaces”***, stanowiącym element nakładki programowej ***„Pefferfish”*** do Grasshopper. Moduł ten uśrednia w prosty sposób geometrie, poprzez procentowe przemieszczenie wszystkich węzłów kratownicy na wektorze łączącym obie docelowe geometrie. Podano liczbę iteracji między końcowymi geometriami na równą 10, co oznacza, że moduł samodzielnie tworzy 8 pośrednich geometrii. Niemożliwe jest jednak sterowanie geometriami pośrednimi, co wymusza inną formę podziału ruchu. W tym celu podzielono dodatkowo ruch między punktami A i B na pośrednie ręczne geometrie. Modułem ***„Interpolate”*** zamodelowano dwie pośrednie geometrie dzielące ruch na segmenty 1/3 całkowitego ruchu. Podział następował na wartości całkowite translacji, nie będąc zależnym od procentowego wysuwu siłowników, co oznacza, że uzyskanie 1/3 ostatecznej geometrii nie jest tożsame z przeprowadzeniem 1/3 teleskopowania pręta. Między wszystkimi 4 geometriami A, A’, B’ oraz B przeprowadzono ponownie interpolację geometrii z wykorzystaniem modułu ***„Tween Two Surfaces”***. Sumarycznie uzyskano 3 odcinki ruchu, które stanowią niezależne sekwencje ruchu składające się na przemieszczenie między dwoma kolejnymi geometriami stanowiącymi odpowiedź na zmiany obciążeń zewnętrznych. Model dodatkowo uzupełniono o moduł pomiaru zmian długości poszczególnych prętów. Naraz analizie MES podlegają wszystkie pręty każdej geometrii, których ilość jest równa 2160. Podzielono je na sekwencje liczące równo 72 pręty, grupując je w składowe poszczególnych kratownic. Z każdego zbioru wybierano element o indeksie ***„x”*** co tworzyło zbiór 30 kolejnych iteracji tego samego pręta w kolejnych geometriach pośrednich. Dla każdego z prętów modułem ***„length”*** liczona była długość pręta. W ten sposób tworzono szereg kolejnych wartości długości. On dalej podłączany był do modułu wykresu, prezentując dynamikę zmian długości. Jednocześnie transformowany był do dwóch nietożsamych zbiorów. W pierwszym usuwany był ostatni indeks ostatniej długości pręta. W drugim z kolei usuwaniu podlegał indeks pierwszy. Tak uzyskiwano dwa kolejne 29-elementowe zbiory przy użyciu metody ***„cull index”***. Dla zmodyfikowanych tak zbiorów prowadzono następnie proces obliczania różnicy długości prętów. W tym celu oba zbiory podłączano do modułu kalkulacyjnego ***„substraction”***. W wyniku otrzymywano 29 wartości zmiany długości między kolejnymi ruchami modelu. Dla każdego pręta indywidualnie powielano sekcję modułów, tworząc szereg 30 sekcji obliczeniowych. Każda ostatecznie wybierała z puli wyników wartość największą. Te ponownie były gromadzone w jednej całościowej puli, z której wybierano wartość najwyższą. Wartość ta stanowi informację o maksymalnej szybkości zmian między kolejnymi geometriami pośrednimi.

8.3.4 Aparat analizy danych oraz obsługa systemu

Na Grafika 73 przedstawiono ostateczny model symulacji ruchu. Widoczne są geometrie pośrednie A' oraz B'. Obie są sterowane niezależnie przemieszczeniem punktów węzłowych modelu. Każdy węzeł przemieszczany jest własnym modułem translacji w 3 kierunkach. Modyfikacja pojedynczego węzła zmienia geometrie interpolowane co przekłada się na zmianę rozkładu naprężeń na nich. Każda kolejna geometria badana jest w analizie MES. Parametrami kluczowymi są naprężenia, których wartości jak dowiedziono we wcześniejszym badaniu podlegają fluktuacjom podczas translacji. Sumarycznie model naraz analizuje 28 geometrii i wyznacza maksymalne naprężenia jakie zostały odnotowane w procesie zmiany geometrii. Naprężenia te podlegają minimalizacji z wykorzystaniem algorytmu ewolucyjnego. Wszystkie współrzędne pośrednich geometrii są sterowane przez algorytm,



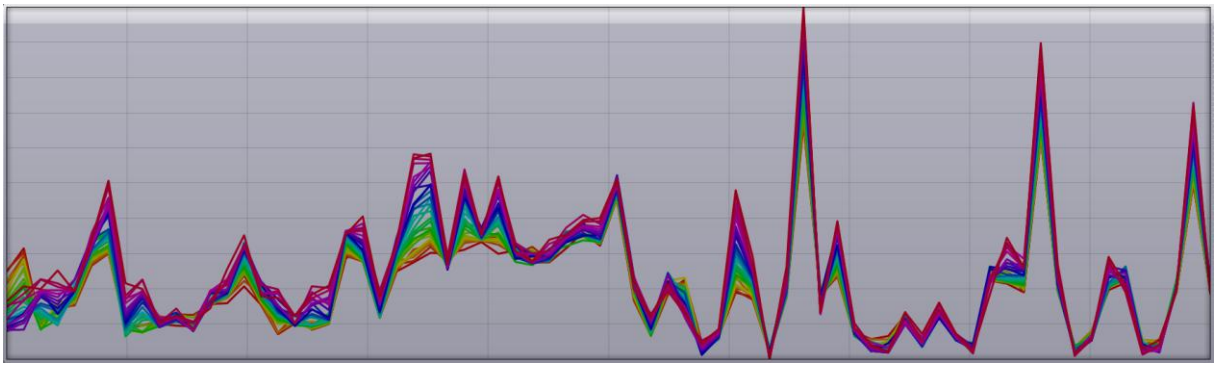
Grafika 73. Model badawczy ruchów pośrednich z płaszczyznami na których rozciągana jest kratownica przestrzenna. Zaznaczone są widoczne punkty geometrii pośrednich sterowanych algorytmem ewolucyjnym.

który dobiera modyfikacje translacji w taki sposób, aby uzyskać możliwie dużą redukcję naprężeń podczas procesu ruchu. W wyniku operacji model redukuje skoki wartości, wyrównując przebieg wykresu naprężeń w czasie transformacji. Algorytm steruje więc wszystkimi 50 węzłami obu geometrii. Maksymalna translacja, w każdej płaszczyźnie, dla każdego węzła wyniosła 0,4m. Warunek ten został wprowadzony poprzez ograniczenie zakresu wartości na suwakach współrzędnych, podłączonych do algorytmu. Wprowadzono również wymóg nieprzekraczalności 30% zmiany długości siłownika co odpowiada sumarycznie 60% zmianie długości stanowiąc wartość porównywalną z fizycznymi siłownikami dostępnymi do realizacji modeli.

Model na cele analizy statycznej w kolejnych stanach przestrzennych zdefiniowano pod względem przekrojów oraz połączeń. Cała struktura ma wymiar krawędzi bocznej 10m i złożona jest z wyłącznie ruchomych prętów, o przekroju pierścieniowym i wymiarach odpowiednio 15cm oraz 14cm dla średnicy zewnętrznej i wewnętrznej. Podpory określono jako nieprzesuwne, obrotowe podobnie jak dla modeli preakcji. Nie określano maksymalnej rotacji na węźle ze względu na brak konieczności, przy wcześniej zdefiniowanych wymaganiach. Geometrię początkową oraz końcową dobrano na podstawie wyników form uzyskanych w badaniu [139] dla analogicznej struktury prętowej. Geometria jest łatwa w odtworzeniu ze względu na identyczny sposób definiowania powłoki, poprzez wierzchołki oraz punkty charakterystyczne NURBS.

Na potrzeby badania przygotowano dwie kolejne geometrie dla których znana jest początkowa oraz końcowa wartość naprężeń. W dotychczasowych badaniach uproszczonych przyjmowano liniową zmianę geometrii oraz naprężeń i ugięć. Badanie pozwoliło ocenić zgodność założeń z sekwencyjną symulacją i wyznaczyć efektywność stosowania trasowania w doborze ścieżki zmian geometrii. Badanie trwało przez 30 minut dla 4 kolejnych geometrii. Wyniki zebrane zostały w tabeli w programie Excel i stanowią załącznik 8.A pracy.

Na potrzeby analizy modeli przygotowano moduł zapisu przebiegu zmian geometrii. Główny wykres umożliwia podgląd zmian długości elementów w całym modelu. Drugi umożliwia wybiórczą wizualizację zmian długości dla jednego elementu przestrzennego w kolejnych 30 geometriach. Na Grafika 74 przedstawiono główny wykres. Różnymi kolorami oznaczono kolejne geometrie. Zakres wartości na wykresie jest każdorazowo dobierany do skrajnych wartości naprężenia poszczególnych przypadków transformacji. Nie definiowano zewnętrznych obciążeń. Wszystkie przypadki obciążeniowe poddawane badaniu stanowią obciążenie ciężarem własnym, przy założeniu typowej wartości przyspieszenia grawitacji. Ze względu na założenie to uproszczeniu ulegają wszystkie stany statyczne, pozwalając na przejrzystą ocenę wzrostu efektywności zmodyfikowanego trasowania ruchu.



Grafika 74. Wykres wszystkich wartości naprężeń stanów pośrednich wszystkich występujących w modelu prętów. Widoczne jest znaczne zróżnicowanie reakcji elementów modelu na zmiany geometrii.

8.3.5 Wyniki badania

Dla 4 kolejnych transformacji przeprowadzono badania redukcji ich parametrów orientując algorytm każdorazowo na pojedynczej wartości. W wyniku pomiarów uzyskano 12 wynikowych zestawień zebranych w Tabela 21. Każdy przypadek ruchu był indywidualny. Ruch każdego z węzłów był indywidualnie analizowany. W trakcie badania stwierdzono szereg zależności. Każde badanie trwało zakładaną długość czasu i pozwoliło na przeanalizowanie 7500 ruchów dla każdego z modeli. Zakres ten stanowił niewspółmiernie długi okres czasu w odniesieniu do maksymalnego czasu reakcji preakcji, liczonej w pojedynczych sekundach. Ostateczne wyniki uzyskiwano po 6-9 minutach, co nadal stanowi pełną barierę przed implementacją algorytmu w fizycznych strukturach, bez znaczącego podniesienia mocy obliczeniowej jednostki centralnej.

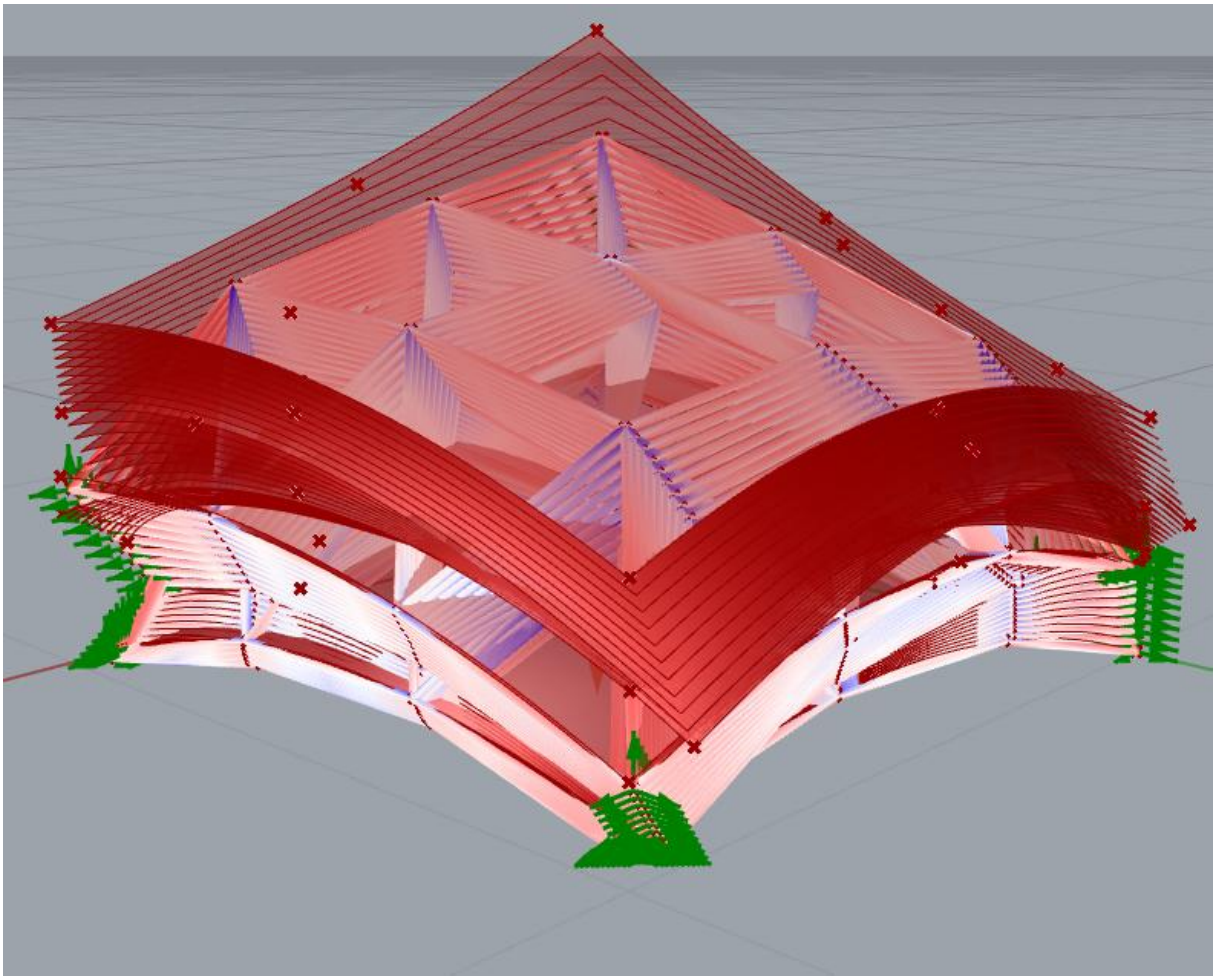
Dla 3 spośród badanych przykładów udało się uzyskać redukcję każdego z analizowanych parametrów. W każdym przypadku wartości redukcji parametru były zbliżone. Dla 1 przypadku nie udało się uzyskać wzrostu efektywności co opisane jest w dalszej części badań. Model uzyskiwał redukcje wartości parametrów w pełni nierównomierny sposób. Początkowe skoki wartości pozwalały na uzyskanie w okresie pierwszych 2-3 minut 70% końcowej efektywności. Tendencja zauważalna była dla modeli nr 1, 2 oraz 4. Dla modelu nr 3 nie stwierdzono zmian wyników mimo pełnej zdolności programu do modyfikacji danych wejściowych.

Tabela 21.Zestawienie wyników badań modyfikacji trasowania zmian geometrii kratownicy. Podczas każdego badania piorytetyzowano podniesienie efektywności pojedynczego parametru.

model	1	2	3	4
model liniowy				
ugięcia [m]	0.108768	0.153556	0.28533	0.276461
naprężenia [% wykorzystania przekroju]	0.174579	0.162192	0.17651	0.166864
maksymalna różnica długości prętów	0.119815	0.513734	0.659164	0.824463
model modyfikowany				
ugięcia [m]	0.099839	0.136155	0.28533	0.276461
naprężenia [% wykorzystania przekroju]	0.160897	0.178792	0.17651	0.166308
maksymalna różnica długości prętów	0.412591	0.49934	0.659164	0.824239
model modyfikowany				
ugięcia [m]	0.126642	0.144386	0.28533	0.276461
naprężenia [% wykorzystania przekroju]	0.156452	0.149008	0.17651	0.166308
maksymalna różnica długości prętów	0.412138	0.703422	0.659164	0.824784
model modyfikowany				
ugięcia [m]	0.10728	0.167116	0.28533	0.276461
naprężenia [% wykorzystania przekroju]	0.174205	0.227779	0.17651	0.185086
maksymalna różnica długości prętów	0.113347	0.461821	0.659164	0.54749

Model nr 1 bazował na transformacji opartej w zdecydowanej większości na zwiększeniu grubości kratownicy oraz zagięciu jednego z naroży. Grafika 75 przedstawia wszystkie pośrednie stany modelu. Zauważalna jest początkowa liniowość zmian, lecz nie oznacza ona płynnej zmiany wartości naprężeń. Modyfikując model w celu minimalizacji naprężeń pośrednich wykorzystano algorytm ewolucyjny, uzyskując 10,4% spadek maksymalnego naprężenia. Jednocześnie znacznej modyfikacji uległa ścieżka zmian geometrii. Modele pośrednie wykorzystywały znaczną część zakresu parametru translacji określonego przy tworzeniu modelu. Średnie przemieszczenie węzłów wyniosło 31 cm z 40cm definiowanych jako graniczna wartość. Maksymalne przemieszczenie 40cm uzyskano dla 3 węzłów co stanowiąc 6% wszystkich węzłów argumentuje poprawny dobór zakresu. Uzyskując redukcję wartości zmianie uległa trajektoria ruchu. Jednocześnie została znacznie wydłużona, co pośrednio zauważalne jest poprzez 4-krotny wzrost maksymalnej różnicy długości między dwoma kolejnymi geometriami pośrednimi. Początkowy wzrost wartości o 1,1cm uległ powiększeniu do 4,1cm. Wskazany największy ruch odbywa się w końcowej fazie transformacji i jest częściowo kompensowany przez początkowo szybsze, niż referencyjne zmiany geometrii pośrednich. Finalnie jednak uzyskiwano ruch wolniejszy o około 20%.

Jednocześnie pewnemu wzrostowi uległa wartość strzałki ugięcia. Wzrost ten równy jest 19%. Z kolei dla modyfikacji ukierunkowanej na zmniejszenie strzałki ugięcia, 9% spadek deformacji towarzyszył redukcji naprężeń, stanowiąc bardzo efektywną odpowiedź systemu. Nadal znacznemu wzrostowi podlegała maksymalna różnica długości między kolejnymi geometriami. Grafika 75 przedstawia skalę zmian w procesie modyfikacji geometrii. Widoczne z lewej strony wcięcie w sekwencji zmian jest wynikiem obliczeń efektywności. Podobnie dla modelu nr 2 przy spadku osobno naprężeń i ugięć o średnio 10% następuje wzrost pozostałych parametrów. Dla modelu tego jednak nastąpił znaczący wzrost obu opisywanych parametrów podczas badania redukcji różnic długości między kolejnymi geometriami pośrednimi. Kosztem przyspieszenia realizacji geometrii rosną o średnio 15-19% strzałka ugięcia oraz maksymalne naprężenia.

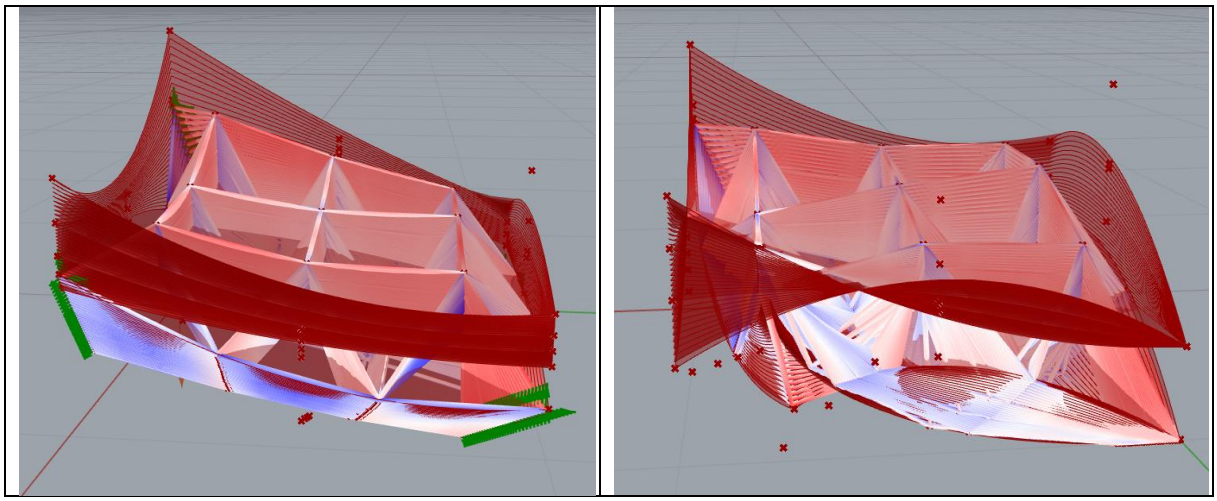


Grafika 75.Wynikowe trasowanie zmian geometrii modelu uwzględniające redukcję naprężeń w stanach pośrednich. Charakteryzuje się znacznie bardziej złożoną trajektorią translacji węzłów, lecz pozostaje opłacalna ze względu na naprężenia maksymalne.

Model nr 3 stanowi przypadek szczególny. Na jego przykładzie prezentowana jest sytuacja, w której w całym procesie transformacji między geometriami A oraz B nie występuje ekstremum lokalnie, w miejscu innym, niż początek lub koniec procesu. W żadnym badaniu nie uzyskano lepszych wyników, ponieważ skrajna geometria B definiuje wszystkie maksymalne wartości i nie podlega ona redukcji. Przypadek obciążeniowy wskazuje, że dla części transformacji nieopłacalne jest wprowadzanie trasowania z użyciem sub-moves. W celu eliminacji z analizy wszystkich analogicznych przypadków, system powinien być wyposażony w algorytm wstępnej oceny, który symulując w pełni liniowy ruch powinien przebadać wszystkich pośrednie geometrie, określając obecność ekstremum lokalnego. Jednocześnie pozwala to na sformułowanie warunku czasu pracy takiego algorytmu. Ze względu na brak

możliwości operowania wartościami skrajnymi, warunkiem wystarczającym jest, aby algorytm ewolucyjny poszukiwał wartości naprężeń i ugięć mniejszych niż dla geometrii A oraz B.

Przypadek nr 4 charakteryzuje się również brakiem wartości ekstremum globalnego naprężeń oraz strzałki ugięcia, co uniemożliwia redukcję wartości obu parametrów. Ruch jednak pozostaje wystarczająco złożony, że możliwe jest dobranie bardziej równomiernej ścieżki zmian między kolejnymi geometriami. Wzrost ten stanowił największe podniesienie efektywności spośród wszystkich przebadanych dotychczas przypadków. Wyniósł 33% chwilowego przyspieszenia ruchu. Oznacza to wymiernie większe tempo uzyskiwania bezpieczniejszej geometrii. Jednocześnie redukcja ta nie wpłynęła na zmianę wartości pozostałych parametrów. Grafika 76 przedstawia wyniki przypadków obciążeniowych nr 3 oraz 4 dla których widać zróżnicowanie stopnia modyfikacji ruchów pośrednich.



Grafika 76. Przykładowa znaczna zmiana trasowania zmian geometrii struktury. Lewa grafika prezentuje model referencyjny przed modyfikacją, natomiast prawa grafika obrazuje efektywniejszy sposób ruchu modelu.

8.3.6 Wnioski

Analiza i użycie algorytmu redukcji naprężeń oraz ugięć stanowią ważną i wysoce efektywną funkcję podczas operowania ruchem modelu responsywnego. Istnieje prosty, każdorazowo aplikowalny do procesu modyfikacji algorytm sprawdzania możliwości redukcji kluczowych parametrów, co pozwala na ocenę sposobu działania modelu z podziałem na reakcję prostą lub złożoną. Uzyskiwana w badaniu niedokładność ruchu sprowadzana z krzywoliniowego do skokowego prostoliniowego jest na poziomie zgodności z faktyczną trajektorią ruchu w stopniu zapewniającym bezpieczeństwo wykorzystania metody w sterowaniu fizyczną strukturą.

W dalszej kolejności badaniom powinny podlegać formuły wartości ważonej istotności wszystkich parametrów jednocześnie. Redukcja tak naprężeń, ugięć oraz czasu reakcji stanowi wyzwanie, pozwalające na wzrost bezpieczeństwa użytkowania struktur responsywnych. Zasadna jest ocena bardziej złożonych parametrów jak całkowita energia wykorzystana na przeprowadzenie procesu zmiany geometrii. Powinna być ona formułowana w oparciu o rzeczywiste dane zużycia energii przez elementy fizyczne i dostępne. Należy zaproponować rozwiązanie algorytmu obliczającego sumaryczny czas zmiany geometrii, jednocześnie pozwalający na obliczanie w czasie rzeczywistym zmian czasu uzyskiwania geometrii poprzez wykorzystanie trasowania, dzięki użyciu geometrii pośrednich. Dalej należy rozszerzyć badania o analizę redukcji liczby siłowników. Redukcja ta stanowić ma odpowiedź na potrzebę dalszego wzrostu oszczędności w operowaniu strukturą.

8.4 Podsumowanie

Preakcje, jak wykazano w badaniach charakteryzują się zróżnicowaną efektywnością wspomagania modułu głównego zachowań. Stanowią bardzo szybki sposób wspomagania modeli zachowań pozwalając na znaczny wzrost natychmiastowej efektywności. Zgodnie z założeniami pozwalają na zabezpieczenie struktury, dając dodatkowy czas systemowi obliczeniowemu na wygenerowanie właściwej reakcji z użyciem modułu głównego. Dowiedziono, że żaden z wykorzystanych modeli preakcji nie jest uniwersalny w stopniu umożliwiającym jego indywidualne zastosowanie w zabezpieczaniu struktury. Każdy z modeli reaguje w odmienny sposób geometryczny generując dla części obciążeń nieefektywne geometrie. Prowadzi to do wniosku, że należy opracowywać systemy złożone z grup modeli preakcji pozwalających na bezpieczniejsze generowanie natychmiastowych odpowiedzi. Hybrydowy model zachowań może w zróżnicowany sposób generować docelowe geometrie. W pierwszym rozwiązaniu wykorzystywać może wszystkie dostępne modele zachowań, wydłużając czas generowania reakcji, lecz sprawdzając znacznie więcej możliwości doboru geometrii. W drugim rozwiązaniu tworzona jest matryca wyboru modelu zachowań. Dla znanej geometrii struktury system automatycznie po rozpoznaniu przypadku obciążeniowego dobiera jaki model preakcji będzie najodpowiedniejszy. Modele mogą również być łączone. W celu uzyskania drugiego spośród przedstawionych modeli możliwe jest zastosowanie najpierw pierwszego wraz z użyciem uczenia maszynowego w celu stworzenia modelu dobierającego automatycznie najodpowiedniejszy typ reakcji.

Modele przyjmują zróżnicowany charakter zmian naprężeń i ugięć podczas wprowadzania wynikowych geometrii. Jak dowiedziono, ruchy pośrednie mogą odpowiadać za największe wzrosty parametrów statycznych, co wymusza ich monitorowanie podczas całego procesu zmian geometrii. Poprawne trasowanie zmienności geometrii pozwala na znaczną redukcję parametrów co umożliwia zwiększenie bezpieczeństwa użycia responsywności.

Skwantyfikowana logika modeli preakcji pozwalająca na generowanie skończonej liczby reakcji na obciążenia zewnętrzne jest bardzo korzystnym zjawiskiem. W oparciu o cechę tę należy kształtować dalsze modele preakcji. Pozwala ona na znacznie łatwiejszą ewaluację efektywności preakcji oraz szybsze jej generowanie. Konieczność doboru skali reakcji z kolei, znacznie rozbudowujące pulę dostępnych odpowiedzi geometrycznych utrudnia dobór odpowiedzi, wymuszając ja przedstawiono w badaniu generowanie spektrum reakcji, spośród których uzyskiwana jest jedna najodpowiedniejsza w danym przypadku obciążeniowym.

Modele badane w rozdziale są sposobami zabezpieczenia modelu głównego ruchu. Badania wykazały dla modelu hybrydowego pełną skuteczność jego działania. Stanowi on więc bardzo skuteczne zabezpieczenie modułu głównego. W rozdziale nie badano modułów głównych, lecz potwierdza częściowo tezę dotyczącą braku możliwości użycia algorytmów ewolucyjnych jako samodzielnych modułów sterowania ruchem modeli. Przedstawiono propozycję logiki oraz gotowych rozwiązań form zabezpieczenia modułu głównego. Opracowane rozwiązania stanowią komplementarny model uzupełniający podstawowe generowanie geometrii, pozwalając na uzyskanie w pełni funkcjonalnego systemu ruchu. Wyniki badań udowadniają poprawność hierarchii działania modeli przedstawioną na początku pracy, w której to modele preakcji reagują jako pierwsze, lecz generują niskoefektywne geometrie, a efektywność pracy modeli podnoszona jest z czasem w wyniku obliczeń modelu głównego opartego o algorytm ewolucyjny. Struktura sterowana wyłącznie preakcjami zachowa pewien wyższy zakres bezpieczeństwa, niż struktura statyczna, lecz zredukowana zostanie trwałość modelu ze względu na większe średnie w czasie wytężenie pracy elementów. Oba systemy – moduł główny oraz preakcje muszą występować w pojedynczym modelu zachowań co potwierdza słuszności pierwszej tezy.

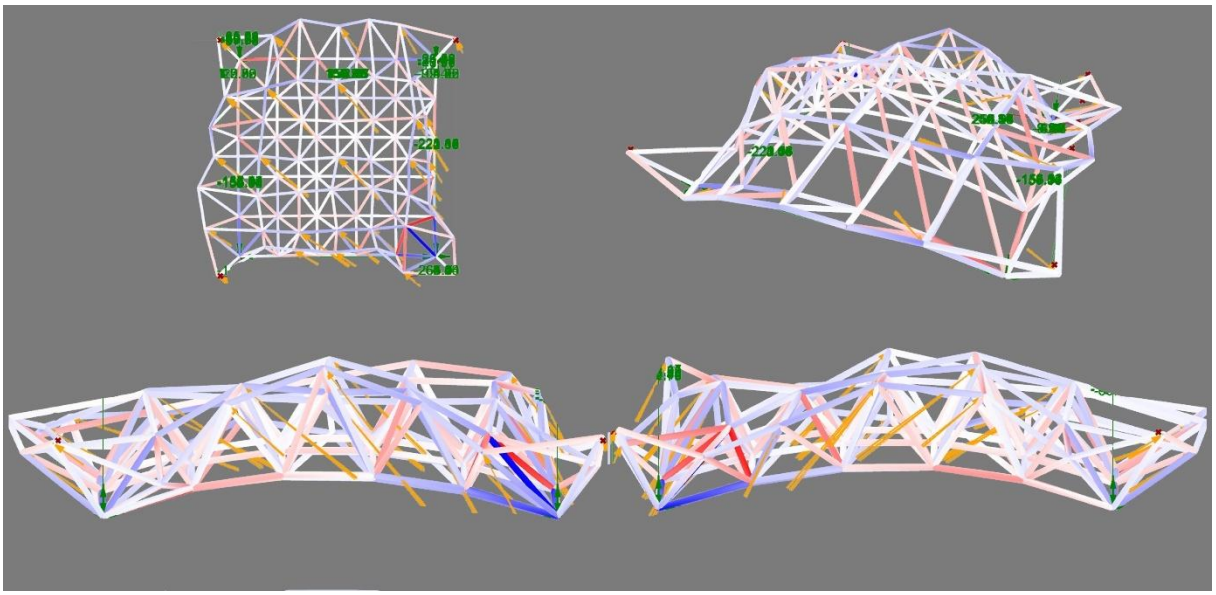
Teza druga nie była poddawana badaniu. Możliwe jest zastosowanie algorytmu ewolucyjnego do badania jaka skala reakcji w danym przypadku obciążeniowym pozostaje najodpowiedniejsza, lecz ze względu na charakter elementarny badań, mających na celu weryfikację słuszności idei preakcji, nie uwzględniano takich analiz. Mogą stanowić one rozwinięcie badań w osobnych opracowaniach. Badania takie jednak nie wprowadzałyby nowych rozwiązań na temat metodologii kształtowania responsywności ze względu na przedstawienie wszystkich wymaganych do ich badania metod na wcześniejszych etapach pracy badawczej.

9. Modelowanie elementów systemów strukturalnych dla architektury responsywnej

9.1 Badanie gotowości realizacyjnej modelu fizycznego badanego algorytmami ewolucyjnymi i optymalizacyjnymi

Struktura z badania 4.2.6 określona jako podlegająca znacznym zmianom geometrycznym w celu dostosowania do grupy 20 obciążeń jednocześnie jest przykładem formy charakteryzującej się znacznymi trudnościami w implementacji zachowań z symulacji do modelu fizycznego. Jest to trudność, którą należy uwzględnić przy każdym automatycznym procesie optymalizacyjnym. W tak indywidualnej strukturze trudności wykonawcze stają się głównym generatorem kosztów i nakładów redukujących lub całkowicie niwelujących potencjalne zyski z zastosowania responsywności. Optymalizacja struktury, geometrię włącza do procesu analitycznego, lecz jako składową w przeciwieństwie do opisywanych wcześniej modeli zachowań struktur responsywnych, które wykorzystują ją jako jedyną determinantę. W pracy [139] autorzy prezentują podejście uniwersalne obliczania zmian struktury, z uwzględnieniem ograniczeń teoretycznych modeli. Ograniczeniu podlegało maksymalne teleskopowanie prętów oraz ujednolicenie naprężeń. W analizie uwzględniono również wymaganą liczebność puli różnych elementów nośnych, wymaganych do złożenia struktury, co stanowiło odpowiedź na trudności wykonawcze. Autorzy przedstawiają metodę budowania formuły matematycznej sterującej zmianami, a jej rozbudowa o indywidualnie istotne parametry musi być każdorazowo przeprowadzana dla każdej struktury. Ze względu na priorytetowość oszczędności materiału i nakładu pracy każda optymalizacja modelu obliczeniowego musiałaby uwzględniać wszystkie czynniki wpływające na zmiany efektywności materiałowej.

Z kolei w pracy [4], dla opracowywanego algorytmu optymalizacji topologicznej modeli objętościowych podnoszona jest kwestia zdolności struktur do prefabrykacji. Algorytm nie uwzględnia z założenia kwestii wykonawczych jako indywidualnych dla każdej struktury. Wszystkie czynniki istotne dla danej realizacji uwzględniono dopiero w [185] znając wymagania materiału, możliwości wykonawcze i określając trwałość oraz sposób użytkowania struktury. Finalnie rozbudowa modelu obliczeniowego wpłynęła na zmianę geometrii wynikowej, przez co ograniczone zostały koszty realizacji. Poza geometrią optymalizacji podlegały kształty elementów składowych oraz łączników. Optymalizacja topologiczna generuje oryginalne elementy. Nałożenie warstwy ekonomii wykonawczej ujednolica je do żądanej maksymalnej puli różnych elementów. Analogiczny problem podnoszony jest w realizacji struktur prętowych. Opracowanie [186] nie podając wprost optymalnej wielkości puli elementów prezentuje sposoby obliczania tej wartości indywidualnie. Z kolei w badanym modelu ujednolicanym z badania 4.2.6 wyraźnie zauważalna jest większość problemów braku holistycznego podejścia do optymalizacji. Podczas jednego z badań w rozdziale uzyskano geometrię przedstawioną na Grafika 77.



Grafika 77.Geometria struktury uzyskana w wyniku przy modelu zachowań. Charakteryzuje się bardzo dużym stopniem złożoności przestrzennej, każdy węzeł zachowuje indywidualność kierunków wyprowadzenia połączeń, a cała struktura pozostaje niezwykle wrażliwa na niedokładności wykonawcze.

W pierwszej kolejności zauważyć można bardzo dużą nieregularność rozumianą jako skoki głębokości kratownicy oraz zróżnicowanie kątów między prętami tak w rzucie jak i widoku bocznym. Struktura obciążona jest obciążeniem ukośnym podnoszącym strukturę, o dużej sile, dlatego też widać znaczącą asymetryczność. Dla struktur responsywnych nie stanowi ona problemu jeśli nie wymusza podziału prętów ze względu na bazowe długości prętów. Wartości te wahały się od 0,542m do 2,258m co wymuszało użycie teoretycznie co najmniej 3 rodzajów prętów, a w praktyce uwzględniając skalę wyboczenia multiplikowało liczbę wymaganych różnych elementów.

9.2 Ograniczenia wykonalności struktur responsywnych

9.2.1 Geometryczne ograniczenia

Uzyskana geometria nie charakteryzuje się żadną regularnością. Pierwotny układ topologiczny dwóch siatek kwadratowych przesuniętych o pół ogniwa i połączonych narożnie ukośnie jest zauważalny, lecz przemieszczeniu uległ każdy węzeł, dlatego też formę należy określić jako całkowicie zindywidualizowaną. To dalej implikuje fakt znacznej czułości struktury na zmiany przypadku obciążeniowego. Struktura o znacznie bardziej regularnej geometrii pozwoliłaby na dłuższą pracę algorytmu ewolucyjnego w poszukiwaniu efektywnej geometrii przed koniecznością zmiany. To z kolei waliduje potrzebę stosowania preakcji. Ograniczenia geometryczne na potrzeby możliwości wykonawczych modeli muszą podlegać dalszym rozwinięciom. Należy uniemożliwić przecinanie się pasm kratownicy, co jest zagadnieniem trywialnym, lecz dla każdego algorytmu należy stosować bezwzględnie takie zabezpieczenie. Ponadto opisywane szeroko w badaniach zachowania szczególnie struktur prętowych dużej skali zjawisko punktowego przegięcia, zmiany krzywizny jednego z pasm lub całej kratownicy należy bezwzględnie wyeliminować. Analizowane powinno to być jako błąd wykonawczy struktury, którego należy bezwzględnie geometrycznie unikać. Nawet jeśli dla danego przypadku nietypowego obciążenia przegięta struktura okazuje się najefektywniejsza to pozostaje ona niezwykle czuła na zmiany układów obciążeń. Minimalna zmiana kierunku obciążenia, która może zaistnieć w pomijalnie krótkim czasie wygeneruje bardzo niebezpieczne naprężenia w miejscu przegięcia. Dodatkowym ograniczeniem pozostaje liczba stopni swobody podpór. Zależnie czy projektowany jest układ sztywny, czy przesztywniony determinuje to ograniczenie zakresów ruchu w każdej sytuacji.

9.2.2 Ograniczenia realizacji elementów prętowych

Pręty muszą dla każdego ich modelu być przeanalizowane pod kątem zmian sił prowadzących do wyboczenia struktury. Przy zmianach długości poprzez teleskopowanie w siłownikach dochodzi do zmiany długości i w konsekwencji długości wyboczeniowej. Jak wynika z analiz dotychczasowych badań najczęściej to najdłuższe pręty charakteryzują się największymi wartościami przenoszonych obciążeń. Wymusza to uwzględnienie zjawiska w analizie geometrii sterowanych algorytmem. Proces ten został przedstawiony w opracowaniu [139] poprzez przeprowadzenie analiz MES dla opracowanej geometrii pręta, dla kilku kolejnych długości wysuwu. Wyniki powinny stanowić część procesu indywidualizacji modelu obliczeniowego efektywnych form.

9.2.3 Ograniczenia realizacji i zdolności translacji węzłów

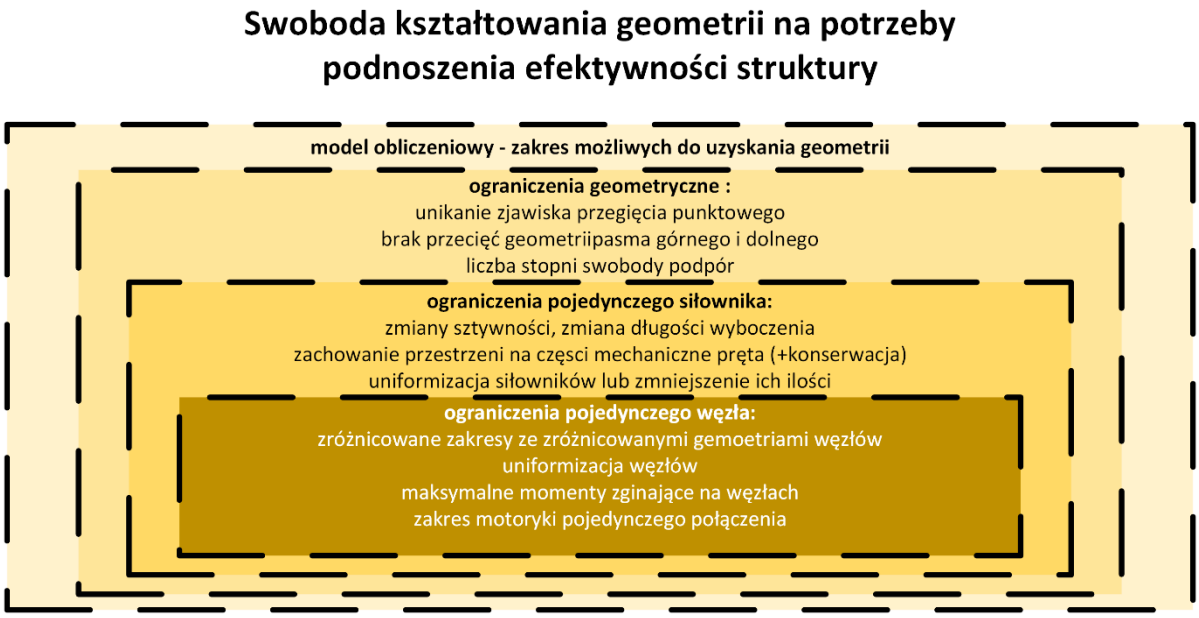
Poza prętami kluczowymi elementami są węzły. Muszą one mieć wystarczająco adaptacyjną budowę, aby pozwalać na dowolność zmian geometrii jakie model obliczeniowy może wygenerować w celu dostosowania geometrii. adaptacyjność jest tu rozumiana jako możliwość zmiany kąta obrotu jednego pręta względem pozostałych. Cztery charakterystyczne węzły ustanowione podporami, ze względu na sztywne punkty odniesienia muszą spełnić dodatkowy warunek – poza zmiennością kątów między prętami wymagana jest również zmienność kątów względem podłoża. Wobec wszystkich pozostałych prętów wymagania są bardziej ograniczone. Każdy pręt ma inne spektrum maksymalnych kątów obrotu na węźle. Pod uwagę na cele unifikacji systemów należy brać maksymalne wymagania obrotu spośród wszystkich prętów i dla nich kształtować system strukturalny.

Trudności wykonawcze z kolei mogą wystąpić na etapie realizacji prętów, jeśli struktura ma mieć bardzo zróżnicowane ich długości. Należy dążyć do minimalizacji ich liczby i dalej uniwersalizacji modelu siłownika lub użycia jednego, bądź dwóch ich rodzajów. Kolejnym ważnym aspektem jest konieczność zadbania o brak kolizji między prętami. Jest to ograniczenie odmienne od nieprzecinania płaszczyzn. Ograniczenie to powinno uwzględniać dokładną geometrię prętów i w oparciu o nią uniemożliwienie kolizji. Wyznaczone powinny zostać maksymalne wymiary prętów lub minimalny kąt między sąsiednimi prętami.

Ostatnie opisane ograniczenie łączy ograniczenia prętów oraz węzłów. Od wielkości przestrzeni określonej jako trójwymiarowa bryła dostępu na pracę siłownika oraz swobodny dostęp do niego na potrzeby konserwacji zależy maksymalna liczba prętów jakie mogą się schodzić w jednym pręcie. Oczywiście problem zbyt wielu prętów można częściowo rozwiązać modelem większego węzła, lecz odgórnie narzucony wymiar maksymalny węzła pozwala na większy stopień uniformizacji. Utrudnieniem w jej wprowadzeniu może z kolei być zróżnicowanie zakresów ruchu, różnice w kątach osadzania prętów, a także określona maksymalna wartość momentów zginających, jakie w wyniku badań MES węzeł może wytrzymać. Bardziej ograniczającą wartością stosowaną alternatywnie może być maksymalny przenoszony moment, lecz dotyczy on węzłów obrotowych centrycznie. Problem ten opisany dalej stanowi zagadnienie czysto inżynierskie, mechaniczne.

9.2.4 Wnioski analizy ograniczeń ruchu

Tak ilość uwzględnionych czynników jak i szczegółowość ich zamodelowania w problematyce kształtowania form struktury responsywnej mają wpływ na ostateczną efektywność. Nie da się każdego kształtu uzyskanego podczas badań algorytmem ewolucyjnym badać i oceniać pod kątem spełnienia opisanych powyżej wymagań. Należy więc możliwie dużą część zasad zastosować w postaci ograniczeń nałożonych na algorytmie zamiast walidowanych algorytmem. To pozwoli na uzyskanie realnych wzrostów efektywności względem struktur statycznych. Wszystkie opisane trudności kształtowania systemów zebrano w schemacie na Grafika 78.



Grafika 78.Schemat istotności ograniczeń strukturalnych systemów przestrzennych do realizacji modeli architektury responsywnej.

9.2.5 Badania ograniczenia ruchu modeli responsywnych przez ruch wyłącznie wybranymi sekcjami struktury

Opisywana zmienność, nazywana responsywnością geometryczną, wpływa na ograniczenia użytkowalności przestrzeni wokół struktury. Każda zmiana geometryczna narusza w niezerowym stopniu otoczenie modelu, gdzie nie może znajdować się żadna funkcja prowadząca do kolizji. Należy określić strefę buforową wokół struktury, gdzie okresowo z dowolną częstotliwością i prawdopodobieństwem może znaleźć się struktura po zmianie geometrii. To prowadzi do dalszych ograniczeń struktury będących pewnym optimum między użytecznością przestrzeni wokół, a swobodą zmienności struktury. Zmienność ta może być ograniczona do części struktury, na przykład poprzez umożliwienie zmienności tyko jednego pasma elementów. Przykładowo ruch jedynie zewnętrznych elementów pozwala na pełną użytkowalność struktury od strony wewnętrznej. Znacznie jednak zmniejsza to zdolność do adaptacyjności do zmiennych warunków obciążenia. Struktury jak Orambra [106] stanowią przykład minimalizacji przestrzeni stale użytkowanej. W celu minimalizacji wpływu responsywności na użytkowanie architektury należy opracować minimalizację jej wpływu, szczególnie dla małych i średnich obiektów.

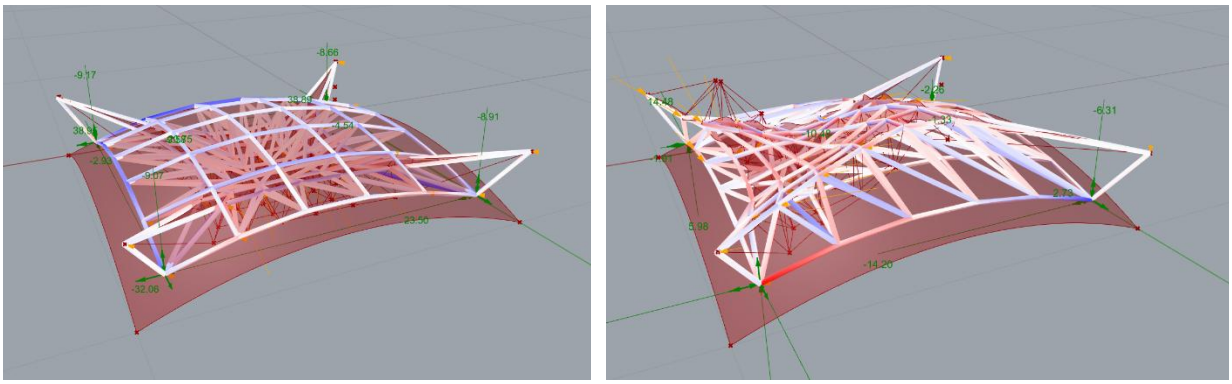
9.2.5.1 Cel badania

W tym celu przeprowadzono badania rozpoczynające proces poszukiwania metod ograniczania ruchu przy zachowaniu motoryki pozwalającej na jak najefektywniejsze poszukiwanie form dla obciążeń zewnętrznych. Do badań wykorzystano 3 modele zachowań. Kratownice mogą zmieniać położenie kolejno wyłącznie pasma górnego, wyłącznie pasma dolnego oraz pasma górnego i dolnego jednocześnie. Dla każdego modelu kolejno określano coraz mniejsze zakresy ruchu. Jednocześnie w celu wyeliminowania podstawowych błędów algorytmu ewolucyjnego określono brak możliwości przecinania się płaszczyzn pasm górnego i dolnego oraz ograniczono maksymalną długość prętów do 1,5 bazowej długości. Brak wskazanych ograniczeń skutkował generowaniem geometrii nieosiągalnych przedstawionych na Grafika 77. Niespełnienie dowolnego z warunków skutkuje wygenerowaniem niskiego wyniku efektywności. Badano kolejne 3 modele dla 20 przypadków obciążeniowych. Każda próba dobrania efektywnej geometrii trwała 5 min i składała się z 950 prób doboru formy. Wyniki badania zebrano w Tabela 22.

9.2.5.2 Wyniki badania

Tabela 22.Zestawienie wyników analizy efektywności użycia poszczególnych sekcji struktury do redukcji strzałki ugięcia modelu pod wpływem grupy przypadków obciążeniowych. Wartość „a)" definiuje proporcję wyników struktury responsywnej górną powłoką do struktury responsywnej dolną powłoką. Wartość „b)" prezentuje wyniki proporcji struktury responsywnej obiema powłokami do struktury responsywnej górną powłoką, natomiast wartość „c)" prezentuje proporcję efektywności responsywności obiema powłokami do responsywności dolną powłoką.

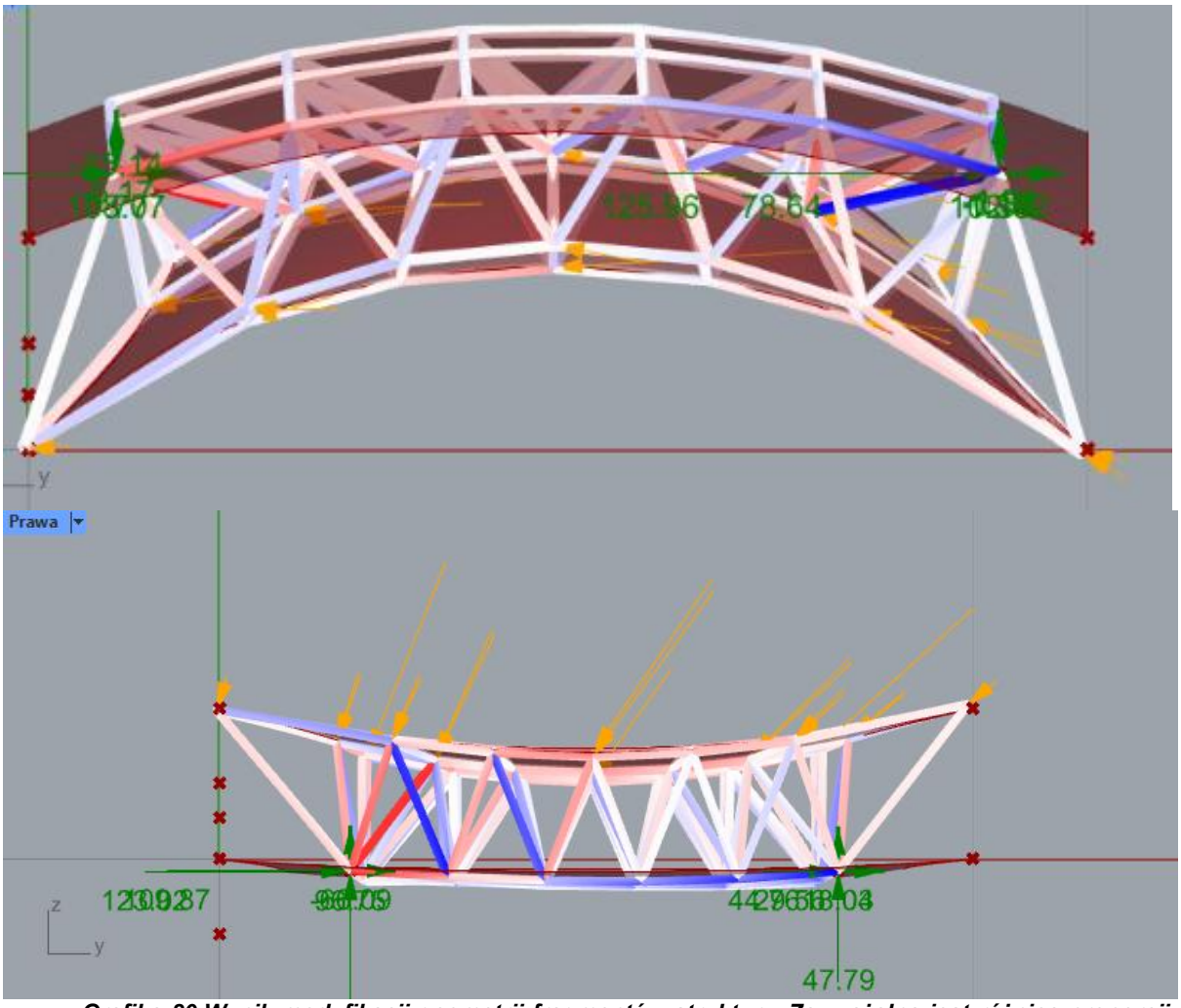
numer badania	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	
składowa X obciążenia [kN]	-0,57631	-0,28359	-4,17558	-0,07831	-2,1233	-0,61634	4,400739	4,584041	-3,86275	1,026527	4,24419	0,064011	3,242256	-3,26986	-2,00149	1,597787	1,544617	0,859575	4,227943	3,044498	
składowa Y obciążenia [kN]	3,642753	0,883911	4,629019	3,428483	4,170739	3,072148	1,045081	-0,34023	2,268537	-0,00944	2,194822	-3,27189	2,634313	1,012674	-2,97567	2,830551	-1,00089	2,224595	3,436134	1,468756	
składowa Z obciążenia [kN]	-1,45089	-1,97692	-2,18611	1,347414	-0,23125	4,301645	-3,32347	4,518349	1,062299	-3,60477	4,7617	-1,13385	-4,06834	-4,05982	-0,0504	-3,25853	4,650614	-3,8204	3,172198	-2,30649	
wyniki pomiarów maksymalnych naprężeń w poszczególnych przypadkach obciążeniowych [MPa]																					
ruch górnej powłoki	0,192408	0,210621	0,787683	0,391587	0,531549	0,261856	0,622897	0,320305	0,440853	0,205876	0,4696	0,12457	0,284971	0,218322	0,112115	0,198799	0,240594	0,201992	0,214713	0,21127	średnie wartości naprężeń danej metody
ruch dolnej powłoki	0,148205	0,095021	0,244936	0,171943	0,159019	0,216374	0,233002	0,277157	0,157151	0,155217	0,170267	0,088567	0,147365	0,145817	0,106865	0,115063	0,127668	0,106177	0,18392	0,10762	
a)	77%	45%	31%	44%	30%	83%	37%	87%	36%	75%	36%	71%	52%	67%	95%	58%	53%	53%	86%	51%	**58%**
ruch obu powłok	0,107382	0,043807	0,154326	0,08874	0,120201	0,180327	0,135213	0,23837	0,1125	0,080564	0,144433	0,084237	0,12064	0,151803	0,105905	0,106429	0,075611	0,099838	0,145752	0,094207	
b)	56%	21%	20%	23%	23%	69%	22%	74%	26%	39%	31%	68%	42%	70%	94%	54%	31%	49%	68%	45%	**46%**
c)	72%	46%	63%	52%	76%	83%	58%	86%	72%	52%	85%	95%	82%	104%	99%	92%	59%	94%	79%	88%	**77%**



Grafika 79.Pryzkłady geometrii niemożliwych do uzyskania w wyniku ruchu struktury responsywnej. Model zachowań uznał układy za efektywne ze względu na brak analizy ruchów pośrednich podczas których dochodzi do szeregu niedozwolonych przecięć elementów strukturalnych.

Badanie wykazało wyraźne granice potencjału wykorzystania ruchu częściowego i całkowitego strukturą. Dla prawie wszystkich przeprowadzonych badań najefektywniejszym sposobem ruchu struktury była modyfikacja obu powłok. Odstępstwo od zasady w badaniu 13 wynika ze zbyt krótkiego czasu prowadzenia pojedynczego pomiaru. Przy jednej modyfikowalnej powłoce algorytm ewolucyjny operuje 4 zmiennymi, lecz przy dwóch powłokach liczba zmiennych rośnie do 7. Oznacza to 10^3 więcej możliwych kombinacji wartości co prowadziłoby do zbytniego wydłużenia badania dla wyrównania prawdopodobieństw uzyskania tak samo efektywnych wyników. Nadal jednak za każdym

razem algorytm znajdował lepsze geometrie operując większą liczbą zmiennych, co argumentuje twierdzenie, że ruch obiema powłokami jest znacznie efektywniejszy przy uwzględnieniu jedynie redukcji naprężeń. Niestety wymusza on zamianę wszystkich prętów na siłowniki, co zmniejsza sztywność całkowitą struktury, która bez statycznych elementów znacznie trudniej będzie zachowywała pierwotną geometrię. Znacznie prostszy pozostaje ruch jedną powłoką, lecz zauważa się znaczący spadek efektywności przy ograniczeniu motoryki modelu. Średnio sterowanie dolną powłoką jest o 22% mniej efektywne od sterowania całą strukturą przy zachowaniu wymagań maksymalnie 1,5 raza teleskopowania pojedynczego pręta. Maksymalne wartości zysku struktur całkowicie ruchomych są odnotowywalne dla dużych wartości obciążeń i przykładanych pod kątami stycznymi do powłoki górnej. Każda najefektywniejsza geometria generująca największe zyski w przynajmniej jednym punkcie posiada styczną równoległą do wektora przyłożonych sił. W takim miejscu widać znaczną jednorodność naprężeń. Nie odnotowuje się dużej redukcji ich wartości, lecz tłumaczy się to przejmowaniem naprężeń z sąsiednich prętów rozpiętych na tej samej powłoce, lecz dla krzywizny pod coraz większym kątem względem wektora przykładanych sił. Stanowi to wniosek na temat dalszych modeli zachowań w postaci preakcji. Zauważa się ponadto najmniejszy rozrzut wartości naprężeń dla operowania obiema powłokami- mniejszy o 19% niż dla sterowania dolną powłoką. Oznacza to bardziej przewidywalny zakres wyników reakcji dla nieprzebadanych przypadków. Z kolei najmniej efektywny model ruchu oparty jest o sterowanie wyłącznie górną powłoką. Jest on średnio o 45% mniej efektywny od sterowania dolnym pasmem i o 72% mniej od sterowania całą strukturą. Tak duża różnica wyraźnie wskazuje na brak opłacalności stosowania tej formy częściowej responsywności. Ograniczenia ilości siłowników muszą być prowadzone w oparciu o inne kryteria. W typowym ustroju kratownicowym dwuwarstwowym, gdzie występuje wyraźna tendencja do przenoszenia sił ściskających pasmem górnym i sił rozciągających pasmem dolnym ingerencja w ten rozkład i wprowadzanie zmian geometrycznych są nieopłacalne.



Grafika 80.Wynik modyfikacji geometrii fragmentów struktury. Zauważalna jest różnica proporcji reakcji geometrycznych systemu. Dolne pasmo wymaga ruchu o znacznie większej skali niż pasmo górne.

Znaczna różnica efektywności między operowaniem pasmem górnym oraz dolnym wynika ze znacznie mniejszego zakresu zmian geometrii pasmem górnym przy zachowaniu proporcji długości teleskopowania wyznaczonej na 1,5 co przedstawiono na Grafika 80. Dużo większy zakres rotacji prętów pasma dolnego często wykorzystywane było przez algorytm w celu zmniejszenia głębokości kratownicy w części środkowej, co wyraźnie widoczne jest na grafice. W kierunku podpór wszystkie pręty schodziły się znacznie bardziej równolegle, co znacząco ujednolicało zachowanie struktury. Ograniczona możliwość zmiany geometrii ma potencjalne zalety. Pozwala na zmniejszenie zakresu badanych parametrów. Żadna z badanych geometrii nie przekroczyła wartości parametru ***„Length strength”*** równej 4,26 i nie zeszła poniżej -1,28 bez utraty spełnienia wszystkich warunków geometrycznych, podczas gdy domyślny zakres wartości wynosił -10,0 do 10,0.Nałożenie ograniczeń na wszystkie modele na podstawie wyników przeprowadzonych badań może pozwolić na znaczne przyspieszenie przeliczania wynikowej efektywnej geometrii przy mniej efektywnych modelach zachowań. Na podstawie wyłącznie niepenalizowanych wyników wszystkich badań dla każdego z 3 modeli zachowań dobrano nowy zakres badanych parametrów. Kolejno dla ruchu pasmem górnym, dolnym i obydwoma pasmami zakresy parametrów zostały zmniejszone 12,45 raza, 48,05 raza oraz 492,1(6) raza. Nie jest to wartość wprost wyznaczająca redukcję czasu uzyskiwania wyniku ponieważ od precyzyjniej ograniczonego modelu wymaga się większej precyzji wyników, lecz redukcja czasu i wzrost dokładności w poszukiwaniu optimum lokalnego lub globalnego funkcji zmiany geometrii argumentują możliwość wykorzystania wszystkich 3 modeli zachowań do generowania wyników dla jednej struktury jednocześnie.

9.3 Modelowanie węzłów struktur responsywnych w oparciu o wymagania responsywności

9.4 Wstęp, przykłady struktur istniejących

Zdecydowana większość struktur responsywnych jest dyskretna, złożona z prętów schodzących się w węzłach. Systemy konstrukcyjne kratownicowe najczęściej stosowane w budownictwie nie spełniają wystarczających wymagań do wykorzystania w strukturach responsywnych. Najpopularniejsze systemy jak MERO, czy Nodus są odpowiednie do zastosowań o małej dynamice odkształceń. Próby ich stosowania wymuszają znaczne modyfikacje systemu jak stosowanie wałów Kardana w miejscu połączenia węzła z prętem [71]. Systemy te charakteryzują się znaczną podatnością na nieosiowości ze względu na smukłość prętów, a połączenia z węzłami nie usztywniają ustroju, w sposób umożliwiający zmianę geometrii układu. System Nodus jako najbardziej adaptacyjny spośród analizowanych pozwala na znaczne obroty prętów względem węzła, lecz w jednej płaszczyźnie równoległej do osi sprasowania końców pręta. Nadal jednak obrót pręta nie pozostaje neutralny dla stanu technicznego struktury. Każda modyfikacja geometrii wywołuje mikrospękanie struktury stali, ze względu na generowanie odkształceń plastycznych na płaskim odcinku łączników [187].

Wśród systemów konstrukcyjnych zauważa się istotną gradację problemu nieosiowości systemów podczas pracy układów pod obciążeniami. Nieosiowość ta wynika z modelu obrotu pręta względem węzła. Zależnie od rozmiarów węzłów i sposobu ich połączenia z prętami podczas odkształceń następuje utrata osiowości przekazywania sił między prętami. Teoretyczne linie obojętne wszystkich prętów schodzące się w jednym punkcie lub jego pomijalnie małym otoczeniu zaczynają wywoływać zauważalne momenty zginające. Podziału zachowań systemów można dokonać ze względu na skalę generowanych momentów oraz sposób zniszczenia struktury. Ekstremum na opisywanej skali stanowi system Unistrut. W celu rozwiązania problemu słabego osiowo połączenia węzła z prętem system wykorzystuje niepowszechne rozwiązanie zaginania końców prętów w celu każdorazowego poziomego ich mocowania w węźle. Węzeł stanowią dwie płaskie blachy otworowane w pionie. Połączenie takie, niespotykane w innych systemach w momencie złożenia struktury generuje znaczące naprężenia zginające, czyniąc z kratownicy system ramowy działający w znacznym stopniu na momenty zginające. Potwierdza to najczęstszy charakter zniszczeń systemu jakim jest zgięcie pręta w miejscu zakrzywienia osi [187]. Jednocześnie model zniszczenia daje wyraźne sygnały przeciążenia struktury przed jej zniszczeniem, poprzez ponadmiarowe ugięcia zachowujące wysoki stopień proporcjonalności względem przykładanych sił. Sposób łączenia elementów generuje znaczne momenty zginające na węźle. Mniejsze, lecz nadal istotne momenty generują się na elementach systemów Octatube oraz Triodetic. Pierwszy pozwala na dużą swobodę obrotu elementu w połączeniu węzła, lecz szybko następuje w nim uplastycznienie połączenia, które jest podatne na deformacje struktury [188]. Drugi usztywnia element w osi pionowej, lecz nie posiada sztywności na obrót w osi pionowej, przez co stosunkowo małe wartości sił generują momenty zginające wywołujące obrót węzła. Najbardziej wrażliwym na nieosiowości przekazywanych sił pozostaje system MERO, w którym nieosiowości deformują w pierwszej kolejności pręt, lecz bardzo często wraz z gniazdem na węźle eliminując cały węzeł z eksploatacji. Niemniej jego prosta budowa, łatwość dostosowania systemu do indywidualnych geometrii projektów i łatwość montażu plasują go wysoko wśród powszechnie wybieranych systemów.

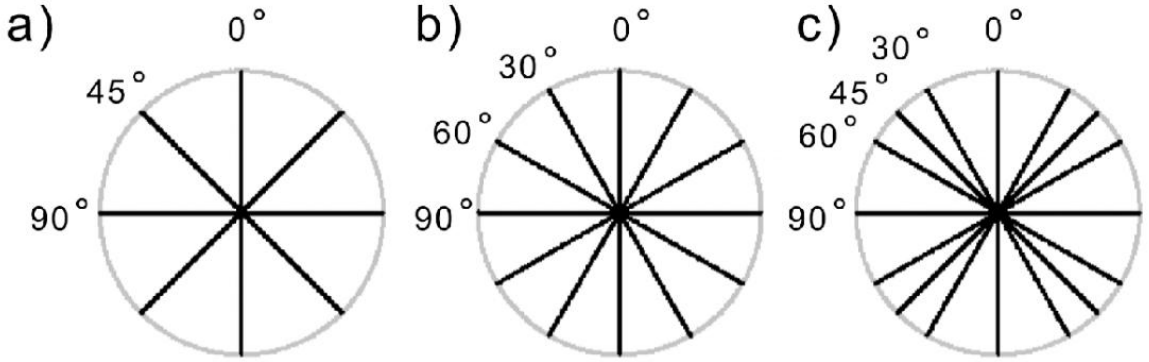
Węzły w strukturach statycznych mogą uzyskiwać sztywność poprzez odpowiednią liczbę prętów do nich mocowanych, jednak wymaga to zachowania osiowości przekazywania sił w celu eliminacji naprężeń wyginających. Ponadto ich model sygnalizowania przeciążenia oparty jest o wystąpienie wyraźnych deformacji prętów w otoczeniu węzłów. W strukturach responsywnych wymagana jest adaptacyjność prętów rozumiana jako zdolność usztywniania struktury oraz efektywnego przekazywania naprężeń między elementami ustroju. Uniemożliwia ona proste badanie stateczności struktury poprzez określenie strzałek ugięć w miejscach krytycznych.

9.4.1 Badania modelowe systemów strukturalnych dla architektury responsywnej

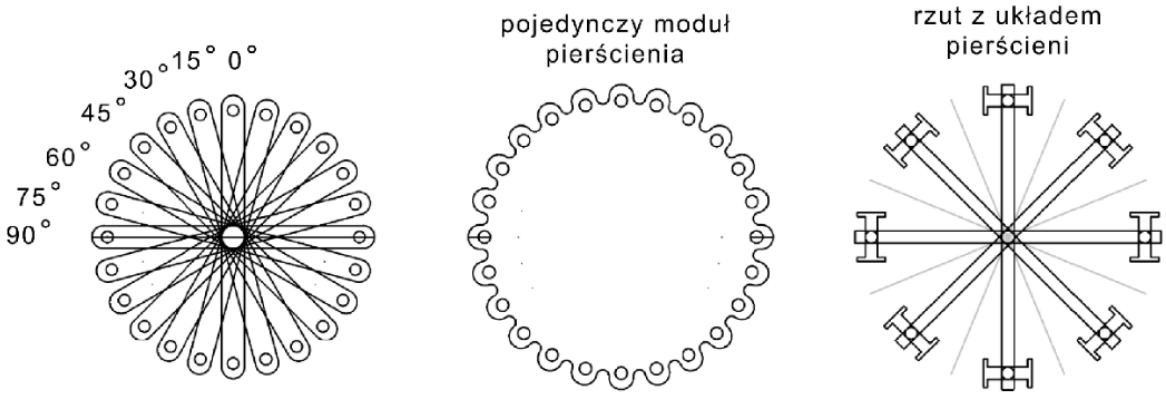
Nie istnieją obecnie żadne systemy konstrukcyjne zdolne do przenoszenia naprężeń, sił z zachowaniem odpowiedniej sztywności, aby umożliwić budowę struktury responsywnej dużymi zmianami geometrii jak i małymi zmianami geometrii poprzez ingerencję w siły wewnętrzne. Wszystkie obecnie realizowane badania prowadzone są na autorsko modyfikowanych powszechnie dostępnych systemach konstrukcyjnych nie nosząc znamion unifikacji podejścia do zagadnienia ruchu w węźle i na prętach. W celu uproszczenia procesu kształtowania struktur responsywnych należy na wstępie zdefiniować wykorzystywany system konstrukcyjny. Określa on sposób i zakres ruchu struktury, wymagania efektywności nośnej, trwałość oraz możliwe geometrie bazowe struktury. Autor w celu wypełnienia opisanej niszy badawczej opracowuje kilka modeli elementów strukturalnych, proponując je jako inspiracje dla dalszych prac nad ujednoliconym systemem konstrukcyjnym. Wszystkie modele strukturalne poddane są badaniom parametrów kluczowych dla zapewnienia responsywności strukturalnej, opisanych w rozdziale oraz analizowanych w dalszej części pracy.

9.4.1.1 Koncepcja modelu pierścieniowego

Wszystkie proponowane modele węzłów oparte są o geometrię kuli jako najodpowiedniejszej dla uzyskania osiowości. W wyznaczonej nią sferze określone są dalej płaskie pierścienie orientowane względem siebie dla uzyskania pewnej dowolności montażu elementów. W pierwszej kolejności zaproponowano 3 wersje węzłów spełniających wymagania adaptacyjności. Zebrano je na schemacie na Grafika 82. Ich modelowanie rozpoczęto od określenia wymaganej zdolności rotacji. Dla najmniej ruchomych struktur operujących małymi odkształceniami model powinien umożliwiać ruch w zakresie maksymalnie 5 stopni. Wartość ta została określona na podstawie danych zbieranych z badań [69]. Po optymalizacji układu siłowników wymagana adaptacyjność wzrosła z 10,24 stopnia do 13,85. Wartość została zaokrąglona na potrzeby modelowania z bezpiecznym zakresem do wartości 15 stopni. Układ w rzucie z kolei analizowany był pod kątem najczęściej stosowanych układów prętowych. Wśród zastosowań responsywnych dominuje układ siatki kwadratowej przesuniętej o pół ogniwa między pasmem górnym i dolnym. Dla takiego układu węzeł powinien przyjmować postać „a” znaną chociażby z systemów Octatube, czy Spherobat. Z kolei dla układów trójkątnych uzyskujących większą sztywność, definiowanych przez Fullera jako najefektywniejsze spośród geometrii [23] należy stosować geometrię „b”, która jest wariacją na temat systemu Tridimatec, pierwotnie zaprojektowanego jako sześcioramienne moduły, podobnego w ilości elementów przypadających na jeden węzeł do Mero Plus-ZK. Osadzenie z kolei trójkątnej siatki na kwadratowej siatce jako kolejno górne i dolne pasma wymusza użycie modelu „c”. Na cele dalszych testów wybrano modele „a” oraz „c” jako kolejno najprostsze oraz najelastyczniejsze topologicznie.



Grafika 82.Koncepcja modelowania ramion połączeń węzła ze względu na dostępność uzyskiwanych geometrii struktur przestrzennych i minimalizację nieosiowości.



Grafika 81.Koncepcyjne opracowanie budowy węzła w drugiej płaszczyźnie ze względu na dostępność do punktów połączeń węzła z prętami.

Dalej opracowano układ pojedynczego pierścienia. Zgodnie z pierwotnymi założeniami między kolejnymi ogniwami mocowania prętów występował kąt 15 stopni. To gwarantowało, że żadne dwa pręty jednego węzła nie przetną się podczas swobodnego ruchu. Dodatkowo na tym etapie należało uwzględnić orientacyjne wielkości prętów oraz węzłów na potrzeby wymiarowania oraz łatwego dostępu podczas obsługi i konserwacji. Założeniem modelu węzła było uzyskanie wytrzymałości na potencjalne momenty obracające wywoływane obrotem pręta i utratą osiowości mocowania z węzłem. Oznacza to konieczność obliczenia maksymalnych momentów. Momenty obracające można zsumować jako:

$$M_z = \sum_{i=0}^{n} R \cdot F_i \cdot \sin(\theta_i) \qquad (9.1)$$

Gdzie:

R-promień modelowanego węzła

F_i-wektor siły jako siła podłużna z pręta

$\sin(\theta_i)$- kąt między siła przyłożoną, a promieniem pierścienia węzła

Dalej określone zostało założenie, że wszystkie momenty obracające wywołują czyste skręcanie tarczy co implikuje wystąpienie naprężeń stycznych (τ). Ich wartość zmienia się wraz z promieniem co oznacza maksymalizację wartości na krawędziach. Wartość naprężeń może być wyznaczona jako:

$$\tau(r) = \frac{M_z * r}{J_p} \tag{9.2}$$

Gdzie

r-promień perścienia

J_p-biegunowy moment bezwładności przekroju

Rozpisując moment bezwładności na składowe powstanie gotowy wzór

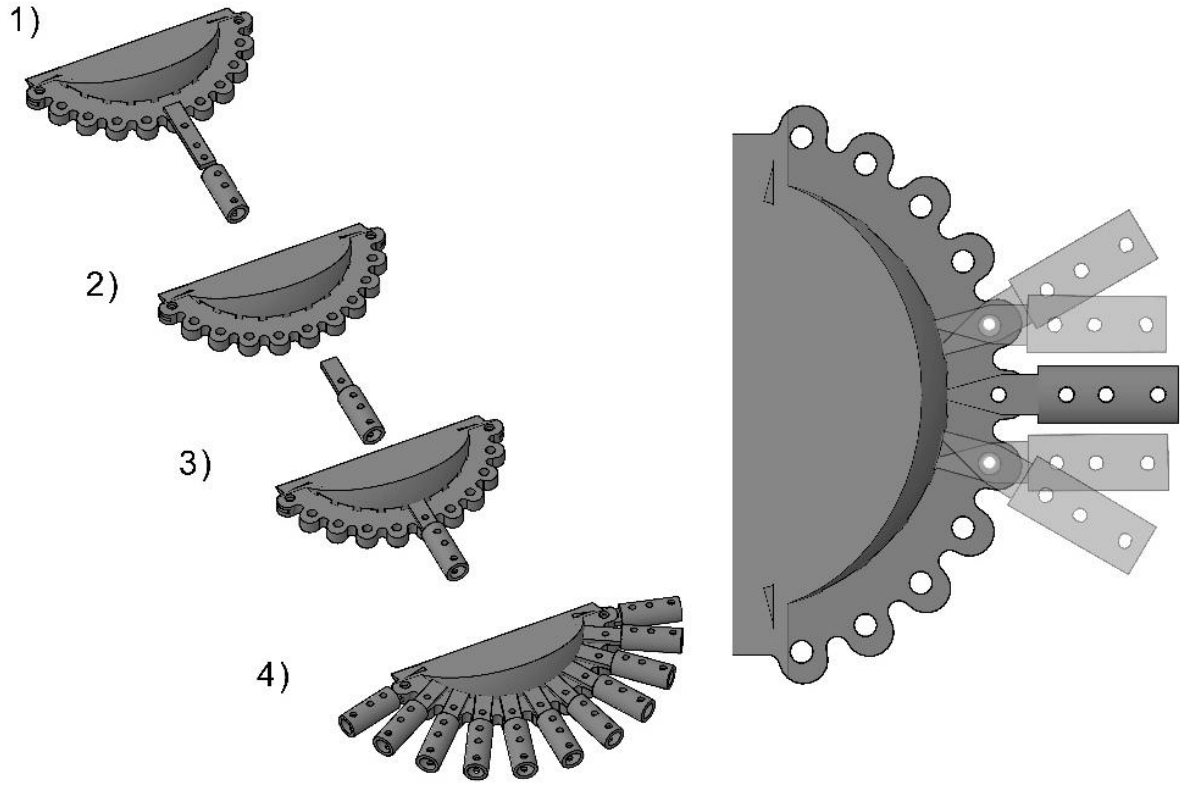
$$\tau(r) = \frac{M_z * r}{J_p} = \frac{2 * M_z * r}{\pi R^4} = \frac{2M_z}{\pi R^3} \tag{9.3}$$

Wzór jest prawdziwy dla przypadków, gdy grubość pierścienia jest znacznie mniejsza od jego promienia. W przypadku analizowanego modelu węzła wartość ta jest zawsze mniejsza niż 1:20 co pozwala na użycie wzoru do szacowania wartości naprężeń.

Dalej przeprowadzono analizę możliwości łączenia prętów z węzłami w celu uzyskania informacji o minimalnej średnicy – dla większych węzłów odległości między krawędziami sąsiednich pierścieni są większe. Określenie wymaganej przestrzeni między sąsiednimi pierścieniami pozwalać ma na swobodne osadzanie łożyska i śrub mocujących prostopadłych do płaszczyzny środkowej pierścienia. Na podstawie wymiarów dostępnych systemów montażu określono promień sfery węzła na 15cm. Grubość ścianki pojedynczego pierścienia z kolei na 1cm.

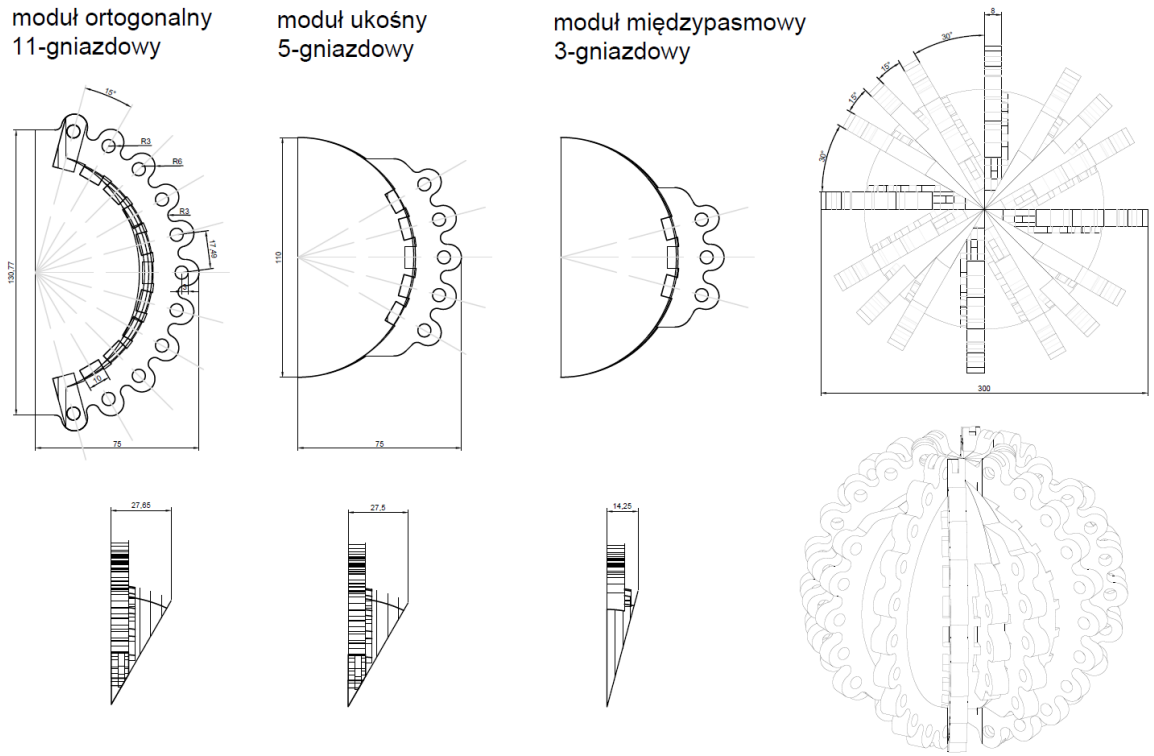
Każde połączenie węzła z pierścieniem, dążąc do uzyskania określonego zakresu obrotu, powinno być wykonane z użyciem łożysk w dwóch kierunkach- osi podłużnej i prostopadłej do linii środkowej pręta. Pozwala to na zachowanie sztywności na zasadzie uproszczonego statycznego przegubu Kardana. To z kolei wymusza różnicowanie wszystkich pierścieni ze względu na liczbę kątów mocowania prętów. Określono hierarchię elementów od ortogonalnych, przez ukośne 45 stopni po pozostałe łączące pasma górne i dolne o różnej topologii. W oparciu o tę zasadę usuwano skrajne biegunowe gniazda połączeń prętów z węzłami w celu eliminacji przecinających się połączeń. Uzyskano trzy typy elementów. Kolejno moduły 11, 5 i 3-gniazdowe stanowią łączone w sferyczny węzeł elementy powtarzalne. Na przedstawieniach koncepcyjnego modelu podano podstawowe parametry wielkości elementów. Węzły kształtuje się jako wykonane z aluminium stanowiącego materiał łatwy w obróbce dla uzyskanych geometrii przy zachowaniu wysokich właściwości mechanicznych. Masa węzła liczona w oprogramowaniu Autodesk Inventor uwzględniająca dokładną geometrię wynosi 4,32kg na cały sferyczny model.

Ukształtowanie elementów w sposób niesymetryczny wymusza jeden kierunek łączenia poprzez każdorazowy styk ściany zawierającej gniazda ze ścianą cofniętą sąsiedniego modułu jak przedstawiono to na Grafika 83. Tworzy to dalej asymetrię całego węzła, która znajduje uzasadnienie w sposobie łączenia prętów. Elementy prętowe zakończone będą z obu stron asymetrycznym łącznikiem złożonym ze śruby gniazdowej oraz pałąka usztywniającego osadzanego w kieszeni odpowiadającej danemu gniazdu. Węzeł pozostaje asymetryczny, lecz po połączeniu z prętem siły osiowe przenoszone są centralnie po osi obojętnej przechodzącej przez oś centralną węzła. Przeciwdziała to powstawaniu momentu obrotowego. Połączenie jednostronne z kolei zwiększa wytrzymałość połączenia ze względu na wzrost wytrzymałości w kwadracie w zależności od grubości połączenia oraz dwukrotnie mniejszą wymaganą liczbę kieszeni prętów kształtowanych tylko po jednej stronie.



Grafika 83. Sposób łączenia pręta z elementem węzłowym. Na prawej grafice widoczny jest zakres rotacji każdego z prętów pozwalający na ruch modelu responsywnego.

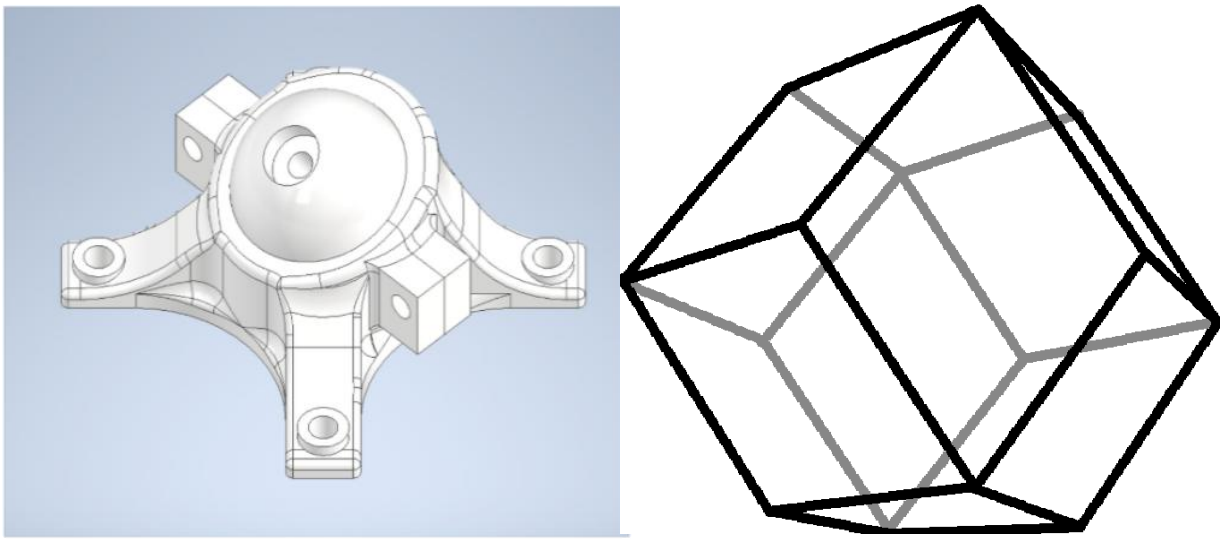
Model węzła pozwala na połączenie do 96 prętów pod różnymi kątami. Wszystkie połączenia są ruchome w zakresie 30 stopni co pozwala sąsiednim prętom na układ równoległy. Oznacza to, że zakres ruchu węzła znacznie przekracza możliwości zmiany geometrii prętów. Rotacja jednak jest możliwa tylko w jednej płaszczyźnie co wymusza stworzenie dodatkowej płaszczyzny obrotu na samym pręcie. Oznacza to, że każdy pręt musi z obu stron być zakończony zawiasowo. Ponadto takie zamocowanie ze sztywnego układu tworzy mechanizm. Dowolna ilość prętów wychodzących z węzła nie usztywni go tak, aby nie wywoływać obrotu całego elementu. To wymusza minimum jedno zamocowanie sztywne bez możliwości obrotu pręta, implikując brak możliwości jego teleskopowania. Implikuje to fakt, że momenty obracające będą równoważone jedynie przez usztywnione pręty. Ponadto brak gniazd dla prętów na biegunach wymusza orientację skośną węzła. Możliwa jest pełna funkcjonalność, lecz każda struktura wymaga dokładnego opracowania montażu elementów. Na Grafika 84 przedstawiono pełny zestaw części składowych modelu pierścieniowego węzła wraz z widokiem z góry na złożony model 16-elementowy.



Grafika 84. Ostateczna koncepcja modelu elementów węzłowych pozwalających na uzyskanie wystarczającego stopnia obrotu wszystkich elementów ruchomych względem elementów statycznych.

9.4.1.2 Model bryłowy oparty na geometrii dwunastościanu foremnego

W celu eliminacji zauważonych trudności opracowano kolejną formę węzła opartą o pełną bryłę. Ponad łatwość wykonawczą przedłożono efektywność pracy węzła. Pierwsza forma węzła ze względu na mały zakres ruchu i obrót tylko w jednej osi na węźle musiała posiadać znaczą liczbę gniazd. Możliwość wyraźnego zwiększenia zakresu ruchu każdego połączenia pozwala na redukcję liczby gniazd i możliwość zwiększenia nośności każdego połączenia, jednak zwiększający się zakres ruchu oznacza trudności przeniesienia momentów obracających węzeł. Najprostszą formą węzła spełniającego wskazane wymagania jest



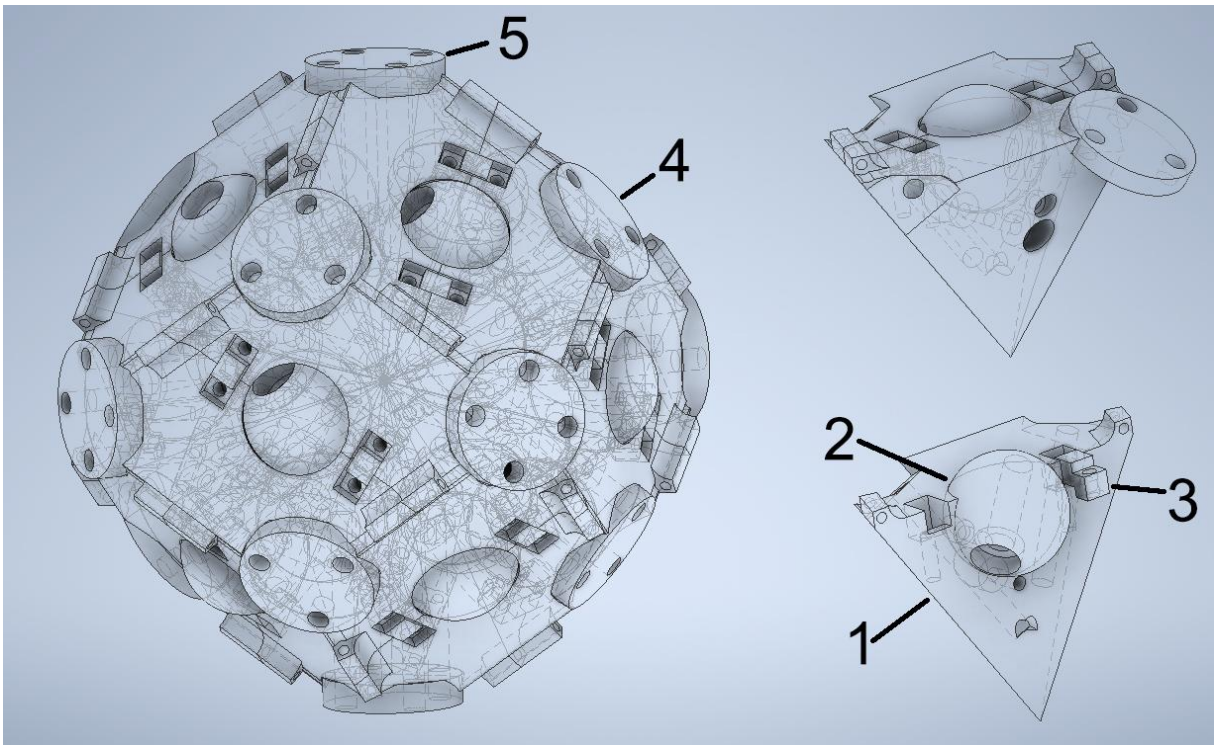
Grafika 85.Przedstawienie sposobu uzyskania rotacji na węźle . PO prawej stronie widoczna forma bryły, na której oparta została koncepcja modelu bryłowego węzła dla struktur responsywnych.

połączenie kulowe. Zamodelowana z jego użyciem podpora została przedstawiona na Grafika 85. Jest ona nieprzesuwna, lecz obrotowa w dwóch kierunkach. Dla dowolnego kierunku obrotu w zakresie użytkowania przenosi siły podporowe skupiane w jednym punkcie zwanym ogniskową podpory. Połączenie takie jednak wymaga precyzyjnego obliczenia wytrzymałości na zjawisko wyrwania kręgu z łożyska. Wytrzymałość połączenia na siły ściskające i rozciągające jest nieporównywalna.

9.4.1.2.1 Budowa modelu

Struktury responsywne obecnie w głównej mierze opracowywane są jako formy przykryć, zadaszeń, co predestynuje wykorzystanie wąskiego szeregu topologii efektywnych dla dyskretnych struktur samonośnych. Są nimi kratownice przestrzenne. Ich podstawowe układy elementów i ich wzajemne powiązania opisywane w [171] są najczęściej wykorzystywane. Wśród nich dominuje układ kwadratowego moduły przesuniętego o pół ogniwa między pasmem górnym oraz dolnym łączonymi ukośnie 4 prętami wychodzącymi pod kątem z węzła. Układy te mogą być stosowane dla struktur dwupasmowych oraz wielopasmowych, jednak w celu minimalizacji zagrożenia wystąpienia zjawiska lokalnego przegięcia powłoki nie stosuje się układów jednopasmowych. Typowe dwupasmowe układy z kolei charakteryzują się bardzo wąską pulą wymaganych długości prętów oraz znaczną zmianą geometrii całkowitej przy minimalnym teleskopowaniu pojedynczych prętów. To oznacza wzrost trwałości i wytrzymałości struktur. Określenie topologii kratownicy do badań determinuje ilość prętów schodzących się w jednym węźle. Każdy węzeł musi pozwalać na połączenie 12 prętów. Wszystkie one rozstawione są w układzie równomiernym, zależnym jedynie od głębokości kratownicy. To oznacza dalej, że najodpowiedniejszą formą węzła dla struktur dyskretnych jest dwunastościan foremny. W najpopularniejszej formie złożony jest on z pięciokątów, które kątami ułożenia nie odpowiadają kątom łączenia prętów z węzłami, jednak jego alternatywna forma dwunastościanu rombowego przedstawionego na Grafika 85 stanowi odpowiednią geometrię wyjściową. 4 połączenia poziome oraz po 4 połączenia ukośne górne i dolne w pełni pokrywają się orientacjami ścian z kierunkami wyprowadzenia prętów. Każda ściana jest zorientowana względem sąsiedniej pod kątem 120 stopni. W pierwotnej formie węzła elementy ruchome stanowią 27% objętości węzła. Pozostałą przestrzeń stanowi sztywny monolityczny szkielet łączony śrubami. Każda ściana pozostaje identyczna. Analiza objętości węzła pozwoliła na oszacowanie wagi pojedynczego węzła wraz ze wszystkimi potrzebnymi w złożeniu śrubami jako równą 1,47kg przy założeniu, że materiałem węzła będzie materiał PLA stosowany w druku 3D, a jedynie elementy montażowe będą stalą o standardowej gęstości i wymiarach wypełniających w 95% głębokość gniazd.

Romb dla łożyska sferycznego stanowi nieoptymalną geometrię, lecz nadal pozwala na realizację tego typu połączenia. Łożysko swoją wielkością musi być dopasowane do maksymalnych wymiarów pojedynczej ściany bryły przy uwzględnieniu odpowiedniej wytrzymałości poprzez grubość ścian między łożyskami, wielkością samego łożyska i jego stopnia wysunięcia z lica ściany co bezpośrednio przekłada się na zakres ruchu. Im płycej łożysko osadzone jest w węźle, czyli posiada płytsze gniazdo, tym mniejsza siła powoduje wyrwanie łącznika. W zakresie między pełnym osadzeniem z zerowym zakresem ruchu, a wysunięciem o mniej niż pełny promień łożyska należy dobrać głębokość do zakładanej wytrzymałości. Szacuje się osadzenie go na głębokości 0,72 średnicy. Tym samym wysunięcie kuli łożyska o 1,5cm z lica ściany minimalnie zwiększa węzeł. W celu przenoszenia pewnych minimalnych sił osiowych nie jest możliwe dowolne zmniejszanie wielkości węzła. W celu określenia wielkości elementów przeprowadzono badania symulacyjne.



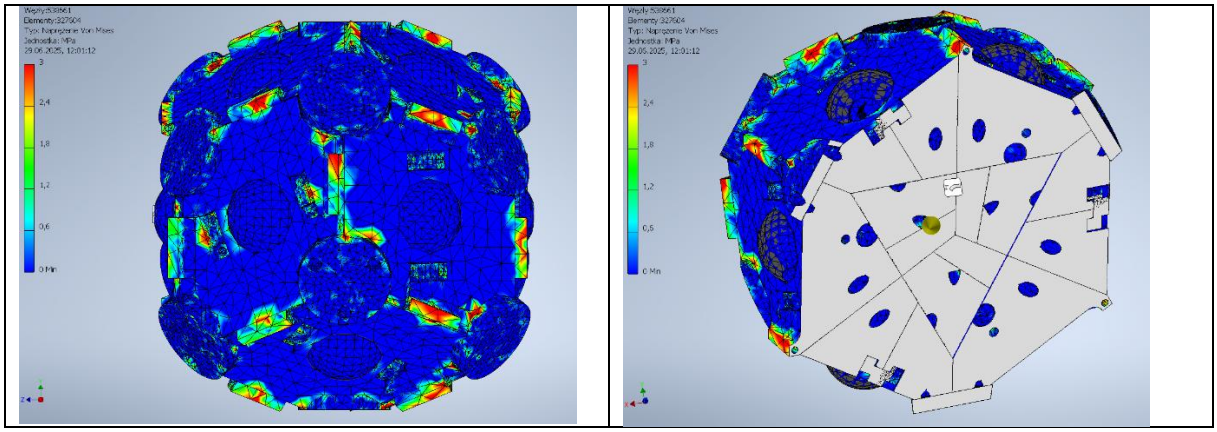
Grafika 86.Koncepcja modelu bryłowego węzła z przedstawieniem podziału na elementy złożenia. Struktura składa się z powtarzalnych 12 segmentów łączonych między sobą wielopunktowo. Węzeł uzyskuje wytrzymałość dopiero po złożeniu całości jego modelu.

Dokładny model węzła wykonano w programie AutoCad Autodesk i przedstawiono na Grafika 86, następnie złożenia dokonano w programie Autodesk Inventor. Zamodelowano formę dwunastościanu rombowego, gdzie na każdej ścianie znajduje się opisane łożysko sferyczne. Zakres ruchu każdego łożyska określono na 117 stopni. Ruchomym może być dowolne, lecz nie każde połączenie z węzłem. Zawsze minimum 1 łożysko musi pozostać usztywnione w celu zachowania inercjalności położenia węzła względem innych elementów struktury oraz uniknięcia obrotu węzła prowadzącego do załamania i złożenia obciążonej kratownicy. Skrajne pozycje łożysk sferycznych równe 58 stopniom generują mimośród równy 0,174 średnicy węzła gdzie promień liczony jest od ogniskowej styku wszystkich elementów nr 1 wewnątrz węzła do osi środkowej łożyska sferycznego. W pierwszej wersji modelu węzeł ma średnicę 32cm, co przekłada się na mimośród równy 5,57cm wywołując obracanie. Cały model składa się z 74 elementów, gdzie 60 stanowi 12 kolejnych ścian, a pozostałe 14 to czteropunktowe oraz trójpunktowe łączniki między ścianami. Sumarycznie węzeł, aby uzyskać łatwość łączenia ścian między sobą uzyskał fazowania na narożach elementów, co sprawia, że na węźle wyróżnić można sumarycznie 26 ścian. Model opracowano do łączenia 4 rodzajami śrub o średnicach M3, M4 w dwóch długościach oraz M8. Wszystkie elementy montażowe osadzane są w sposób wzajemnie się zakleszczający, działają na ścinanie, choć łączenie trójkątów nr 1 lokalizowane poniżej elementu nr 2 przeciwdziała rozsunięciu połówek trójkąta działając na rozrywanie. Do wykonania modelu przygotowano 5 rodzajów elementów. Grubości ścianek, odległości między łączeniami, głębokości łączeń, proporcje elementów dobierano tak, aby ujednolicić wytężenie wszystkich elementów podczas przekazywania sił. Badania ujednolicające naprężenia wszystkich elementów wykonywano poprzez iteracyjne zmniejszanie średnicy modelu do uzyskania maksymalnych dopuszczalnych naprężeń przy symulacji obciążenia dopuszczalnymi siłami. Model MES przygotowano w oparciu o zasadę maksymalnej długości krawędzi elementu skończonego równej 0,1mm i minimalnej 0,007mm. Uzyskano tym samym siatkę modelu złożoną z 538 661 węzłów i 327 604 elementów. Zagęszczeniu siatka elementów ulegała standardowo w miejscach o większej złożoności geometrii oraz wszędzie gdzie występowały połączenia śrubowane. Założono, że model nie

będzie pracował w stanie sprężenia co umożliwiało pominiecie symulacji osobno zjawiska tarcia przy docisku między elementami węzła.

9.4.1.2.2 Badanie sztywności i wpływu nieosiowości sił zewnętrznych na przenoszenie naprężeń przez węzeł

Badania przeprowadzano w formie analiz MES wykonywanych w oprogramowaniu Autodesk Inventor. Określono rodzaj materiału węzła jako ABS o wytrzymałości do 24 MPa na rozciąganie ze względu na dalszą możliwość wykorzystania tego materiału w druku 3D do zrealizowania fizycznej formy węzła. Wszystkie połączenia z kolei wykonano jako śruby stalowe metryczne AS1110 o wytrzymałości nominalnej na rozciąganie 480MPa. Założono, że śruby nie będą deformowane ze względu na zbyt dużą różnicę plastyczności obu materiałów. Odkształceniom plastycznym podlegają tylko autorskie modelowane elementy z ABS. Badanie polegało na przyłożeniu do węzła usztywnionego w jednym łożysku sił kolejno 1kN oraz 0,5kN na łożysku przeciwległym do usztywnionego oraz na łożysku ściany pod katem 90 stopni względem obciążanych i usztywnianych łożysk. Wywołano w ten sposób zjawisko wyrywania łożyska oraz wyginania węzła prowadząc do powstawania momentów zginających na łożysku usztywnionym. Wyniki pierwszego badania przedstawiono w formie bryły naprężeń generowanej automatycznie w oprogramowaniu Inventor.



Grafika 87.Wyniki analizy MES rozkładu naprężeń w strukturze obciążonej siłami osiowymi 3 prętów wywołujących obrót modelu. Na prawej grafice widoczny jest przekrój przez węzeł prezentujący podział na elementy składowe modelu.

Maksymalne naprężenia powstałe na modelu generowane na połączeniach poziomych dwóch trójkątnych elementów nr 1 uzyskują wartość 15,3MPa. Naprężenie to powstaje na zewnętrznej krawędzi mocowania przy styku z łbem śruby. Na grafice widać jak skręcanie węzła modyfikuje naprężenia, których bryła powinna być jednorodna ze względu na pominięcie zjawiska imperfekcji wykonawczych oraz symetryczność wszystkich elementów i całego węzła. Dominującą formą zniszczenia węzła jest rozerwanie połączenia między dwoma elementami nr 1. Od wewnętrznej strony węzła zjawisku temu zapobiega śruba pod elementem nr 2, z kolei na powierzchni ściany rombu znaczną część naprężeń przejmują wspomniane mocowania poziome śrubami M3, natomiast elementy nr 3 odpowiadają za minimalne rozchylenie obu elementów nr 1 w celu zmniejszenia tarcia łożyska w gnieździe. Głównym jednak elementem zwiększającym nośność jest obecność ścian elementów sąsiednich wszędzie wokół pojedynczego rombu. Cały węzeł jest pełny, co oznacza przenoszenie naprężeń nie tylko powłokowo, lecz również przez bryłę węzła. Duże powierzchnie ścian styku miedzy elementami nr 1 sprawiają, że na narożnych połączeniach nr 4 i 5 występują tylko siły ścinające bez wyrywania. To oznacza, że struktura pracuje w całej swojej objętości na dowolne naprężenia co nie miałoby miejsca, gdyby występowało osiowe rozciąganie śrub, wyrywające je lokalnie z gwintów. Maksymalna wartość 15,3MPa oznacza możliwość zmniejszenia węzła na potrzeby zwiększenia proporcji prętów do węzłów. Założeniem pozostaje możliwość łączenia węzła z prętami poprzez śruby M8 oraz zachowanie odpowiedniej przestrzeni miedzy połączeniami, aby uzyskać swobodę dostępu do wszystkich elementów w dowolnej chwili. Badanie ma na celu określenie o ile zmniejszyć można węzeł,

aby spełnić wszystkie wymagania. Zmniejszając wymiary elementów przy zachowaniu wielkości otworów i gwintów dla kolejnych wielkości węzła przeprowadzano takie same badania wytrzymałości. Wszystkie dane z przeprowadzonych prób zebrano w Tabela 23.

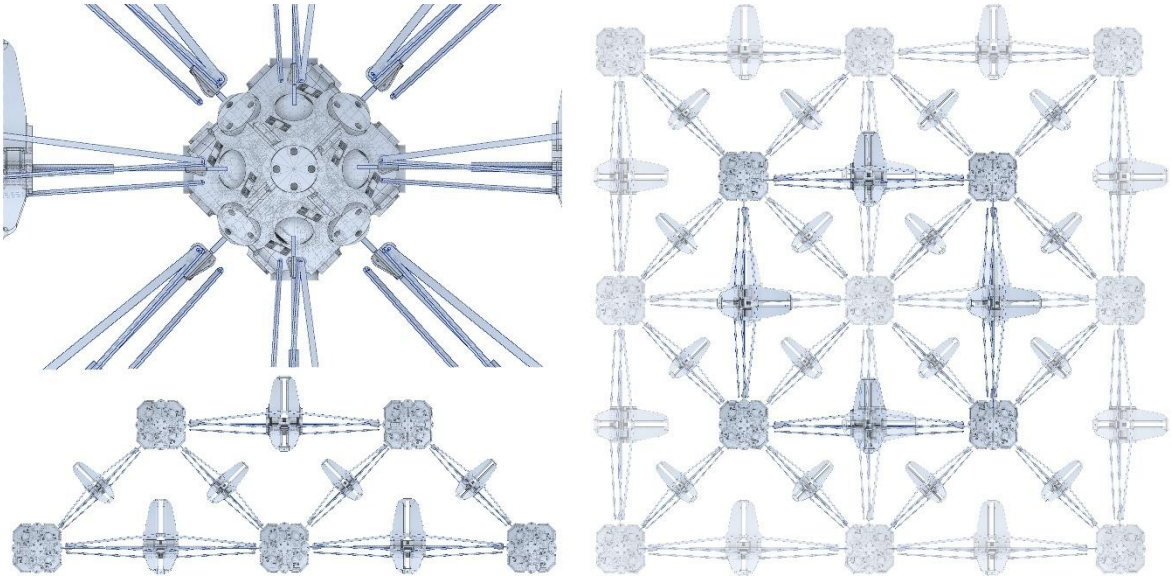
Tabela 23.Wyniki badań zależności wartości maksymalnych dopuszczalnych naprężeń w modelu od wielkości średnicy sfery w która wpisany może zostać węzeł.

Nr badania	1	2	3	4	5	6
Średnica [cm]	30	28	26	25	24,5	24,8
Maksymalne naprężenia[MPa]	16,7	19,5	22,1	23,6	24,4	23,9

W procesie badań udało się zmniejszyć rozmiar węzła z niefunkcjonalnego wymiaru 32cm średnicy do 24,8cm co daje maksymalne naprężenia mieszczące się w dopuszczalnym przedziale. Ze względu na funkcjonalność węzła i dostępność do wszystkich części elementów hipotetycznej struktury rozmiar węzła można było zmniejszać do 17,6cm co oznacza, że użycie lepszych materiałów lub ograniczenie maksymalnych przykładanych do struktury sił pozwoli na zmniejszenie średnicy. Jest ono ważne ze względu na redukcję momentów skręcających oraz na proporcje wymiarów między węzłami i prętami. Zakłada się użycie prętów o długości 1m, co daje proporcje pręta do węzła na poziomie 3,96. Jest to proporcja typowa dla struktur tworzonych z drewna i naturalnych materiałów gdzie głównym zjawiskiem pozostaje rozrywanie. Dla struktur kompozytowych wartości te pozostają bardzo zróżnicowane, lecz liczne badania pozwalają określić uzyskaną wartość jako standardową dla sztucznych materiałów pochodnych rafinacji[188] lub struktur z materiałów kompozytowych [189]. Przy zmianie materiałów na stal w węzłach proporcja może ulec zmianie do wartości 5,68 co nadal znacząco dystansuje system od proporcji systemów statycznych, lecz zapewnia funkcjonalność ruchu struktury.

9.4.1.2.3 Możliwości kształtowania przestrzennych struktur z użyciem systemowego rozwiązania modelu bryłowego

Przedstawiony na Grafika 88 układ przestrzenny stanowi wizualizację kratownicy dwupasmowej z uwzględnieniem proporcji między elementami. Pierwszym jest opisywany węzeł, drugim natomiast teleskopowany pręt opracowany przez autora i szerzej opisany oraz przebadany w pracy [139]. Układ ten wymaga co najmniej 3 podpór nieprzesuwnych sztywnych lub 4 podpór obrotowych oraz minimum 9 sztywnych połączeń węzeł-pręt. Jest to układ o sztywności pozwalającej na dowolne, duże zmiany geometrii w celu zmniejszania naprężeń. Każde zwiększenie liczby więzów oznacza przesztywnienie struktury i wywoływanie



Grafika 88.Koncepcja struktury możliwa do uzyskania w wyniku użycia systemowych węzłów opracowanych w opisanych badaniach. Węzeł w szczególności predestynowany jest do użycia w strukturach o powtarzalnych modułach strukturalnych.

naprężeń wewnętrznych każdorazowym teleskopowaniem. To oznacza, że przesztywniona struktura operować może jedynie w zakresie małych odkształceń, gdzie wewnętrzne naprężenia mają za zadanie kompensowanie naprężeń zewnętrznych.

Wyniki symulacji i modelowego złożenia w oprogramowaniu Inventor wskazują na możliwość użycia węzłów oraz prętów jako systemu strukturalnego. Zakres teleskopowania prętów wynosi 0,87-1,13 bazowej długości co uniemożliwia uzyskanie bardzo dużych zmian geometrii. Wymusza to stosowanie co najmniej dwóch wymiarów prętów, a różnicowania dokonuje się na podstawie symulacji dla dowolnie dużego, swobodnego teleskopowania.



Grafika 89. Złożony zestaw 5 węzłów gotowych do wykorzystania w strukturze fizycznej. Modele charakteryzują się powtarzalną budową, dużą tolerancją wykonawczą oraz elastycznością uzyskiwanych geometrii.

9.4.1.2.4 Badanie wpływu stopnia sztywności struktury na niedokładności wykonawcze zmian geometrii

W celu określenia wpływu niedosztywnienia lub przesztywnienia na strukturę zasymulowano pracę modelu prezentowanego na grafice podczas obciążania, przy zróżnicowanej liczbie sztywnych połączeń. Model o mniejszej dokładności niż podczas badania pojedynczego węzła przygotowano jako siatkę modelu zagęszczoną w miejscach połączeń, usztywniono w odpowiednich połączeniach oraz połączono z podłożem w sposób symulujący występowanie podpór – każdy skrajny narożny węzeł został wirtualnymi więzami połączony sztywno przez łożyska z idealnie sztywnym podłożem. Stworzyło to 4 podpory usztywnione upraszczające ruch struktury, ze względu na uniknięcie zjawiska braku powtarzalności ruchu. Przy usztywnieniu odpowiedniej liczby połączeń struktura podczas zmian geometrii wykazuje powtarzalność i sztywność na satysfakcjonującym poziomie. Dla prezentowanej na grafice prostej kratownicy przeprowadzono kilka scenariuszy badań obciążeniem. Podczas nich określano stopień zróżnicowania między żądaną geometrią, a ostatecznie uzyskaną.

Badanie polegało na przykładaniu sił zewnętrznych o wartościach kierunkowych X, Y, Z równych 1kN, 1kN, -1kN do modelu prostej kratownicy w Grasshopper gdzie z użyciem algorytmu ewolucyjnego uzyskiwano efektywne geometrie wynikowe. Następnie uzyskaną geometrię modelowano w oprogramowaniu Inventor poprzez odpowiednią translację bez obrotu wszystkich węzłów wraz z teleskopowaniem i obrotem prętów w granicach funkcjonalności. Dalej przykładano do struktury siły zewnętrzne, analogiczne do sił badanych

w Grasshopper. Wynikiem badania było przemieszczenie, obrót i zmiana naprężeń na strukturze o rzeczywistej liczbie sztywnych i obrotowych połączeń łożysk sferycznych. Wyniki badań zebrano w Tabela 24.

Tabela 24.Zestawienie wyników badania wpływu stopnia wyznaczalności statycznej modelu na jego maksymalne wartości deformacji.

Nr przypadku	Liczba więzów sztywnch poza podporami [stopień przesztywnienia]		1	2	3	4	5	6	7	8
1)	7 [-2]	Przemieszczenia węzłów [cm]	0	2,5	0	1,5	15,3	13,6	0	3,4
2)	8 [-1]		0	4,2	0	1,2	19,2	15,2	0	21,7
3)	9 [0]		0	1,5	0	1,3	17,2	6,2	0	4,1
4)	10 [1]		0	1,5	0	1,1	2,5	1,6	0	1,9
5)	11 [2]		0	1,7	0	1	2,1	1,5	0	0,9

Wyniki wskazują wpływ sztywności na występowanie zjawiska obrotu węzła. Ponadto wykazano, że przesztywnienie struktury pozwala uniknąć efektu rotacji węzła. Zależnie od lokalizacji przesztywnienia ma ono zróżnicowany wpływ na strukturę. Zauważa się, że dwukrotne przesztywnienie struktury skutkowało zniwelowaniem efektu obrotu na wszystkich węzłach. Na podstawie wyniku szacuje się, że bezpieczną wartością jest potrójne przesztywnienie, co oznacza pozostawienie jedynie 20 prętów ruchomymi. Jest to proporcja statycznych do ruchomych elementów porównywalna z wynikami badań [65], mimo iż obie analizy orientowane były na zupełnie różne wyniki. W badaniu szukano granicy sztywności, w celu uniknięcia obrotu węzła, natomiast w przytaczanych badaniach wynikiem miała być minimalizacja całkowitej energii struktury. Zauważa się wzrost liczby obracanych węzłów w badaniu nr 2, co oznacza możliwość obrotu takiej samej liczby węzłów we wcześniejszym badaniu, lecz niewystąpienie obrotu ze względu na przypadkowy układ sił. Wymusza to kształtowanie przesztywnień w strukturach responsywnych w celu całkowitego wyeliminowania możliwości obrotu. Po badaniu nr 3 strukturę poddano szeregowi dalszych obciążeń zmieniając ich układ i wartości. Podczas 7-krotnej zmiany sił zewnętrznych nie doszło do żadnego obrotu węzła. Oznacza to uzyskanie bezpiecznego zakresu pracy struktury. Wszystkie odnotowane obroty zanikały dopiero przy usztywnieniu bez przesztywnienia lub w dalszych badaniach rozdzielając naprężenia w inny sposób na sąsiednie elementy. Każdy obrócony węzeł generował na sobie maksymalne naprężenia struktury znacznie większe od węzłów zachowujących statyczność osiową. Wzrost liczby usztywnień i spadek liczby obróconych węzłów tłumaczy występowanie w pojedynczych przypadkach wyższych przemieszczeń. Maksymalne siły zginające ulegały rozdzieleniu na inne węzły. Największa składowa przemieszczeń dla poszczególnych węzłów była zróżnicowana. Dla dolnego pasma główne odkształcenia przyjmowały kierunek pionowy i skierowane były w dół. Z kolei dla węzłów górnego pasma odkształcenia charakteryzowały się bardzo płaskim układem według osi X oraz Y. Nadal występowała składowa Z, lecz stanowiła ona mniej istotną ilościowo część przemieszczenia.

Z badania wynika, że mimo wzrostu średniej wartości przemieszczeń węzłów ze względu na nieidealną sztywność opłacalne ze względu na wytrzymałość i bezpieczeństwo struktur responsywnych jest przesztywnianie węzłów o wartość do 3 więzów nadmiarowych. Przesztywnienie na łożyskach można dobierać zgodnie z kierunkami największych przemieszczeń węzłów, co predestynuje węzły dolnych pasm do usztywniania poziomych połączeń, a pasma górnego połączeń ukośnych, co może zminimalizować w najefektywniejszy sposób przemieszczenia.

9.4.1.3 Redukcja wpływu nieosiowości przenoszenia naprężeń z wykorzystaniem koncepcji węzła obrotowego centrycznego

Architektoniczne pojęcie ruchu odnosi się prawie wyłącznie do przemieszczeń struktur po specjalnie przygotowanych, wcześniej wyznaczonych trasach, prowadnicach, rolkach. Ruch jest najczęściej liniowy lub obrotowy. Oznacza to pełne uproszczenie problemu nieinercjalności ruchu. W symulacjach struktur responsywnych najczęściej pomijanym zagadnieniem jest fizyczna realizacja elementów, najwyraźniej odnotowywalna w węzłach. Najczęściej przyjmują one formę prostych sfer, wokół których osiowo poruszają się pręty. Responsywność konstrukcyjna jest nowym, jeszcze niewystarczająco przebadanym zagadnieniem, lecz w innych pokrewnych dziedzinach problem postulowany jest w licznych projektach i badaniach. Polega on na konieczności opracowaniu pręta, który dla dowolnego nieinercjalnego układu współrzędnych zachowa pełną osiowość zbiegu wszystkich schodzących się do niego prętów. Obecnie w skali architektonicznej nie istnieją takie rozwiązania. Struktury operują jedną płaszczyzną obrotu [75], lub wykorzystują sztywność struktury do generowania naprężeń znoszących się wzajemnie z wywoływanymi przez siły zewnętrzne [53]. W pracy modelowej często unika się poruszania zagadnienia sztywności elementów strukturalnych operując niesztywnymi elementami jak cięgna [43]. Ponadto skala modeli pozwala na znacznie większe niedokładności jeśli model nie musi odzwierciedlać wszystkich zjawisk jakie mogą wystąpić na pełnoskalowej strukturze [80], [99]. Nawet jednak w małej skali nie opracowano rozwiązań jakie mogłyby geometrycznie spełniać wszystkie wymagania responsywności. Rozwiązania można doszukiwać się w badaniach w dziedzinie mechatroniki. Na potrzeby budowy robotów o zmiennej geometrii realizujących podobny ruch do architektonicznych struktur responsywnych badano i konstruowano teleskopowane pręty oraz węzły. W pierwszej kolejności odpowiednio elastyczne dla uzyskania minimalnej motoryki [190], gdzie począwszy od lat 90.tych XX wieku zajmowano się strukturami nożycowymi, a następnie obrotowymi w węzłach, przechodząc przez optymalizacje układów prętów i połączeń naśladujących węzły [191], dochodząc finalnie do koncepcji węzłów centrycznych najpierw w skali dwuwymiarowej [192], a następnie trójwymiarowej uzyskując węzły o funkcjonalności w dowolnym nieinercjalnym układzie przy pełnym zachowaniu osiowości obrotu prętów w dowolnej skali obrotu [176]. Z czasem badaniom podlegał potencjał ruchu struktury z tak elastycznymi systemami, gdzie szukano granic motoryki, programując całe sekwencje zmian geometrii na potrzeby sterowania ruchem tocznym kratownic. Następnie opracowano możliwości zmian topologicznych struktur, co było efektem modyfikacji jedynie w zakresie węzłów i możliwości swobodnego podłączania i odłączania prętów [193]. Rozwiązanie to spełnia wszystkie geometryczne wymagania kratownicowych struktur prętowych, lecz strukturalnie nie jest aplikowalne w żadnej formie ze względu na problem skali sił. Węzły opracowane na potrzeby mechatroniki charakteryzują się niską nośnością. W skali robotycznych kratownic osiągały granice wytrzymałości bez względu na użyte materiały. Skala architektoniczna pozostaje dla nich niedostępna, lecz możliwe jest wykorzystanie części rozwiązań i ich transponowanie na pole badań architektonicznych.

9.4.1.3.1 Budowa modelu węzła centrycznego – założenia teoretyczne

Statyczne połączenie dwóch prętów w jednym węźle określa ich wzajemny kąt przestrzenny i usztywnia je w jednej pozycji. Responsywność, wymagając możliwości obrotu, uniemożliwia usztywnienia prętów kątami, które dla takiej struktury pozostają zmienne w pewnym zakresie obrotu obu elementów. Oznacza to konieczność opracowania węzłów, dla których oś obrotu każdego z prętów będzie przechodziła przez punkt centralny węzła. Wymusza to opracowanie koncepcji węzła centrycznego, niwelującego problem momentów obracających, a co za tym idzie pozwalającego na uzyskanie sztywności węzła w nieinercjalnym układzie odniesienia przy zastosowaniu minimum 2 prętów, umożliwiając realizacje struktur responsywnych tożsamych kształtami i topologią z obiektami statycznymi bez konieczności przesztywniania, czyli uzyskując możliwość zastąpienia do 100% prętów siłownikami. W celu zniwelowania wpływu czynnika obrotu węzła na pracę układu opracowano kolejną wersję jego modelu nawiązującą do węzłów mechatronicznych stosowanych w

Variable Topology Truss (VTT). Model oparto o kilka zasad ograniczeń węzła względem idealnych modeli symulowanych.

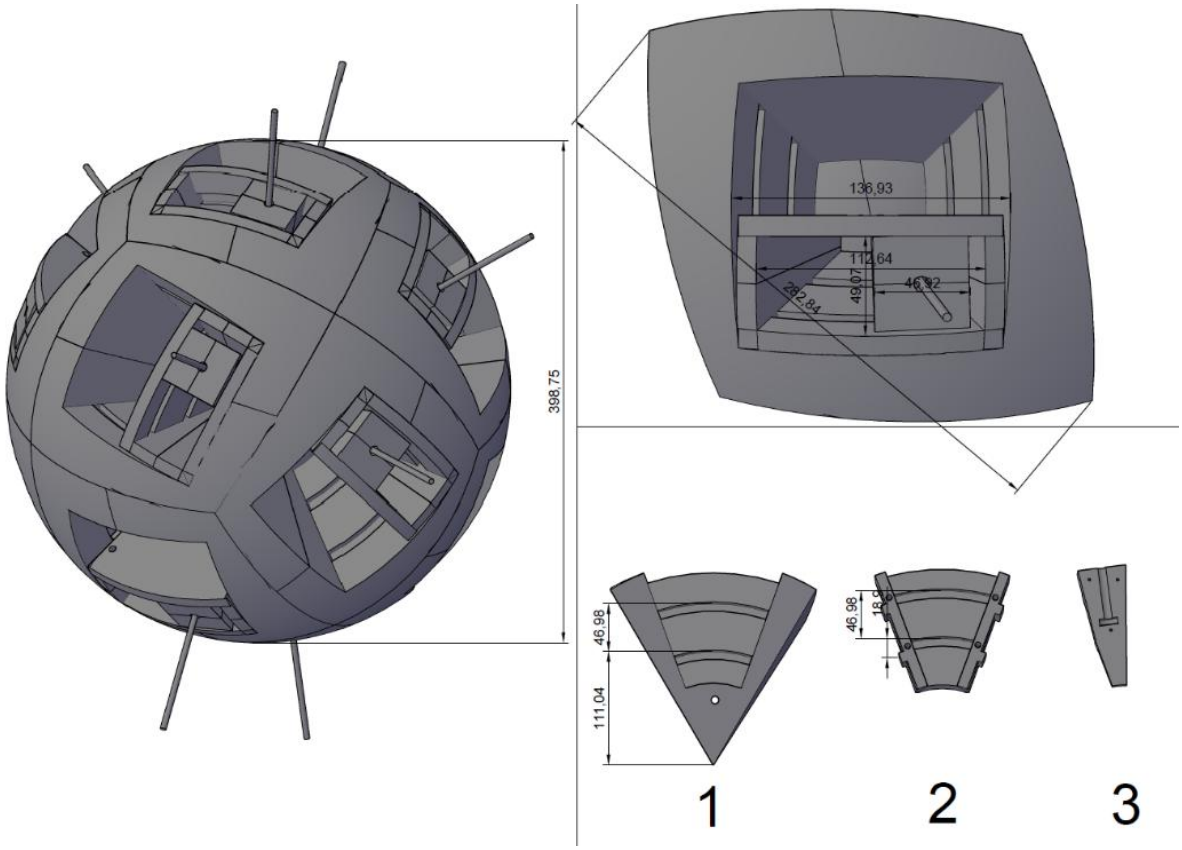
1)Określono dopuszczalną liczbę połączeń jako równą 12 w układzie dwunastościanu rombowego analogicznie do poprzedniego badania w celu umożliwienia modelowania analogicznych układów topologicznych.

2)Założono możliwość obrotu wyłącznie w zakresie geometrycznym pojedynczego rombu dla jednego pręta - w modelu centrycznym gdzie pręty nie mogą wykorzystywać wspólnej przestrzeni ruchu, a ograniczone są do własnych indywidualnych brył obrotu zakres ruchu wyznaczany jest jedynie przez liczbę dopuszczalnych połączeń oraz grubości ścian elementów ograniczające ruchomość, lecz wymagane ze względu na wytrzymałość węzła.

3)obrót ma odbywać się w każdym kierunku, co oznacza dwie płaszczyzny obrotu

4)Idealna trajektoria ruchu musi zawsze centrować oś pręta na punkt centralny węzła bez uwzględnienia imperfekcji wykonawczych i niedokładności ruchu.

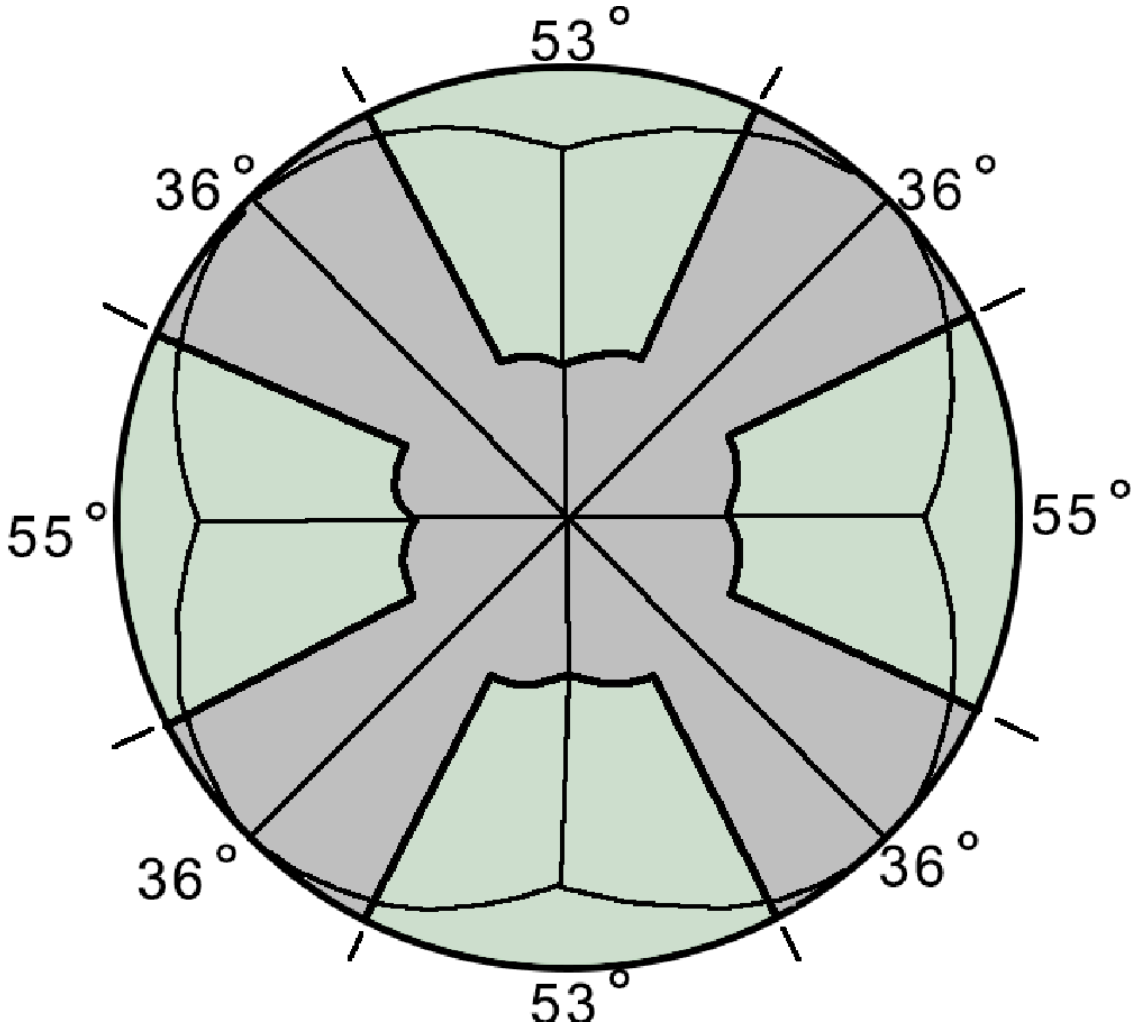
Model opracowano w programie Autodesk AutoCad, a następnie złożono w programie Inventor. Główne założenie modelu opierało się o inny sposób ruchu obrotowego. Nie jest możliwe zamodelowanie łożyska skupiającego centrycznie więcej niż 2 pręty. W praktyce oznaczało to wymuszenie użycia prowadnic utrzymujących kierunek pręta jako zawsze prostopadły do sfery węzła. Nadal jednak zasadę dwuelementowego łożyska zastosowano w postaci elementów prowadnicowych i umieszczanych na prowadnicach jednocześnie. Model składa się z 3 kolejnych segmentów ruchomych w różnym stopniu. Zewnętrzny segment pozostaje stały, nie podlega obrotowi. Środkowy jest obrotowy w płaszczyźnie XZ centrując zawsze pręt do punktu środkowego, natomiast wewnętrzny segment analogicznie do środkowego obracając się w płaszczyźnie XY również centruje pręt. Finalnie ruch obrotowy pręta zawsze pozostaje składową obrotu segmentów środkowego i wewnętrznego.



Grafika 90.Koncepcja modelu węzła centrycznego z przedstawieniem elementów składowych powtarzalnej struktury dwunastościanu.

Zamodelowano widoczny na Grafika 90 węzeł o średnicy 39cm którego bryła podobnie do wcześniejszego układu jest dwunastościenna. Romb nie jest optymalnym kształtem dla modelowanej formy ruchu, gdyż sposób ruchu pręta wymusza ostrosłupowe wycięcie w bryle, lecz to konieczność zachowania szkieletu nośnego ściany wymusza największą redukcję motoryki. Względem poprzedniej formy węzła prezentowany odznacza się znacznie mniejszym zakresem ruchu, który zamiast 112 stopni w każdym kierunku przyjmuje wartość kolejno 40 stopni w osi XZ oraz 34 stopnie w osi YZ. Na Grafika 91 przedstawiono proporcje funkcjonalnej części węzła do statycznej w przekroju ukośnym do obu mierzonych płaszczyzn. Pręt jednak zgodnie z założeniami pozostaje zawsze zorientowany osiowo do centrum pręta. Oznacza to, że model nie wymaga żadnych usztywnień i sztucznych zmian stopni swobody w celu umożliwienia ruchu obrotowego. Wszystkie węzły zawsze pozostają osiowo zorientowane unikając wystąpienia zjawiska obrotu. Ruch realizowany jest poprzez prowadnice umieszczane parami na przeciwległych ścianach umożliwiając ruch elementów nr 2 oraz 3. Zakłada się występowanie momentów zginających, wynikających z imperfekcji wykonawczych lub tarcia podczas ślizgu łożysk na prowadnicach przy obrocie prętów. Zjawisko niwelowane jest uwzględnieniem podwójnych łożysk oraz możliwie dużym ich rozsunięciem w celu rozłożenia momentu zginającego na mniejsze siły zginające nieoptymalnie prowadnice. W gnieździe każdego połączenia można zamocować śrubę M6 o standardowym łbie schowanym w bryle węzła. Wytrzymałość modelu ściśle związana jest z wytrzymałością prowadnic jako najmniej odpornych elementów, których nośność na siły rozciągające da się najprościej zwiększać poprzez pogrubianie prowadnic. W dalszej kolejności możliwe jest pogłębienie ich osadzenia w żłobieniach zewnętrznych elementów. Dzięki zachowaniu osiowości węzła centrycznego nie wymaga on badań przemieszczeń. Te mogą wystąpić jedynie przy przeciążeniu i zgięciu modelu. Oznacza to konieczność przeprowadzenia jedynie badań wytrzymałościowych w kilku sytuacjach obciążenia. Trudnością pozostaje jednak uzyskanie odpowiedniego stopnia poślizgu podczas pracy, co wymusza stosowanie stalowych prowadnic nawet dla plastikowych modeli badawczych struktury.

9.4.1.3.2 Badania modelu geometrycznego węzła z użyciem analizy MES



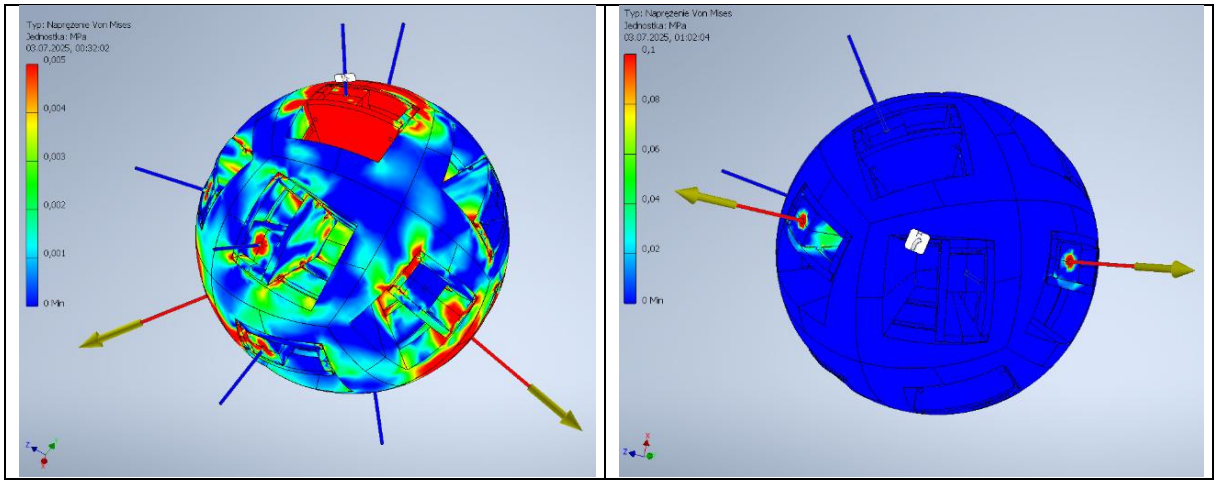
Grafika 91.Schemat zakresów ruchu poszczególnych połączeń węzła z prętami. Kolorem zielonych przedstawiono przestrzeń ruchu pojedynczych połączeń. Kolorem szarym zaznaczono martwą strefę węzła służącą równomiernej dystrybucji naprężeń w bryle węzła.

Dla przedstawionego modelu wykonano badania ujednolicenia pracy struktury na osiowo przykładane siły oraz odporności na wyginanie prowadnic gniazda. Model przeanalizowano z użyciem MES w oprogramowaniu Inventor. Podzielono go na 1 008 491 węzłów z uwzględnieniem gradacji wielkości elementów z uwagi na dokładność geometrii. Nie uwzględniano zjawiska tarcia i ślizgu połączeń na prowadnicach. Na jednym połączeniu zamodelowano pełne usztywnienie, natomiast na dwóch kolejnych połączeniach dwie siły rozciągające o wartości 100N każda. Ich układ przedstawiony został na grafikach wyników bryły naprężeń. Program obliczał deformacje i rozkład naprężeń z użyciem liniowej analizy.

W wyniku przyłożonych sił maksymalne powstałe naprężenia mierzone jako naprężenia zredukowane (von Misses) wynosiły 14,45MPa. Generowane były zgodnie z założeniami na prowadnicach oraz w najbliższym ich otoczeniu. Duży wpływ na ich wartość miał ortogonalny kształt mocowania prowadnic do ścianek wnęk gniazd. W drugiej próbie przy modyfikacji ortogonalnego układu na zaokrąglony promieniem 0,2cm naprężenia wyniosły jedynie 12,1MPa. Układ naprężeń pokazano w dwóch kolejnych bryłach na dwóch grafikach dla pokazania skali rozkładu wartości. Stosunkowo mała objętość węzła reaguje na powstałe naprężenia. Oznacza to autonomiczność reakcji każdego połączenia na zewnętrzne siły. Pierwsza Grafika 92 prezentuje bryłę naprężeń do 0,005MPa, druga do 0,1MPa. Dla pełnej skali zakresu bryła naprężeń nie daje widocznych wyników, gdyż główne naprężenia

rozchodzą się wewnątrz modelu. Zauważalna jest różnica wytrzymałości modelu na ściskanie oraz rozciąganie. Podczas ściskania siły rozprowadzane są na ściany rombu zewnętrznego (elementów nr 1) i dalej na sąsiednie elementy co pozwala na uzyskanie równomiernego obciążenia. Znaczna część wszystkich elementów składowych węzła bierze udział w przenoszeniu naprężeń. W przypadku drugim obciążenia gdzie zwroty sił uległy zmianie wywołując ściskanie maksymalne naprężenia wyniosły 8,71MPa, co oznacza, że wartości sił mogły wzrosnąć maksymalnie do 392N przed przekroczeniem dopuszczalnych dla PLA naprężeń.

Wyniki pokazują, że możliwe jest zmniejszenie grubości ścian zewnętrznych wszystkich rombów co najmniej trzykrotnie do wartości 0,7cm. To pozwoli na zwiększenie zakresu obrotu pojedynczego połączenia z 40 do 45 stopni oraz z 34 do 39 stopni. Model jednak posiada małą wytrzymałość na zginanie prowadnic. Moment obracający wybijający połączenie z osiowej pracy, a tym samym z przecięcia osią punktu centrum węzła jest mały. Oznacza to, że konieczne jest zapobieganie zjawisku zginania. Rozwiązaniem architektonicznym jest użycie kołnierzy na każdym końcu pręta. Kołnierze te byłyby równe zakrzywieniem promieniowi węzła stale utrzymując centryczną orientację prętów.



Grafika 92.Wyniki graficzne analizy MES modelu węzła centrycznego. Na lewej grafice przedstawiono wyniki ze sztucznym ograniczeniem zakresu do 5kPa, natomiast z prawej strony przedstawiono nieskalowany wykres graficzny naprężeń dochodzący do 0,1MPa.

9.4.1.3.3 Zjawisko obrotu wspólnego gniazda z węzłem

Sam zakres użytkowy węzła jest również zredukowany względem poprzedniej wersji. Występują w nim martwe strefy, czyli kąty których model nie jest w stanie uzyskać. Gdy w węźle schodzą się 2 pręty, strefy te nie występują ponieważ nawet przy skrajnym wychyleniu gniazda mocowania jednego pręta dalszy obrót jest możliwy poprzez obrót całego węzła wraz z gniazdem wykorzystując zakres ruchu gniazda drugiego pręta. Taki ruch jest poprawny, wywoła większe momenty zginające i jest bardziej niebezpieczny ze względu na podatność na wyłamanie, lecz pokrywa w całości martwe strefy obrotu. Przy co najmniej 3 prętach jest on jednak znacznie zredukowany i może wystąpić tylko w zakresie ograniczonym przez wszystkie pozostałe gniazda naraz. Jeśli choć jedno gniazdo uzyska maksymalne wychylenie, dalszy obrót węzła nie może być kontynuowany. Oznacza to, że swoboda ruchu w węźle jest coraz mniejsza dla większej liczby prętów i minimalnie wynosi 40 stopni oraz 34 stopnie zgodnie z pierwotnymi założeniami geometrycznymi.

9.4.1.3.4 Wnioski z analiz modelu

Kolejne modele węzłów przedstawione w rozdziale pozwalają na stworzenie struktury responsywnej o różnym stopniu swobody, operującej różnymi metodami ruchu– od struktur o małych deformacjach do struktur o dużych deformacjach, lecz skala sił jakie udaje się efektywnie przenosić pozostaje znikoma w odniesieniu do realnych problemów strukturalnych. Wykonanie węzła o dowolnym stopniu swobody obrotu prętów jest niemożliwe przy

zachowaniu odpowiedniej nośności i konieczności zbiegu kilku prętów w jednym węźle. Nadal jednak nakreślony system daje korzyści względem obecnych rozwiązań uzdatnianych funkcjonalnie wtórnie o możliwość obrotu. W toku dalszych badań należy zoptymalizować wielkości elementów węzła nr 2 w celu minimalizacji liczby wymaganych do usztywnienia połączeń dla uzyskania żądanej wytrzymałości skrętnej oraz zaproponować sztywniejszy i mniej podatny system prowadnic, możliwy do implementacji w węzłach o możliwie dowolnej liczbie połączeń.

9.5 Model struktury półautomatycznie ekspandującej

Dotychczas struktury responsywne ograniczono do modeli zmieniających geometrię w odpowiedzi na zewnętrzne siły. Celem ruchu pozostawała minimalizacja naprężeń. Poza nią da się wyróżnić inne motywatory ruchu. Przykładem jest wprowadzenie zmienności w celu zmiany przestrzeni użytkowej struktury. Model orientowany na dostosowanie do intensywności użytkowania może zmieniać swoją geometrię i skalę zależnie od zapotrzebowania na kubaturę lub powierzchnię wewnątrz. Przykładem użycia może być zadaszenie hali dla wydarzenia masowego lub przestrzeń rekreacyjna. Obiekty wolnostojące, nie związane trwale z gruntem proste w rozłożeniu, o pewnej skali dowolności ekspandowania mechanicznego stosowane były w architekturze, lecz dotyczyły wąskiego zakresu obiektów przemysłowych lub budowlanych jak żurawie transportowe[194], konstrukcje nośne wiertnic morskich, czy drobne elementy mechaniczne o charakterze komercyjnym[195]. Model taki może znajdować zastosowanie w ograniczonych przestrzeniach, gdzie w czasie rzeczywistym konieczne jest operowanie wymiarami obiektów sąsiednich tak, aby przy zmianie kubatury wypełniały zawsze całą dostępną przestrzeń, lecz pozostawały w ciągłym ruchu. Struktura zdolna do takiego ruchu musi posiadać zdolność ekspansji automatycznej lub wspomaganej ręcznie oraz elastyczną powłokę zdolną do zmiany powierzchni. Musi być także wyposażona w system zarządzania ekspansją, co wymusza opracowanie „procedury wzrostu”. W historii architektury trudno doszukiwać się rozwiązań podobnych zagadnień. Najbliższe porównania struktury ekspansywnej odnieść można do „Fun Palace” Cedric’a Price’a, którego fizyczną realizacją odbiegającą od pierwotnych założeń było „Interaction Center” z 1976 rozebrane w 2003 roku. W swoim pierwotny założeniu Fun Palace miało stanowić prosty ortogonalny przestrzenny szkielet konstrukcyjny umożliwiający umieszczanie i przemieszczanie zróżnicowanych modułów użytkowych w bardzo dowolny sposób. Wspólną cechą Fun Palace i opracowywanego modelu jest możliwość ekspansji struktury. Automatyczna miała być możliwość rozbudowy konstrukcji poprzez samojeżdżące dźwigi budowlane. Koncepcja powstając w czasach największego rozkwitu teoretycznych obiektów niemożliwych do wykonania i użytkowania nigdy nie uzyskała większej części funkcjonalności, której teoretyczne koncepcyjne podstawy zostały skrótowo przedstawione w szkicach i zapiskach autora.

9.5.1 Teoria ruchu modelu ekspandującego

Sterowanie strukturą ekspandującą odbywa się w podobny sposób do dotychczas opisywanych rozwiązań. Bodźcem mierzonym z pewną częstotliwością, od którego zależy decyzja i ruch struktury nie są obciążenia zewnętrzne, lecz chwilowe użytkowanie wnętrza, stopień obłożenia przestrzeni. Struktura wymaga programu analizy danych, system obliczania geometrii musi być ograniczony maksymalnymi parametrami mechanicznymi jak wysuw prętów, wytrzymałość na zginanie, szybkość reakcji, lecz różnica zauważalna jest w celowości ruchu. Dotychczasowa efektywność przez zmniejszenie naprężeń zastępowana jest komfortem użytkowników, bezpieczeństwem użytkowania, oszczędnością energii na ogrzanie przestrzeni, której zapotrzebowanie jest zmienne zależnie od aktualnej kubatury. Holistyczny system zarządzania strukturą uwzględnia wszystkie te parametry i nadaje im wagi zależnie od pewnych bazowych założeń lub dynamicznie w wyniku analizy rosnącej bazy historii zmian, na przykład poprzez uczenie maszynowe. Bazując więc na tym samym szkielecie systemu nadawane są inne motywatory ruchu.

Struktura zgodnie z założeniem powinna możliwie samodzielnie modyfikować swoje wymiary prowadząc do zmian powierzchni i kubatury. Zmiany te nie powinny być ograniczone, co oznacza, że to nie liczba cykli wzrostu decyduje o maksymalnym rozmiarze struktury, lecz nośność jej elementów. Proces powinien być całkowicie liniowy, dlatego też podczas całego procesu wzrostu należy zapewnić pełną funkcjonalność struktury. Stopień autonomiczności obsługi procesu może być rozpatrywany wtórnie po ustaleniu sposobu wzrostu obiektu responsywnego.

Wzrost można realizować na dwa sposoby. Pierwszym jest ciągłe teleskopowanie prętów. Model analogicznie do wydłużanej wiertnicy bazuje na segmentowanej śrubie lub gnieździe śruby. Po uzyskaniu odpowiedniej długości siłownika możliwe jest zamocowanie przedłużki. Metoda ta zachowuje oryginalną topologię struktury. Przez okres użytkowania struktury liczba prętów, ani węzłów nie ulega zmianie. Problemem pozostaje szybki spadek wytrzymałości przy wydłużaniu prętów. Wartość ta jest wyznaczana ze wzoru na siłę krytyczną wyboczenia. Na etapie przygotowania struktury należy przewidzieć docelową liczbę prętów. Znacznie ogranicza to możliwości wzrostu.

Drugą metodą jest wzrost przez zagęszczanie siatki. Podczas wzrostu przez teleskopowanie należy określić moment maksymalnego wysuwa pewnej grupy elementów między którymi komórki przestrzeni pozostają wystarczająco duże, aby osadzić nowy zestaw elementów pozwalających na dalszy wzrost struktury. Ekspansja przez zagęszczanie pozwala na utrzymanie stałych zakresów długości prętów. Początkowa liczba prętów struktury nie determinuje maksymalnych rozmiarów obiektu. Wzrost struktury w znacznie mniejszym stopniu wpływa na maksymalne naprężenia powstające w elementach nośnych. Siła krytyczna zależna jest od długości wyboczeniowej osiągającej pewną maksymalną wartość. Zwiększeniu ulegają jedynie wartości obciążenia grawitacyjnego obciążeniem własnym. Pozwala to na znacznie większe spektrum zmian kubatury. Przed osiągnięciem naprężeń maksymalnych przeprowadzić można więcej iteracji wzrostu struktury. Wzrost topologiczny charakteryzuje się znacznie większym stopniem skomplikowania od topologicznej stałości ze wzrostem długości prętów, lecz ze względu na większy potencjał wzrostu uznaje się go za odpowiedni sposób działania modelu.

9.5.2 Koncepcja nazewnictwa elementów na cele nadzoru ekspandowania struktury

Zakłada się, że zmianie podczas wzrostu ulega tylko jedna komórka elementów naraz. Najczęstszymi układami siatek powłok, co określono wcześniej są układy bazujące na kwadracie. Ze względu na pożądane właściwości samosztywności struktur, do analizy włączono również układy trójkątne. Dla obu układów przedstawiono system wzrostu struktury w oparciu o rozliczenie struktury jednej komórki modelu. Na grafice przedstawiono schematycznie proces wzrostu. Nie uwzględnia on na obecnym etapie dokładnych geometrii. Służy celom porównawczym w kwestii doboru prostego i efektywnego układu topologicznego na którym bazować ma cała struktura. W celu uproszczenia jej wzrostu zakłada się, że topologie trójkątne z czworobocznymi nie będą łączone, choć geometrycznie jest to w pełni osiągalne. W układach trójkątnych wymianie podczas pojedynczego procesu wzrostu podlega segment trójelementowy. Zamieniany jest na układ dziewięcioelementowy zgodnie z topologią przedstawioną na Grafika 95. Z kolei w strukturach o czworokątnych modułach segmenty czteroelementowe zastępowane są dwunastoelementowymi. Kolejnym rozpatrywanym parametrem jest liczba pasm poziomych elementów. Dla struktur dwupasmowych omawianych dotychczas zawsze jedno pasmo teleskopowane jest intensywniej niż przeciwległe. To oznacza, że procesowi wzrostu podlega cały dwupasmowy moduł. Liczba modułów wymienianych jednocześnie wzrasta z 4 do 32. Podobna proporcja występuje w strukturach o trójkątnych modułach. Wymusza to kształtowanie struktur ekspandujących jako jednopowłokowych. Wymusza to użycie węzłów zdolnych do odpowiedniego usztywnienia struktury oraz systemu zarządzania ruchem przewidującego naprężenia ze szczególnym uwzględnieniem lokalnej i globalnej krzywizny Gaussa, która zawsze musi przyjmować

jednakowy znak na całej powierzchni struktury. Zmiana znaku interpretowana jest jako przegięcie powłoki, które prowadzi do zmiany rozkładu naprężeń i kaskadowej reakcji skutkującej zniszczeniem obiektu. Uwzględnienie zjawiska jest konieczne i znacząco redukuje zakres możliwych do przyjęcia geometrii. Przegięcie częściowo może być niwelowane przez sposób mocowania elementów do węzła lub sposób formowania węzła podczas wzrostu. Wystarczy, aby w początkowym stanie struktury, gdy jest ona w swoim najmniejszym układzie wszystkie węzły miały elementy połączone pod kątami maksymalnie innymi do półpełnych. Każdy kolejny etap wzrostu prowadząc do zwiększenia kubatury i powierzchni powłoki rozkładać będzie tę samą sumę kątów mierzoną w danym przekroju pionowym między coraz liczniejszy zbiór elementów. Oznacza to również, że struktura posiada drugie ograniczenie wzrostu jakim jest maksymalny dopuszczalny kąt między dwoma sąsiednimi elementami. Nie może on przekroczyć 180 stopni, aby nie doprowadzić do przegięcia struktury, lecz należy również zachować pewien margines odkształcalności i niedokładności wykonawczych. Zgodnie z powszechnymi praktykami inżynierskimi należałoby przyjąć za całkowite minimum 10°. Oznacza to możliwość rozrostu powłok do około 18-23 prętów szerokości w przekroju. Przy założeniu maksymalnej długości 2m pojedynczego pręta i konieczności zachowania kształtów łukowych. Licząc, ze średnia liczba segmentów w przekroju wynosi 20, a każdy kąt między sąsiednimi elementami jest równy 10°, co jest wartością graniczną spełniającą warunek rozpiętość między podporami może osiągnąć wartość zgodną ze wzorem:

$$\boldsymbol{D = \frac{L}{N}\frac{sin\left(\frac{(N-1)\alpha}{2}\right)}{sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)} = 2\frac{sin(19*10/2)}{sin(10/2)} \approx 22,9[m]} \quad (9.1)$$

Gdzie:

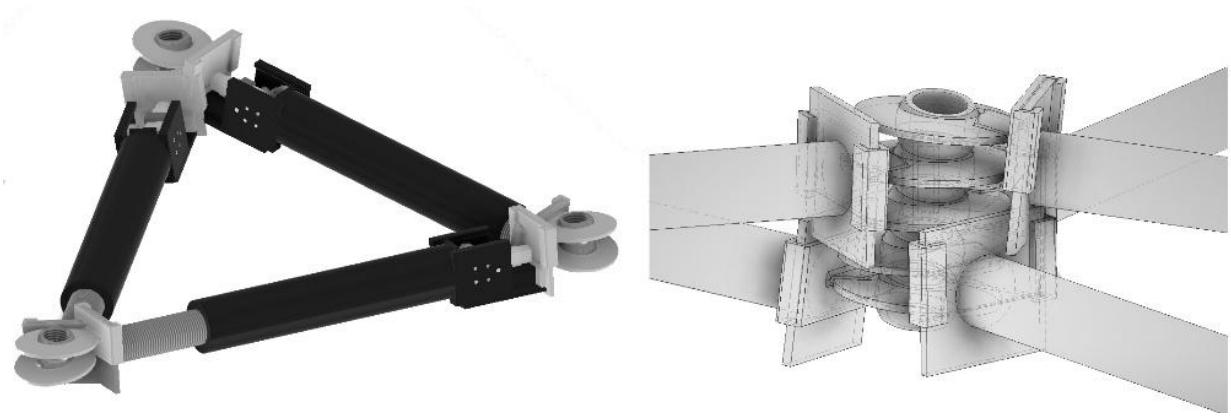
D-maksymalna średnica struktury do zamodelowania przy uwzględnieniu zjawiska przegięcia i schematycznych niedokładności

L- Długość pojedynczego siłownika/pręta [m]

N- Liczba elementów tworzących geometrię w przekroju między dwoma oddalonymi od siebie podporami

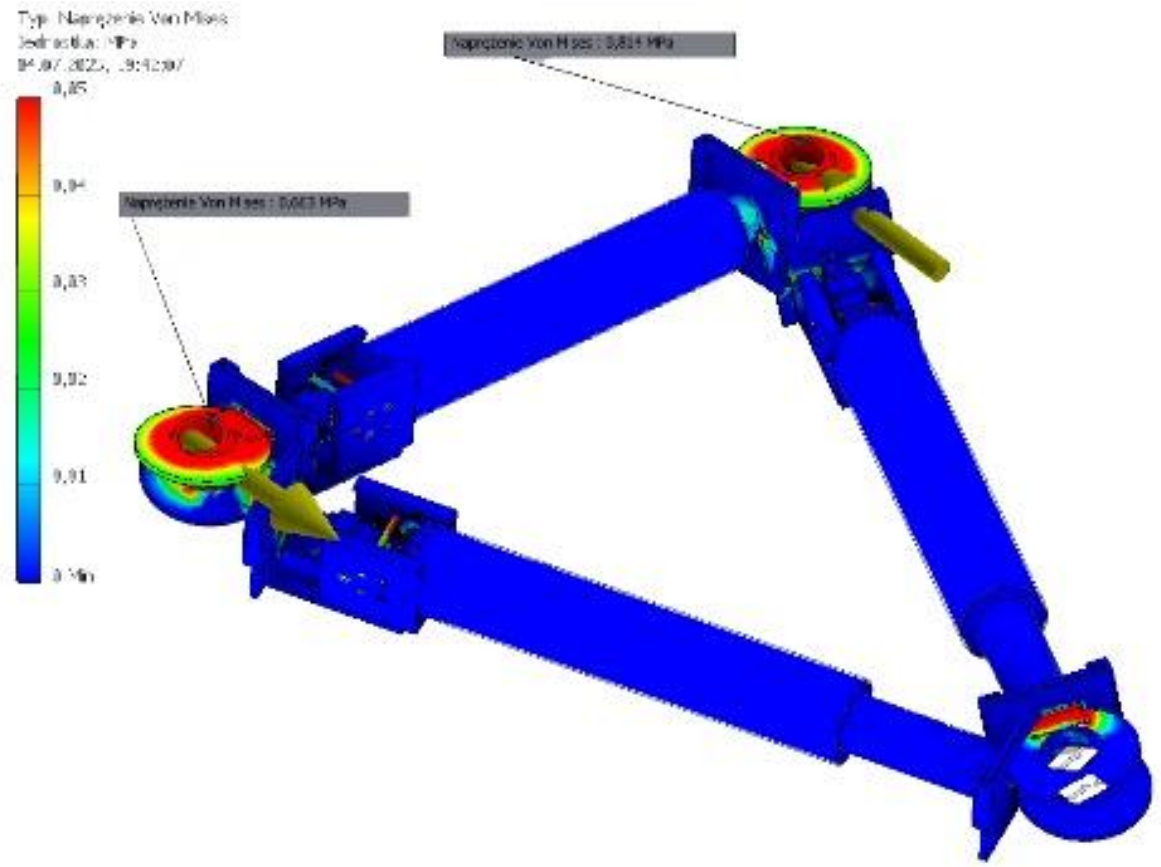
Dla zapewnienia bezpieczeństwa użytkowania struktury możliwe jest kształtowanie geometrii powłoki, która kąt minimalny zachowuje w obu kierunkach wzajemnie prostopadłych. Wtedy wyznaczona wartość stanowi średnicę maksymalnego okręgu możliwego do uzyskania dla modelowanej struktury. Jeśli jednak wystarczające bezpieczeństwo zapewnia struktura zakrzywiona jednopłaszczyznowo możliwe jest kształtowanie dowolnie długich układów podłużnych lub korytarzowych.

9.5.3 Model pełnej geometrii pręta oraz samoformującego węzła



Grafika 93.Model samoformującego węzła o znacznej nieosiowości. Model nie jest limitowany liczbą połączeń wokół pojedynczego węzła.

Na podstawie przyjętych wytycznych opracowano model symulacyjny pręta wraz elementem mocującym, stanowiącym część węzła. Model składa się z prostego siłownika śrubowego zakończonego z obu stron stalowymi płytami czołowymi spawanymi do teleskopowanej części. Płyty stanowią szyny osadzane na prowadnicach. Prowadnice z kolei łączone są obrotowo w jednej płaszczyźnie z obręczami, w których w sferycznym łożysku osadzony jest pierścień węzłowy. Obrót umożliwia teleskopowanie pręta bez zmiany orientacji osi połączenia węzłowego. Wszystkie siłowniki łączą się poprzez wspólny rdzeń węzła stanowiący pręt o przekroju pierścieniowym cienkościennych o średnicy 8cm i grubości ściany 0,3cm. Pierścienie osadzane bezpośrednio na prętach rdzeniowych mają swobodę ruchu w zakresie 10 stopni wychylenia od osi obręczy, stanowiąc mechaniczne ograniczenie kąta sąsiednich prętów. Zapewnia to znacznie lepszą równomierność naprężeń. Same pierścienie muszą być zabezpieczanie przed zsunięciem z pręta poprzez osadzanie piast w przygotowanych wcześniej żłobieniach na pręcie. Pręty mają możliwość regulacji wysuwu w zakresie 110cm-198cm. Nieuzyskanie skuteczności teleskopowania o wartość większą, niż dwukrotność długości początkowej ma wpływ na sposób pracy z modelem, co podlega analizie w dalszej części pracy. Proporcja grubości pręta do jego długości zapewnia bezpieczne użytkowanie struktury, nawet w sytuacji dominacji momentów zginających nad siłami osiowymi. Wartość siły krytycznej zakłada się, że przyjmie wartość znaczną w stosunku do wartości siły rozrywającej na styku węzła i pręta blachy czołowej. Sam węzeł złożony jest z profilu cienkościennego, na którym osadzane są kolejne łączniki prętów. Zauważa się znaczną niecentryczność pracy węzła widoczną na Grafika 93. Każdy kolejny pręt wyprowadzony z węzła generuje coraz większe momenty, dlatego też należy zachować bezpieczne limity naprężeń dla kształtowników cienkościennych węzłów. Ponadto momenty gnące mogą być redukowane skutecznie przez zmniejszenie grubości pojedynczego pierścienia. Zwiększenie jego szerokości wraz z poszerzeniem obręczy może efektywnie równoważyć wytrzymałość obniżaną zmniejszaniem grubości. Każde zmniejszenie grubości obręczy zmienia kąt jej ścięcia. W założeniu modelu maksymalny obrót dwóch sąsiednich prętów na jednym pręcie powoduje oparcie wzajemne obręczy w postaci styku liniowego, nie punktowego. Oznacza to,

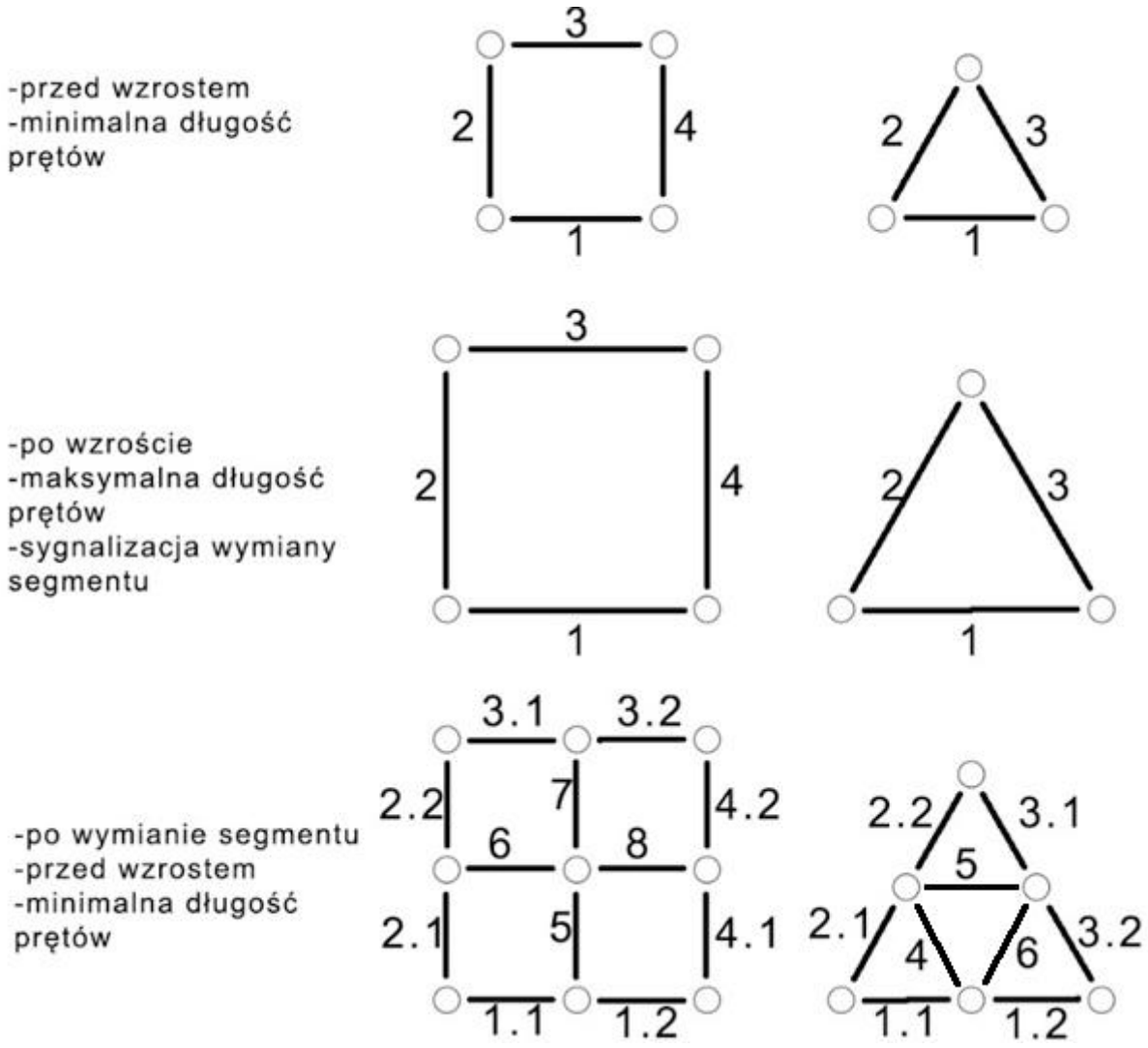


Grafika 94.Wynik analizy MES modelu trzyelementowej struktury samoekspandującej. Główne naprężenia zgodnie z wykresem zlokalizowane są w otoczeniu węzłów.

że dwa pręty w maksymalnym wychyleniu względem siebie wytwarzają dodatkowe usztywnienie. Ilość prętów schodzących się w jednym węźle ograniczona jest jedynie wytrzymałością skrętną rdzenia węzłowego i jego długością. Dla układu 3 połączonych prętów wykonano analizę metodą elementów skończonych przy założeniu nieliniowego plastycznego zachowania elementów. Jeden węzeł stanowił usztywnienie niepodatne na odkształcenia. Dwa pozostałe zostały obciążone prostopadle do osi rdzeni pręta siłami o wartości 500N. Analiza MES dowodzi, że największe naprężenia o wartości 4,06Mpa w modelu występują na połączeniach węzłowych. Średnia naprężeń na elementach nośnych wyniosła 0,13MPa. Analizie nie podlegały elementy mechaniki precyzyjnej, które wymagają osobnego opracowania. Taki rozkład naprężeń pozwala na bezpieczniejsze użytkowanie modelu wykonanego z opisywanych elementów systemowych ze względu na wyraźną sygnalizację odkształceń informujących o przeciążeniu modelu. Wzrost naprężeń na obręczy objawia się jej zgięciem i nieosiowością przenoszenia sił podłużnych. Mimo wykrzywienia węzła nie ulega on wykręceniu ze względu na usztywnienie sąsiednimi prętami poprzez górny i dolny pierścień. Dlatego też dla skrajnych połączeń prętów ważne jest mocowanie piast generujących część opisanej formy usztywnienia. Finalnie struktura wyraźnie sygnalizuje przekroczenie granicy plastyczności, lecz wzajemne usztywnienia połączeń w węzłach zapobiegają zniszczeniu modelu.

9.5.4 Dziedziczenie nazw prętów i metoda osadzania nowych segmentów w procesie wzrostu

Grafika 95 poza schematem wzrostu prezentuje sposób oznaczania elementów. Konieczność tworzenia indywidualnych nazw wymuszona jest kontrolą liczby zmian wszystkich segmentów struktury. Nie przekładają się one na ograniczenia wielkości struktury, lecz wymuszają równomierny wzrost całej powierzchni. Oznacza to, że jeśli prawie cała struktura przeprowadzi proces wzrostu o numerze „n", to przed wzrostem „n+1" musi nastąpić uzupełnienie modelu we wszystkich brakujących segmentach o elementy wzrostu numer „n". To implikuje fakt opracowania metody nazewnictwa prętów w sposób umożliwiający jednoznaczną identyfikację historii każdego elementu występującego w modelu. Maksymalna

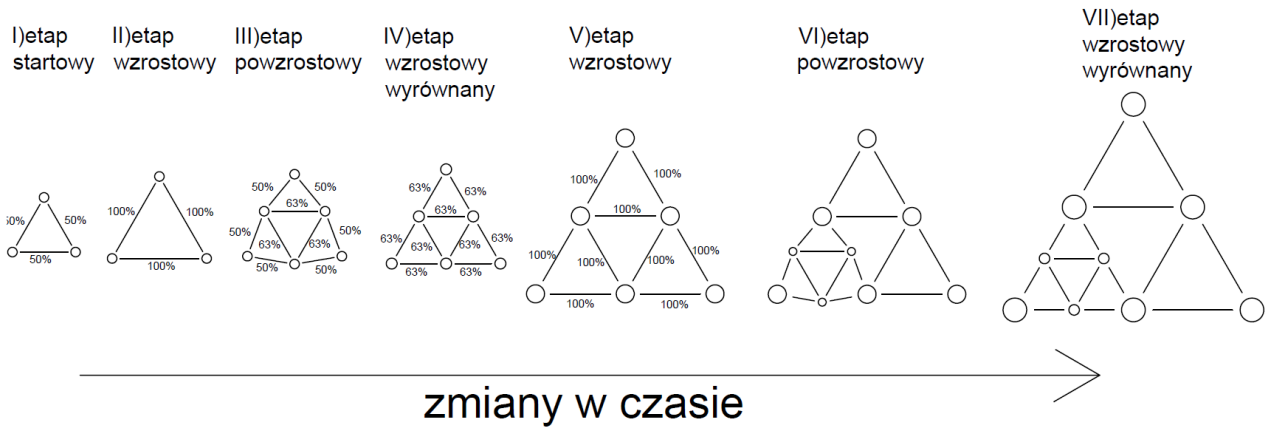


Grafika 95.Koncepcja nazewnictwa elementów struktury ekspandującej podczas wzrostu. Nazewnictwo ma na celu określenie sposobu nadzoru nad wzrostem i redukcją struktury.

dopuszczalna wartość różnicy między najmłodszym, a najstarszym segmentem elementów została określona przez autora jako „stopień rozwarstwienia topologicznego". Bezpośrednio z opisywanym parametrem powiązane są maksymalne momenty zginające na węzłach ponieważ im większe może być rozwarstwienie, tym większe ramię sił generują skrajne segmenty struktury i tym większe ramiona sił wywołują większe momenty węzłowe.

Autor w pracy prezentuje metodę nazewnictwa elementów ściśle związaną z historią elementów. W pierwszej kolejności podczas statycznego pierwotnego składania konstrukcji wszystkie elementy posiadają prostą reprezentację liczbową, informującą o jej miejscu w szeregu elementów. Nazewnictwo rozpoczyna się wartością 1 i postępuje inkrementacyjnie, wykorzystując wszystkie kolejne wartości naturalne. Tak opisany model jest topologią i geometrią wyjściową. Wszystkie zmiany od tego momentu następują wyłącznie w procesie wzrostowym struktury. Oznacza to, że w momencie całkowitego rozsunięcia elementów komórki złożonej z elementów „1", „2", oraz „3" następuje zmiana trzech elementów na 9 nowych zgodnie ze schematem grafiki. Nowe elementy nie otrzymują kolejnych numerów, lecz korzystają ze złożenia nazwy. Prefiksem nazwy jest nazwa zastępowanego pręta (np. „1"), a sufiksem indywidualny indeks nowego pręta numerowany analogicznie inkrementacyjnie po wszystkich kolejnych wartościach liczb naturalnych rozpoczynając od wartości 1. Tak też dwa pręty zastępujące pręt „1" uzyskają indywidualne nazwy „1.1" oraz 1".2". Na tej samej zasadzie opiera się dziedziczenie nazw wszystkich kolejnych prętów we wszystkich kolejnych pętlach wzrostu (kolejno „1.1.1", „1.1.2", „1.2.1" i „1.2.2"). Metoda ta pozwala uzyskać i szeregować informacje na temat zmian w elementach strukturalnych. Po ilości punktorów łatwo odczytać jest liczbę wzrostów przeprowadzonych na danych prętach co pozwala w pełni kontrolować strukturę pod względem stopnia rozwarstwienia topologicznego. Struktura nazwy pozwala na określenie całej historii każdego elementu w czasie użytkowania obiektu. Pozwala to na ocenę proporcji tempa wzrostu każdego segmentu struktury na cele analityczne. Na podstawie historii zmian zapisanej w nazwie elementu można określić kolejność zmian segmentów w celu zmniejszania struktury. Minimalizacja obiektu następuje w sposób analogiczny do wzrostu, na podstawie wartości parametrów przeciwnych do motywatorów wzrostu. Oznaczanie węzłów nie podlegało opracowaniu ze względu na możliwość zawarcia wszystkich informacji w prętach.

9.5.4.1 Problematyka dwukrotności teleskopowania i metoda jej niwelacji

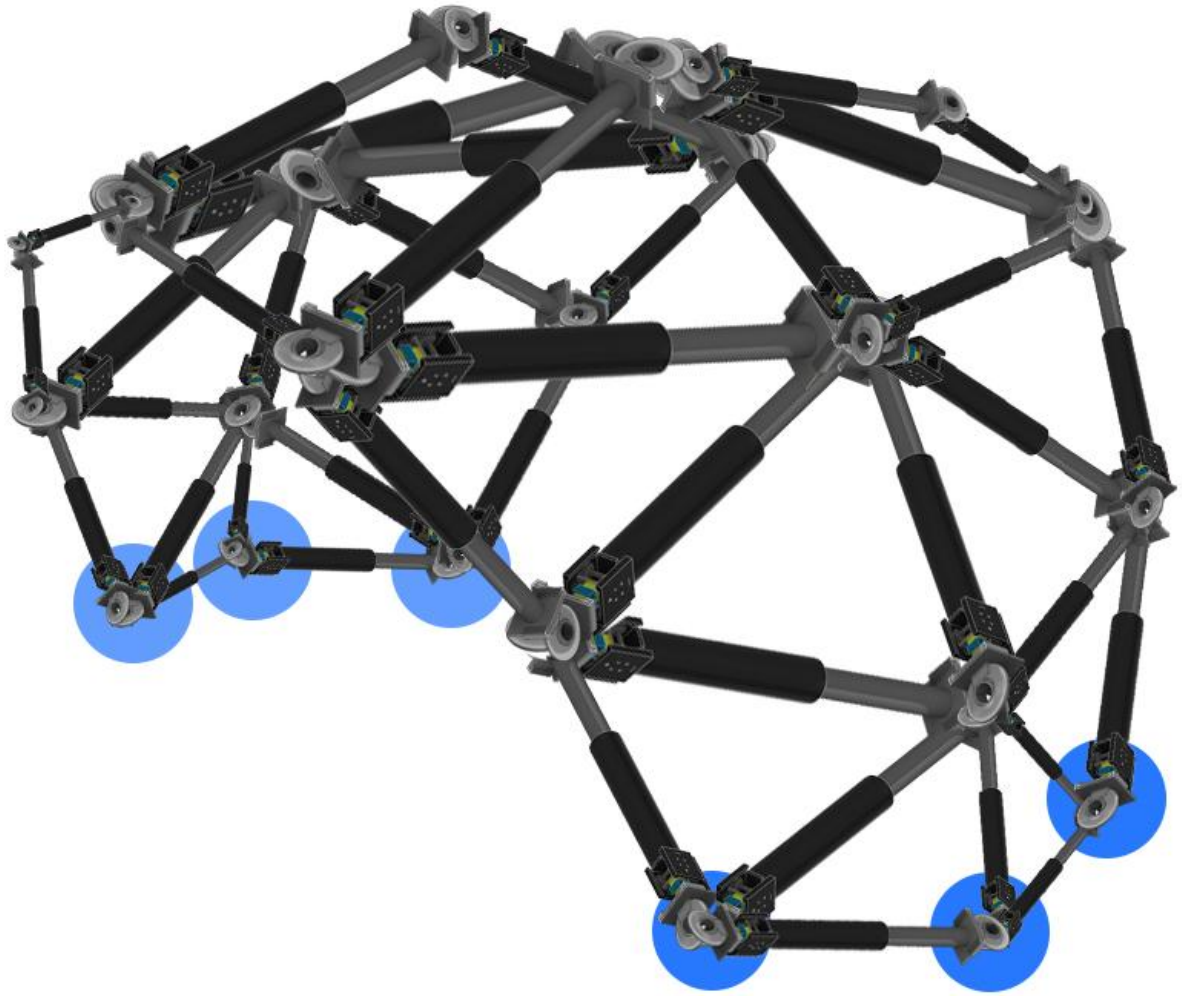


Grafika 96.Schemat pracy modyfikatorów pozwalającej na uniknięcie form pośrednich prętów i minimalizację liczby ręcznych interwencji w strukturę podczas procesu wzrostu.

Jak zaznaczono, ważną cechą struktury jest możliwość dwukrotnego teleskopowania prętów. Jest ono istotne ze względu na rozwiązanie procedury wzrostu. Każdy wydłużony pręt w pewnym momencie zastępowany jest dwoma maksymalnie skróconymi. To oznacza konieczność elastyczności teleskopowania w zakresie od x do 2x. Wymaga to teleskopowania trójsegmentowego pręta gdzie dwie kolejne śruby wydłużają model. To z kolei znacznie utrudnia zachowanie nośności szczególnie w aspekcie sił mimośrodowych, dlatego zdecydowano się na użycie dwóch elementów w tym jednej śruby do teleskopowania wraz z odpowiednim układem siłowników podczas procesu wzrostu. Wymusza to bardziej złożony proces wzrostu niż w standardowej formie podmiany prostego segmentu elementów. Grafika

96 prezentuje punkty kluczowe procesu. W formie procentowej podany jest stopień wysuwu prętów, gdzie 50% oznacza pozycję minimalną, a 100% pozycję maksymalną. Etapy nr „III” oraz „VI” przedstawiają problematykę dwukrotnego teleskopowania. Pozwoliłoby ono na montaż prostych modułów w miejsce maksymalnie wysuniętych prętów. Każde przekroczenie połowy długości wysuniętego pręta długością nowych prętów musi deformować układ trójkąta montowanego tak, aby wszystkie pręty mogły zostać osadzone naraz w czasie jednego wzrostu. Nie dopuszcza się ręcznego rozsuwania elementów w celu osadzenia prostego układu nowych prętów, ani usuwania poprzedniej komórki elementów przed założeniem nowych. Etap powzrostowy jest rozwiązaniem problemu. Osadzony zdeformowany segment elementów. Wraz z postępem ekspansji podmieniony moduł prostuje się do postaci prezentowanej w kolejnym etapie (nr „IV” lub „VII”). Naraz możliwa jest podmiana tylko jednego modułu, a sama podmiana przeprowadzana musi być według ścisłej procedury, gdzie najpierw osadzony jest nowy segment elementów, a następnie zdejmowany jest poprzedni, maksymalnie wyteleskopowany. Zawsze osadzanie następuje tylko od góry albo tylko od spodu, tak aby umożliwić zdjęcie starego modułu z drugiej strony powłoki.

Poprzez pozostawienie starego wyteleskopowanego modułu oraz nowego wzrostowego uzyskuje się powłokę dwuwarstwową, którą charakteryzuje znaczna wytrzymałość na zginanie. Proces ten nazywany dalej „pieczętowaniem” może być pożądany w miejscach struktury, gdzie nie zakłada się dalszego wzrostu. Przykładem może być mała odległość od ściany sąsiedniego budynku/obiektu lub fragment o znacznej krzywiźnie generującej proporcjonalne momenty zginające.



Grafika 97.Koncepcja modelu samoekspandującego struktury jednopowłokowej z elementów teleskopowanych.

Proces osadzania nowych elementów przebiega ręcznie. System może sygnalizować moment w którym oczekuje osadzenia nowego segmentu elementów. Przykładem sygnalizacji może być podświetlanie LED na prętach gotowych do wymiany. Należy ręcznie osadzić cały segment, a następnie w zależności od potrzeb zdjąć poprzedni lub pozostawić zapieczętowany fragment. Podczas ręcznej wymiany elementów struktura musi pozostać statyczna w miejscu pracy lub może oczekiwać na zmianę elementów w swojej formie statycznej. Proces ten gwarantuje pełną użytkowalność modelu przez cały okres jej wzrostu i skurczu. Sam proces zmiany geometrii przez teleskopowanie musi podlegać analizie stanów naprężeń ruchów pośrednich opisywanych szerzej w rozdziale 8.3. Ruch struktury o opisywanej budowie wymusza koordynację teleskopowania naraz wielu elementów. Precyzja ruchu, szybkość oraz podział na ruchy pośrednie powinien stanowić część badań wykraczających poza zakres rozprawy.

9.6 Podsumowanie

Proponowany model spełnia wszystkie wymagania struktury responsywnej, pozwala na zmianę geometrii oraz gabarytów w czasie rzeczywistym, lecz z małą dynamiką ruchu i w sposób półautomatyczny. Możliwe jest zaprogramowanie wielu sposobów zabezpieczenia jej pracy przez zabiegi programistyczne i architektoniczne co opisano w akapitach. Model stanowi pierwszą koncepcję architektury ekspandującej o sztywnej strukturze nośnej bazującej na ruchu mechanicznym bez aktywnego zginania. Struktura po wyposażeniu w systemy czujników oraz kontroli własnej pracy może z porównywalną skutecznością zostać zorientowana na minimalizację naprężeń jak miało to miejsce w dotychczas opisywanych modelach. Charakteryzuje się zakresem wzrostu umożliwiającym wykorzystanie w typowych obiektach zadaszeń wydarzeń masowych, sal konferencyjnych lub ekspozycyjnych. Model pojedynczego pręta bez wyodrębnionego węzła znacząco upraszcza proces montażu trwającego przez cały okres użytkowania modelu. Sposób przeciążenia i dalej zniszczenia pozwala na wyraźne sygnalizowanie stanów struktury. Problemem wymagającym rozwiązania w dalszych badaniach jest sposób przykrywania struktury materiałem zewnętrznym. Aby pełniła swoją funkcję musi być wyposażona w stałą ciągłą powłokę o odpowiedniej izolacyjności wodnej i mechanicznej pozwalającej na funkcjonowanie w środowisku poddawanym losowym siłom powierzchniowym ze zróżnicowaną częstotliwością. Trudność wykonawcza polega na zapewnieniu odpowiedniego stopnia elastyczności lub odmiennej formy zwiększania przykrywanej powierzchni. Szczelność jest szczególnie trudna do zrealizowania w miejscach węzłowych oraz w strefach znacznej krzywizny i złożonych geometrii struktury. Rozwiązań można poszukiwać w rozwiązaniach sztywnych powłok panelowych o zakładkowych układach lub w przykryciach membranowych zależnie od charakteru pracy modelu, możliwości wykonawczych oraz wymaganych parametrów technicznych nie będących częścią opracowania badań.

Nie odnoszono się bezpośrednio do tez zawartych w pracy. Rozdział odpowiadał na znaczącą potrzebę wypełnienia zapotrzebowania na systemy strukturalne zdolne uzyskiwać elastyczność form i pracy na poziomie umożliwiającym wykorzystanie rozwiązań responsywnych. Przedstawione koncepcje stanowią propozycję dwóch systemów niezależnych od siebie. Oba przedstawione zostały jako koncepcje opracowane w inny sposób i odpowiadają na inne potrzeby responsywności. Systemy spełniają wymagania stawiane w pracy dla rozwiązań responsywnych, lecz ich budowa ani sposób działania nie są oparte na algorytmie ewolucyjnym. Tworzą jednak modele przestrzenne, które sterowane będą dalej modelami zachowań opartymi między innymi na algorytmach ewolucyjnych. Przedstawione rozwiązania zachowują zakres bezpiecznej granicy wytrzymałości, pozwalający na eksperymentalne dobieranie wartości z wykorzystaniem algorytmu.

Poprzez przygotowanie wskazanych systemów dowiedziono możliwości podniesienia poziomu uniwersalności architektury responsywnej poprzez zastosowanie systemów strukturalnych modelowanych dla responsywności, pozwalających na znacznie szerszą pulę zastosowań, niż powszechnie dotychczas stosowane adaptacje systemów sztywnych na potrzeby ruchu.

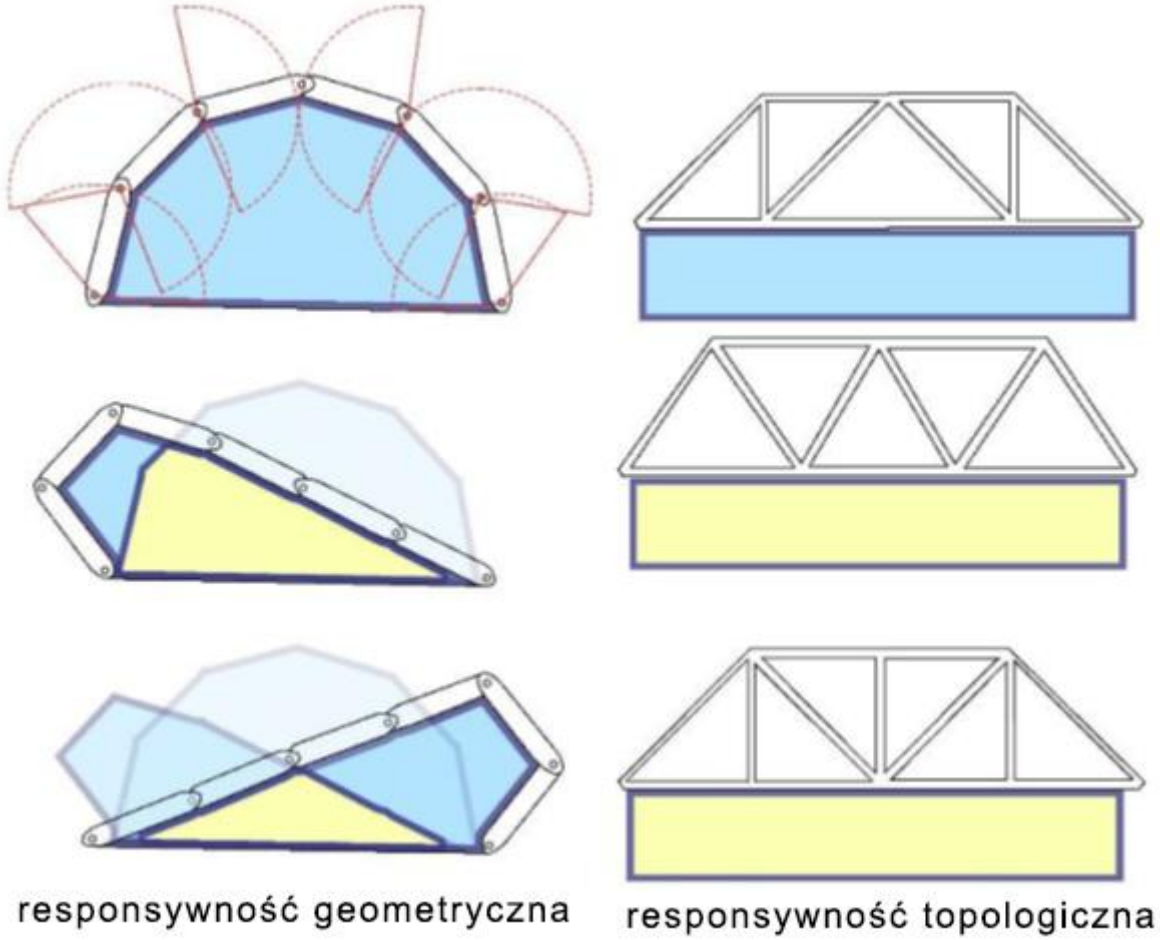
10. Koncepcje implementacji responsywności topologicznej w rozwiązaniach architektury responsywnej

10.1 Wstęp

10.1.1 Aktualne badania

Wraz z rozwojem technologii oraz rosnącym naciskiem na kwestie ekologiczności i efektywności użycia materiałów, architektura oraz dziedziny jej pokrewne korzystają z rosnącej bazy rozwiązań zwiększających efektywność użycia zasobów. Jedną ze ścieżek jest rozwój architektury responsywnej, mogącej dostosowywać właściwości struktury nośnej do zmiennych warunków otoczenia. Począwszy od „Kinetic Architecture" Williama Zuk'a [19], dochodząc do aktualnych rozwiązań wysokotechnologicznych jak prezentowane w [71] responsywność struktur przybrała kształt wielu form zmienności długości elementów, tak w konstrukcjach dyskretnych jak i coraz częściej w ciągłych strukturach powłokowych oraz tarczowych prezentowanych w [124] lub dokładnie badanych z opisem metodologii w [79]. Zmiany te mają wpływać na geometrię lub sposób rozkładu naprężeń w strukturze. Badane obecnie rozwiązania zawierają się w wąskiej gamie responsywności geometrycznej. Jest to zmienność wprowadzana poprzez siłowniki, aktuatory nitynolowe, cięgna. Badania responsywności orientowane są na dobór optymalnego układu siłowników jak prezentowano w [65], których minimalna liczba jest kluczowa dla oszczędności energetycznych, doboru trajektorii ruchu oraz doborze geometrii lub modeli zachowań gwarantujących największe zyski energetyczne w rozliczeniu życia struktury czego skuteczność dowiedziono w [69]. Trudności analizy dotyczą projektowania odpowiednio kompleksowych systemów badania otoczenia, jak i diagnostyki samej struktury oraz dalej kompensacji wszelkich niedokładności. Analizy te zawsze poszukują kompromisów między ilością danych, a ich istotnością, co zostało zdefiniowane w opracowaniu [142]. Aparatura pomiarowa stanowiąca integralną część każdej struktury wymaga symultanicznej pracy wielu dziedzin nauki czyniąc każdy projekt interdyscyplinarnym. Nadal jednak próby badania responsywnej architektury ograniczają się w znacznej mierze jedynie do responsywności geometrycznej. Jest ona tym trudniejsza, że wraz ze wzrostem skali brakuje elementów wykonawczych dla wskazanych struktur jak siłowniki o odpowiednich parametrach, co zostało poruszone przy okazji poszukiwania efektywnych responsywnie geometrii w pracy [66], czy zindywidualizowanie aparatur pomiarowych dokładniej omawianych pod względem użycia i problemów obsługi w pracy [71]. Ponadto zmienność geometryczna uniemożliwia dalej efektywne wykorzystywanie przestrzeni w otoczeniu struktury i pod nią jak Grafika 98. Proponowany jest nowy kierunek badań oparty o zmienność topologiczną nie poruszaną w zagadnieniach architektonicznych.

Responsywność topologiczna stanowi podejście odmienne od coraz częściej badanej responsywności geometrycznej. W odróżnieniu od zmienności kształtu nie jest skupiona na uzyskiwaniu form zewnętrznych dla struktury, a może operować w zakresie połączeń między elementami. Dla opisywanych w pracy struktur prętowych jej podstawowym ruchem jest rotacja w zróżnicowanej liczbie przestrzeni co stanowi nowy kierunek badań dla dziedziny zdominowanej przez siłowniki wprowadzające zmienność długości. Dotychczasowe realizacje struktur responsywnych topologicznie zakładały jedynie teoretyczne podstawy zagadnień ruchu lub korzystały ze sztywnej jednokrotnej optymalizacji topologicznej jak w opracowaniu [109]. W najprostszej formie jeszcze szersza responsywność topologiczna stanowi przeniesienie zmienności z prętów na węzły w układach dyskretyzowanych. Długości prętów nie biorą udziału w zmienności, gdzie ich rolę przejmują węzły oraz zdolność określonego



Grafika 98.Porównanie sposobu działania modeli responsywnych geometrycznie oraz topologicznie. Zauważalne jest znacznie łatwiejsze wykorzystanie responsywności topologicznej ze względu na wykorzystanie przestrzeni wokół struktury.

stopnia łączenia i rozłączania elementów, kreując tym samym nowe wymagania oraz nakreślając nowe problemy inżynierskie, jakie należy rozwiązywać w badaniach i wykorzystaniu technologii. Wśród prac tematyki architektonicznej brak propozycji struktur o zmienności topologicznej w czasie użytkowania obiektu. Zdolność ta przypisywana jest obecnie głównie mechatronice oraz mechanice. Nauką najbardziej pokrewną wykorzystującą rozwiązania podobne do prezentowanych w artykule są VTT – ***„Variable Topology Truss”*** opisane w pracy [196]. Stanowiąca dziedzinę robotyki i mechatroniki dyscyplina zajmuje się projektowaniem, realizacją oraz sterowaniem i zarządzaniem robotami o unikalnej cesze zdolności rekonfiguracji własnej topologii poprzez systemy w pełni automatycznie rozłączalnych połączeń. Układy takie mają za zadanie koordynację ruchu robota oraz zapewnienia stabilności i niezawodności podczas procesu zmian topologii. Jest to głównym

założeniem modelu jak opisano w pracy [184]. Zmiana geometryczna wymienionych robotów umożliwia im ruch w przestrzeni powodowany balansem środkiem ciężkości, z kolei ruch topologicznie zmienny pozwala na precyzyjne kierowanie ruchu. Na potrzeby zmienności wypracowano jednolity model węzła zachowującego nie tylko żądaną sztywność połączeń dla odpowiednio małej skali ale również orientację elementów z niego wychodzących w przestrzeni nieinercjalnej, co znacznie zwiększa złożoność stosowanych połączeń. Wymóg ten jest wynikiem założenia, że każda VTT może swobodnie poruszać się w każdym kierunku nie zachowując w żadnej formie trwałego powiązania z podłożem. Chcąc jednak przenieść rozwiązania mechatroniczne na pole architektury można bez utraty funkcjonalności założyć dowolną niezerową formę trwałego związania modelu z podłożem tworzącym punkt odniesienia dla ruchu. Co więcej, nakładając restrykcyjniejsze wymogi co do sztywności połączenia, zakładając utwierdzenie struktury, czyniąc z mechanizmu obiekt o własnej sztywności można znacznie uprościć rozwiązania technologiczne poprzez ruch części elementów zamkniętych w sztywnej ramie. Problematyczna pozostaje jednak skala rozwiązań. Bardzo mała nośność robotów VTT w porównaniu do struktur architektonicznych uniemożliwia zastosowanie mechatronicznych modeli w obiektach użytkowanych w skali ludzkiej. Stąd też tak duża rozbieżność między rozwiązaniami VTT oraz architektonicznej responsywności topologicznej, wynikająca z rozbieżnej celowości ruchu. Skalowanie węzłów oraz motoryki robotów generuje szereg problemów uniemożliwiając odniesienie czegoś więcej niż założenia teoretyczne ruchu.

10.1.2 Koncepcja modelu responsywnego topologicznie

Responsywność topologiczna o teoretycznie nieograniczonej swobodzie pozwala na dowolną zmianę położenia każdego elementu w przestrzeni. Pierwszym ograniczeniem jakie nakładane jest na ten ruch stanowi zamocowanie podpory tworzącej inercjalny układ odniesienia dla struktury. Architektoniczne stałe związanie struktury z podłożem wymusza istnienie co najmniej jednego punktu odniesienia struktury. Realizowane jako usztywniona podpora może stanowić punkt odniesienia także dla samego ruchu, zapewniając stałą orientację i upraszczając tym samym motorykę, lecz ograniczając zmienność do elementów niezwiązanych z podporami pozostającymi stałymi elementami.

Kolejnym ograniczeniem jest zapewnienie sztywności podczas ruchu. Każdy element podczas zmiany położenia przemieszczając się względem pozostałych elementów wymaga całej struktury wsporczej co oznacza tak niejednoczesność zmiany położenia wszystkich elementów, czyli sekwencjonowanie przemieszczania, jak i istnienie stałej ramy elementów niezmiennych pozwalających na zmianę położenia pozostałym elementom. Ograniczenie to podlega rozwinięciu merytorycznemu na etapie modelowania konkretnego rozwiązania struktury, ruchu i połączeń jednak na etapie koncepcyjnym określa się modułowy podział struktury. Każdy moduł posiadać ma jednakową lub analogiczną formę geometryczną. Składać się ma z elementów ruchomych jak i stałych, co daje strukturę hybrydową złożoną ze struktury ruchomej jak i sztywnej.

Dalej upraszcza się ruch do samej rotacji. Jest to możliwe przy zachowaniu stałych modułów strukturalnych. Zmniejszając różnorodność geometrii uzyskiwanych w modelach responsywnych topologicznie unika się konieczności teleskopowania prętów. Moduł na bazie kwadratu, spełniając powyższe wymagania, stanowi więc kształt ramy ruchu. Wewnątrz pojedynczej ramy odbywać się ma cały proces zmian. Pojedynczy, wewnętrzny pręt o dobranej sztywności ma się poruszać po kołowej trajektorii Aby uzyskać zmianę topologii środkiem ruchu jest punkt węzłowy. Ostateczna forma responsywności oparta na powyższych założeniach znajduje się na Grafika 99. Tak też dla uproszczenia ruchu zakłada się ruch pręta tylko w jednej płaszczyźnie. Trzeci wymiar ruchu powodowałby nadmierną komplikację struktury oraz wymuszałby jeszcze większą precyzję ruchu.

Zakłada się realizację metody łączenia elementów w sposób umożliwiający przenoszenie naprężeń ściskających jak i rozciągających. Problematyka połączeń poruszona zostanie w dalszej części pracy, lecz założenie zdefiniowane zostaje w części koncepcyjnej. Wymusza ono zastosowanie połączeń obustronnych o znacznie większych skłonnościach do wystąpienia podatności i luzów w czasie użytkowania.

Pręty będą miały ograniczoną zmienność topologiczną poprzez możliwość tylko jednostronnego rozłączania połączenia. Drugi koniec pręta będzie na stałe połączony ze strukturą w miejscu wystąpienia osi ruchu. Ruch ponadto odbywać się będzie na przygotowanych prowadnicach. Precyzja ruchu w czasie zmiany pozycji ułatwia uzyskanie precyzji podczas łączenia elementów. Założenia wstępne nie definiują szybkości obliczania zachowania, ani maksymalnego czasu reakcji struktury.

Wykorzystując ruch obrotowy o ciągłej charakterystyce dysponuje się możliwością obrotu belki środkowej o dowolny kąt w zakresie 0-180 stopni, jednak chcąc uzyskać efektywny, jak najbardziej osiowy rozkład naprężeń unikając zjawiska zginania określa się ograniczenie ułożenia belki do 4 pozycji i ograniczenie zakresu kątowego ruchu do 135 stopni. Układ taki mimo małej różnorodności topologicznej jest w stanie znacząco wpłynąć na występowanie naprężeń w strukturze.

Kształt struktury pozwala na prostą multiplikację modułu poprzez belki obwodowe w celu tworzenia większych bardziej złożonych układów mogących naśladować kształtem układ geometryczny konstrukcji obiektów w układach słupowo-ryglowych. Multiplikacja modułów zwiększa ilość kombinacji układu wszystkich belek jakie struktura może uzyskać. Ilość kombinacji jest równa $i = 4^n$, gdzie n-ilość modułów w strukturze. W bardzo szybkim tempie ilość możliwych do uzyskania układów topologicznych rośnie do wartości niemożliwych do przeanalizowania w wymiernym czasie. Wymusza to poszukiwanie efektywnych układów topologicznych w oparciu o pewną formę losowości. Argumentuje to wprowadzenie do analizy modeli algorytmu ewolucyjnego, kierunkującego poszukiwanie rozwiązań w celu zmniejszenia wymaganych do przebadania układów.

10.1.3 Topologia układów belki środkowej

Wraz ze zmianą położenia belki środkowej zmienia się charakter konstrukcji, który wymaga dalszych założeń na etapie koncepcyjnym. W dwóch pozycjach diagonalnych pojedynczy moduł podzielony jest na symetryczne prostokątne trójkąty równoramienne. Oznacza to usztywnienie geometryczne modułu, a w konsekwencji znaczną sztywność całego układu. W dwóch kolejnych położeniach belki środkowej równolegle do belek obwodowych następuje utrata właściwości podziału na sztywne trójkątne komórki przestrzenne i zastąpienie ich prostokątnymi polami geometrycznie nieposiadającymi sztywności. Wymusza to wykonanie wszystkich połączeń stałych struktury, jako przenoszących momenty zginające dostosowane do wielkości powstających naprężeń. Sztywność tych połączeń powinna kompensować do pewnego stopnia nieosiowości sił przykładanych do struktury. Nieosiowości te wynikać będą ze skończonej precyzji orientacji i łączenia elementów w punktach węzłowych. Operowanie sztywnością połączeń stałych, modyfikuje więc zakres układów ortogonalnego pręta środkowego. Dla większej sztywności ramy mniej istotna staje się część ruchoma pręta zmniejszając efektywność ruchu. Dodatkowo im sztywniejsze zostaną zaprojektowane połączenia tym większy pozostaje margines nieosiowości sił zewnętrznych, lecz jednocześnie traci się na efektywności użycia materiału i responsywności.

Moduły mogą być orientowane poziomo jak i pionowo. Spektrum struktur możliwych do wykonania ogranicza się jedynie do ortogonalnych układów z modułów umożliwiających realizację wgłębień oraz nadwieszeń. Praca z pojedynczą wielkością modułu ma ograniczać koszty i zwiększać efektywność wykorzystania materiału. Dla uzyskania większej efektywności można dokonać dalszych założeń – W poziomie wszystkie kierunki układu belki środkowej i układy naprężeń są tak samo prawdopodobne, z kolei w pionie można wyróżnić główne kierunki i zwroty. Pionowe siły grawitacji wywołają w zdecydowanej większości przypadków

wyłącznie naprężenia ściskające dlatego połączenie w tym układzie można uprościć do przenoszącego siły nacisku w osi belki. Układ poziomy belki środkowej modułów pionowych może stanowić efektywne rozwiązanie jedynie dla struktur wysokich w otoczeniu połowy wysokości przy ścianach zewnętrznych. Połączenia diagonalne z kolei mogą podlegać zróżnicowaniu szczególnie dla wysokich obiektów, gdzie z podobną efektywnością sztywność konstrukcji zapewni układ rozciąganego stężenia 45 stopni jak i 135 stopni. Przyjmuje się, że skratowany układ prętów ruchomych może zawsze być dobrany tak, aby przenosić tylko siły rozciągające poprzez zmianę kierunku prowadzenia pręta w układzie ukośnym. Prowadzi to do większego zróżnicowania rozwiązań połączeń, lecz uprości budowę i zwiększy niezawodność pojedynczego modułu.

Pojedynczy moduł wpływa na pracę całego ustroju dlatego też dla efektywności tak ważna jest współpraca elementów między sobą. W pierwszej fazie badań układów topologicznych pozostawia się pełną dowolność uzyskiwanych topologii w strukturze, z kolei na podstawie wcześniejszych wyników zaproponowana powinna zostać metoda symultanicznych ruchów poszczególnych modułów.

10.2 Badania efektywności działania modułu dla zróżnicowanych geometrii i złożoności struktur

10.2.1 Założenia wstępne

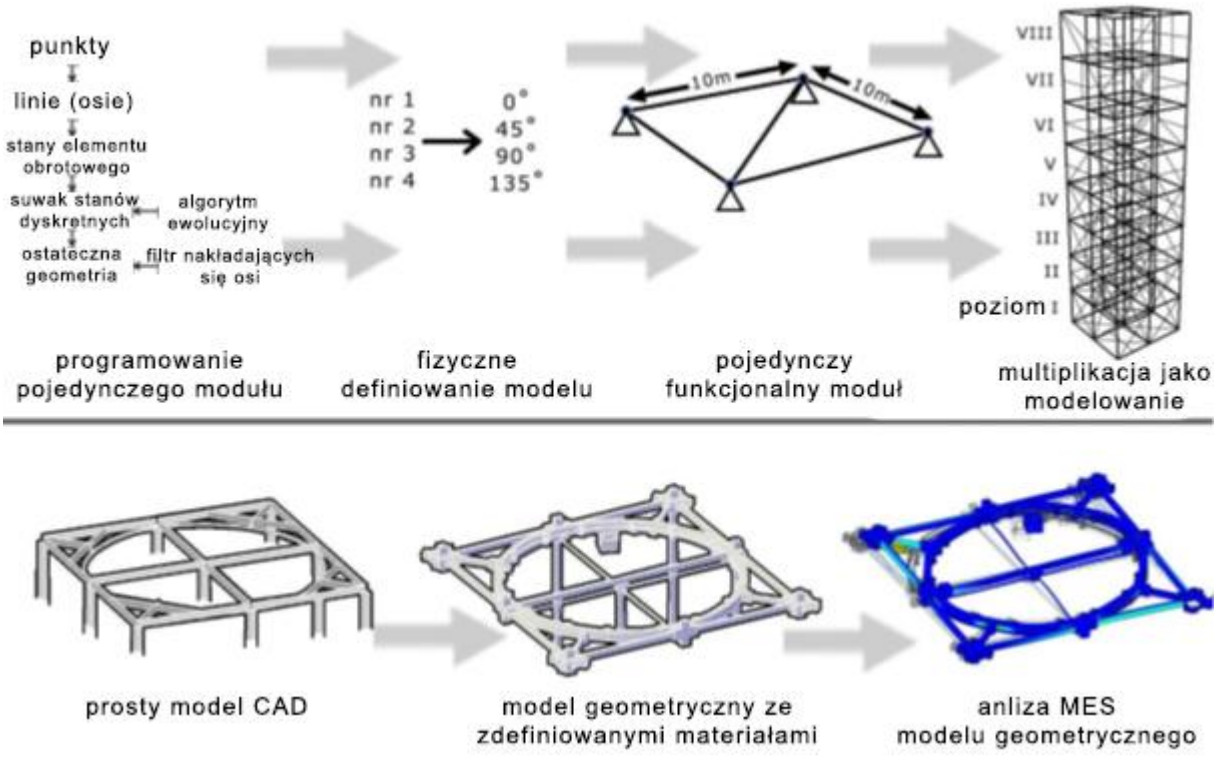
Modele poddawane analizie oceniane były pod względem efektywności rozumianej jako zmiana strzałki ugięcia. Modele responsywne mają na celu zwiększenie zakresu funkcjonalności poprzez redukcję strzałki ugięcia, dlatego też jest to kryterium wybrane na cele badań. W celu zbadania efektywności modelu responsywnego topologicznie zamodelowano w programie Rhinoceros Grasshopper strukturę szkieletową prostego obiektu. Maksymalne ugięcie zdefiniowano jako 1/300 rozpiętości w świetle podpór, analogicznie do powszechnie przyjmowanych założeń, co dla pojedynczego modułu o boku długości 10m daje maksymalne ugięcie równe 3,(3)cm. Następnie łączone są moduły w celu opracowania struktury o kształcie nawiązującym do układu szkieletowego budynków.

Badania mają na celu wyznaczenie geometrii wykazujących się największą podatnością na wpływ zmian topologii modułów. Poszukiwanie geometrii prowadzone jest w celu wyznaczenia proporcji kształtów i dalej smukłości obiektów najbardziej odpowiednich do badań prezentowanej formy responsywności topologicznej. Wyniki mają pozwolić na wyznaczenie typu geometrii i natury zjawisk na jakie najefektywniej wpływa proponowany układ zmienności. Badaniu podlega smukłość i proporcja elementów struktur.

Wykonano dwa podstawowe modele obliczeniowe modułu na potrzeby badań. Zróżnicowanie wynika ze skali w jakiej wykonywane są poszczególne badania. Dla badań ogólnej sztywności struktury model wykonano w Rhinoceros Grasshopper z wykorzystaniem nakładki Karamba 3D. Jest to uproszczony model powielonych modułów, korzystający z wyidealizowanej geometrii, przybliżający zachowanie każdego pojedynczego modułu, dając szybki wynik sztywności całej struktury. Z kolei szczegółowy model o pełnej geometrii przewidującej mechanizmy ruchu oraz mechanikę połączeń zamodelowano w Autodesk AutoCad 2024, a następnie nadano parametry fizyczne w Autodesk Inventor 2024. Dla drugiego, szczegółowego modelu symulacje zachowań pojedynczego modułu przygotowano i przeprowadzono z wykorzystaniem dodatku Nastran do programu Inventor. Model dokładny posiada zamodelowaną prowadnicę widoczną na grafice Grafika 99. Pozwala ona na ruch obrotowy środkowego pręta oraz poprzez połączenia z ramą zewnętrzną w miejscach połączeń z prętem ruchomym niwelując problem zmienności długości elementów. W każdej pozycji zakłada się jednakową wartość siły krytycznej pręta środkowego.

10.2.2 Budowa modelu badawczego

Model oparty jest na przygotowanej geometrii wyidealizowanej struktury o kwadratowym module w założeniu o wymiarach 10mx10m. Prowadzone tak elementy stanowią pręty obwodowe jednego modułu. W dalszej kolejności opracowano środkowy pręt. Zamodelowano go jako 4 manualnie zaprogramowane przypadki obrotu w zakresie 0-135 stopni, podłączone do filtra wyboru jednego z wariantów obrotu w programie Grasshopper. Każdy tak opracowany układ odpowiada innej wartości na suwaku 4-pozycyjnym. Skokowa zmiana wartości suwaka symuluje nagłą zmianę położenia pręta środkowego zgodnie z założeniami teoretycznymi z wcześniejszego rozdziału. Zwielokrotniając, obracając i łącząc kolejne moduły wykonano dwie pełne struktury naśladujące układ szkieletowy. Pierwsza o wymiarach liczonych w modułach 2x2x5 („długość w podstawie" X "szerokość w podstawie" X "wysokość") oraz druga 1x5x4. Obie przedstawiono na Grafika 100. Obie posiadające taką samą funkcjonalność ruchu środkowego pręta, lecz o teoretycznie innych siłach dominujących. Model ***a)*** deformuje się najmocniej pod wpływem sił grawitacji, z kolei model ***b)*** pod wpływem sił wiatru. Dla prętów obu modeli określono przekroje cienkościenne kołowe o średnicy zewnętrznej 50cm oraz grubości ścianki 1cm wykonane ze stali St355. Pojedynczy moduł osiąga masę 10 438kg. Proste definiujące osie prętów przed nadaniem im opisywanych parametrów fizycznych filtrowane są, aby zapobiec dublowaniu osi obwodowych sąsiednich prętów. Dublowanie to następuje w momencie multiplikacji pojedynczego modułu. Kopiowane są wszystkie jego elementy podczas gdy część elementów w momencie łączenia zostaje uwspólniona. Zaprogramowano model tak, aby usuwał wszystkie instancje nałożeń prętów, tak też każdy element stały ma jednakowe parametry fizyczne. Gotowa geometria z fizyką elementów podłączona jest do modułu analizy nieliniowej dostępnej w dodatku Karamba 3D do Grasshopper obliczanej metodą iteracyjną Newtona-Rhapsona.



Grafika 99.Zaprogramowanie modelu badawczego opierało się na połączeniu szeregu powtarzanych modułów w jednolitą strukturę. Osobno prowadzono badania zachowania całego modelu oraz pojedynczego modułu uwzględniającego geometryczną złożoność koncepcji.

Modelowi nadano stałą wartość obciążenia przyspieszeniem grawitacyjnym przyłożonym w środkach ciężkości każdego pręta oraz zdefiniowano dodatkowe obciążenie powierzchniowe boczne na jednej ścianie, rozłożone na węzły podobnie do powszechnie stosowanych obciążeń poziomych wywołujących ciśnienie. W celu sprzężenia modelu z algorytmem ewolucyjnym wszystkie 4-pozycyjne suwaki obrotu środkowych belek podłączono do modułu algorytmu ewolucyjnego Galapagos, stanowiącego część oprogramowania Rhinoceros Grasshopper. Tak też numery odpowiadające konkretnym przypadkom ułożenia prętów stanowią dane wejściowe modyfikowane przez algorytm ewolucyjny. Algorytm nie musi i nie rozpoznaje zjawiska jakim steruje. Generuje jedynie kod interpretowany przez kontroler każdego z modułów osobno. Wartością efektywności podłączoną do efektora ***„fitness”*** algorytmu jest strzałka ugięcia struktury liczona dla najbardziej odkształconego pręta. Każda struktura ma zdefiniowane punkty podparcia będące podporami przegubowymi nieprzesuwnymi, tak też każdy badany model jest statycznie niewyznaczalny. W programie dla uproszczenia nie zamodelowano prowadnicy opisanej w koncepcji modelu. Oznacza to, że między kolejnymi pozycjami pręt środkowy modelu zmienia swoją długość. Oznacza to zmianę siły krytycznej wyboczenia. Aspekt ten został pominięty w symulacjach poprzez nadanie prętowi stałej wartości siły krytycznej. Dla każdej pozycji wytrzymuje on taką samą wartość siły osiowej. Nie modeluje się niedokładności. Wszystkie siły przykładane są osiowo, jak i wszystkie elementy łączą się z zachowaniem pełnej równoległości osi.

10.2.3 Działanie modelu badawczego oraz przygotowanie przypadków obciążeniowych

Algorytm ewolucyjny ma za zadanie poszukiwanie jak najefektywniejszego układu belek środkowych w celu wyznaczenia najwydajniejszej topologii dla określonego układu sił zewnętrznych. Poszukuje on tendencji pozwalających na wzrost zdefiniowanej przez użytkownika efektywności poprzez badanie związków między zmianami poszczególnych parametrów. Algorytm początkowo zmienia wartości pojedynczych danych wejściowych, a następnie grupując je dokonuje naraz coraz większych zmian w pojedynczych iteracjach. Przy każdym rozpoczęciu poszukiwania rozwiązań tworzy nową, pustą bazę danych uzupełnianą informacjami o wzajemnych powiązaniach, przedziałach efektywnych wartości oraz proporcjach zmian wyniku do zmiany wartości wejściowych. Algorytm ewolucyjny najefektywniej działa dla skwantyfikowanych wartości suwaków tak jak określono w modelu Grasshopper struktury.

Model ten charakteryzuje się znaczną liczbą parametrów wejściowych o małej liczbie uzyskiwanych wartości. Oznacza to efektywne użycie algorytmu. Każda struktura według opisanej wcześniej zasady liczby różnych układów topologicznych ma ich zbyt wiele, aby system mógł w wymiernym okresie czasu przeanalizować je wszystkie dla pojedynczego stanu obciążenia. Algorytm poszukując kierunków modyfikacji stara się określić kierunki efektywnych zmian i zminimalizować ilość badanych przypadków przed uzyskaniem satysfakcjonującego efektu. Należy zwrócić uwagę na występowanie problemu przedwczesnej zbieżności. W dalszej części badań podczas analizy efektywności zgrupowanych i rozproszonych topologii na granicy obciążeń poziomych i pionowych zagadnienie jest omawiane.

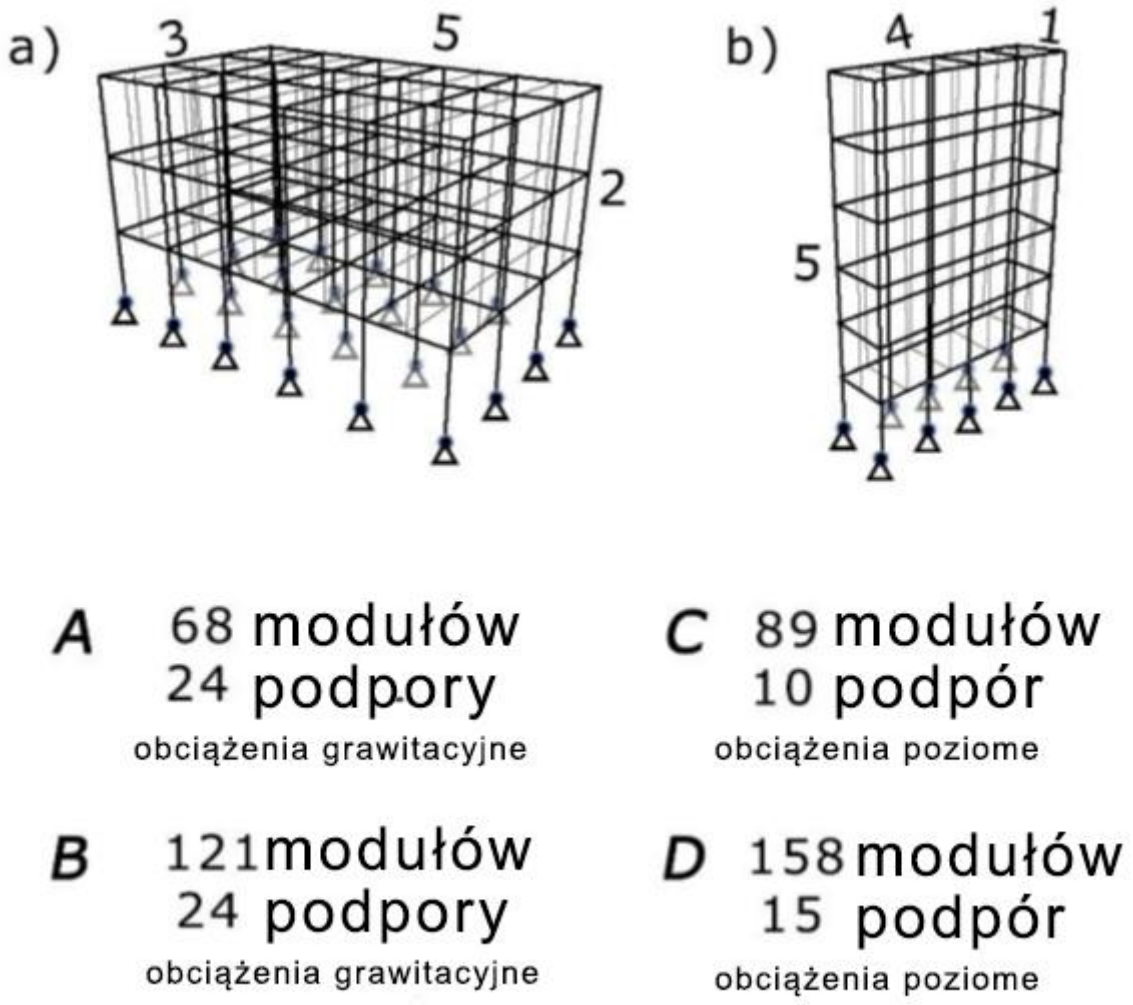
Algorytm ewolucyjny podczas wszystkich badań miał jednakowe parametry działania. Orientowany był na minimalizację wartości strzałki ugięcia. Maksymalną stagnację określono na 15 ewolucji. W każdej populacja równa była 50, a parametr ***„Initial Boost”*** równy był x2. ***„Maintain”*** określono na 5%, a ***„Inbreeding”*** na +75%. Badania przeprowadzono na komputerze przenośnym z dedykowaną kartą graficzną. Procesor Intel Core-i7 10700H 3.7GHz, 32 GB RAM DDR3.

Wstępne badanie ma za zadanie wskazanie lepszej efektywności modułów przestrzennych dla struktur wysokich lub powierzchniowych. Ocenie podlega stopień wzrostu sztywności struktury w procesie poszukiwania topologii z wykorzystaniem algorytmu ewolucyjnego. Liczony jest on jako proporcja strzałki ugięcia przy standardowym układzie prętów ruchomych do strzałki ugięcia dla struktury poddanej działaniu algorytmu ewolucyjnego. Na podstawie wyników dobrane są dalej formy struktur przyjęte w badaniach oraz ustalony zostaje dominujący kierunek ułożenia elementów jako wertykalny lub horyzontalny, na podstawie którego można dokonać w procesie realizacji modelu wymienionych wcześniej rozróżnień połączeń.

Tabela 25. Zestawienie wyników pomiarów dla struktur poddawanych zróżnicowanym obciążeniom. Kolejne badania oznaczono jako A-struktura pozioma z jednym poziomem, B-struktura pozioma z dwoma poziomami, C-struktura pionowa o podstawie 1x4, D-struktura pionowa o podstawie 2x4 moduły.

		numer przypadku obciążeniowego		
		1	**2**	**3**
strzałka odkształcenia [mm]	A	95,36	477,94	463,9
		88,1	416,85	405,46
		0,92	**0,87**	**0,87**
	B	105,07	659,81	646,04
		144,39	744,93	827,3
		1,37	**1,13**	**1,28**
	C	197,34	1752,84	2684,74
		176,31	1183,11	1615,55
		0,89	**0,67**	**0,6**
	D	202,78	3745	4001,33
		182,93	1405,84	1488,9
		0,9	**0,38**	**0,37**

Podczas pojedynczego badania topologii układ sił struktury pozostaje niezmienny. Badanie trwa 60 sekund, podczas których model bada średnio 1400 układów modeli dla każdej ze struktur. Dodatkowo badania przeprowadzono dla modeli o połowę mniejszych, dając sumarycznie 4 przypadki geometryczne jak na Grafika 100. Dla każdego modelu zebrano dane na temat strzałki ugięcia przed oraz po procesie poszukiwania efektywnego układu topologicznego. Dane zebrano w Tabela 25.



A- horizontal structure with one floor

B - horizontal structure with two floors **(a))**

C - vertical structure on base 1x4 **(b))**

D - vertical structure on base 2x4

Grafika 100.Przedstawienie dwóch rodzajów modeli poddawanych badaniu efektywności responsywności topologicznej. Oba modele mają inny charakter reakcji na siły poziome oraz pionowe.

Dla prawie każdej geometrii udało się uzyskać bardziej efektywny układ środkowych prętów. Najwyraźniej zauważalny jest wpływ sił poziomych na strzałki ugięć poszczególnych struktur. W strukturze horyzontalnej różnica wpływu między grawitacją oraz siłami poziomymi była od 2 do 5 razy mniejsza od wpływu na strukturę wertykalną. Dla przypadku „B" nie uzyskano w żadnym przypadku efektywniejszego kształtu. Referencyjny układ prętów dla tej struktury zakładał ułożenie wszystkich środkowych prętów jak na Grafika 101. Model nie zachowuje sztywności geometrycznej. Minimalne siły poziome wywołują duże momenty zginające w węzłach, lecz nie są to wartości dominujące dlatego efektywniejsze dla każdego przypadku badanego obciążenia było ułożenie wszystkich ruchomych elementów równolegle do sił pionowych wywołując najbardziej osiowe przenoszenie naprężeń. Dla większych wartości obciążenia poziomego przewiduje się uzyskanie znacznie efektywniejszych wyników modyfikacji algorytmem ewolucyjnym. Granica opłacalności użycia algorytmu ewolucyjnego wymaga osobnego zbadania w dalszej części pracy. Z kolei dla struktury wertykalnej

podniesienie efektywności jest równe 80-205%. Oznacza to znacznie większą skuteczność wykorzystania modułów w strukturach wysokich, gdzie większość modułów usytuowana będzie w pozycji pionowej. To implikuje możliwość pracy modułów w sposób analogiczny do cięgien stężających w strukturach szkieletowych. Ponadto przy wzroście smukłości elementu wzrasta skuteczność modyfikacji topologicznej struktury. Oznacza to ukierunkowanie dalszych badań na struktury wysokie oraz smukłe.

W dalszej kolejności badaniu podlega skala oraz wysokość struktury. Dla kolejnych geometrii struktur smukłych wykonano serie badań wykorzystania algorytmu ewolucyjnego operującego układem topologii. Dla struktur o podstawie 1x1, 2x2 oraz 3x3 moduły, przeprowadzono badania zmian sztywności podczas manipulacji prętami środkowymi analogicznie do pierwszego badania. Proces modyfikacji wykonywano dla kolejnych 7 przypadków obciążeniowych. W każdym występowała siła grawitacji równa 9,98m/s2, a w 6 z badań dodatkowo zamodelowano obciążenie wiatrem o prostej formie trójkątnego obciążenia powierzchniowego zwiększającego swoją wartość ku górze, przyłożonego do powierzchni zewnętrznej struktury i rozłożonego następnie na węzły w postaci sił skupionych. Wartością odniesienia 1,0 jest średnia wartość ciśnienia obciążenia poziomego przyjmowana dla analogicznych badań równa 0,44kN/m^2. Dla każdej struktury w czasie badania przeanalizowano 1300 układów dobieranych przez algorytm w celu minimalizacji parametru strzałki ugięcia liczonej w milimetrach. Ze względu na wzrost stopnia złożoności kolejnych układów struktur w zestawieniu ujęto średni czas wymagany do przeliczenia odpowiedniej liczby przypadków.

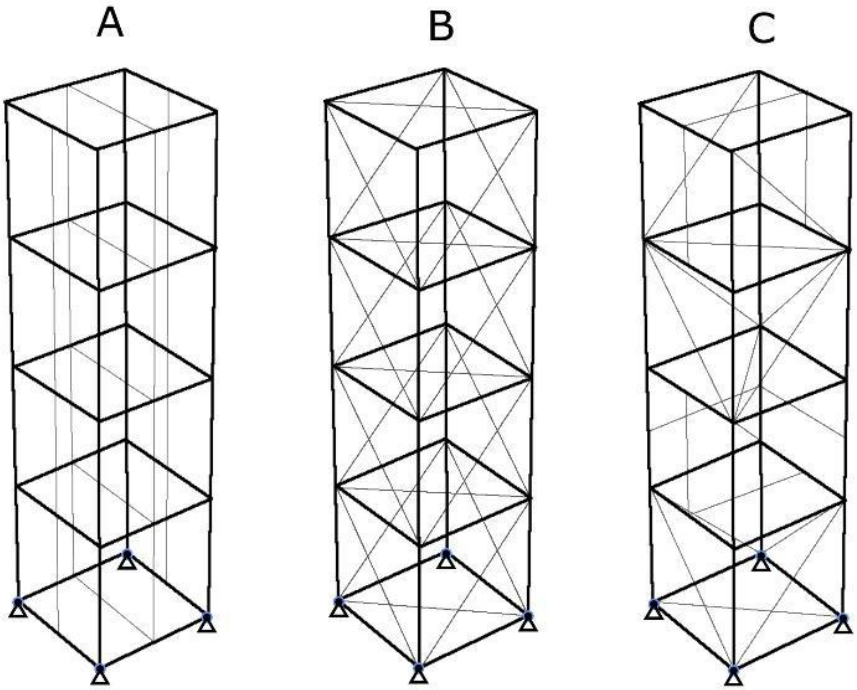
Tabela 26.Zestawienie przypadków obciążeniowych na cele badania efektywności w różnych przypadkach statycznych oddziaływań. Wszystkie obciążenia posiadają niezerową składową pionową odpowiadającą za oddziaływanie grawitacji.

Zestawienie przypadków obciążeniowych. Składowe obciążeń podano w kN

przyp. 1)	przyp. 2)	przyp. 3)	przyp. 4)	przyp. 5)	przyp. 6)	przyp. 7)
X= 0	X= -0,1	X= 0	X= -0,1	X= -0,5	X= 0	X= -0,5
Y= 0	Y= 0	Y= -0,1	Y= -0,1	Y= 0	Y= -0,5	Y= -0,5

10.2.4 Wyniki badań i zdolność zachowania geometrii podczas oddziaływania obciążeń w próbach badawczych

Zestawienie wyników zaprezentowano w ujęciu tabelarycznym w Tabela 26. Dla każdej geometrii podano trzy wartości. Są to kolejno strzałki ugięcia ***„a)”*** dla struktury o pionowych i równoległych prętach środkowych, ***„b)”*** o skratowanym układzie wszystkich prętów oraz ***„c)”*** o orientacji dobranej w procesie modyfikacji algorytmem ewolucyjnym co przedstawiono na Grafika 101. Zauważa się kilka tendencji wyników. Przede wszystkim wzrost skuteczności działania modułów występuje dla sił poziomych o średnich i wysokich wartościach. Dla wartości siły wiatru równej 0,1 odnotowano znacznie lepsze wyniki, niż dla braku wiatru oraz większych wartości sił w przypadku struktur 1x1x4 oraz 2x2x8. Modele o jednakowej smukłości, lecz różnych skalach osiągnęły wzrost efektywności odpowiednio o 42% oraz 89%, co stanowi bardzo rozbieżne, lecz w obu przypadkach znaczące poprawy efektywności. Precyzuje to najefektywniejszą grupę struktur dla dalszych badań.



Grafika 101. Trzy kolejne układy skratowań modeli złożonych z modułów responsywnych topologicznie. Model "A" jest bazowym układem nie optymalizowanym pod względem strukturalnym. Układ "B" stanowi proste skratowanie efektywne, powszechnie stosowane szczególnie przy użyciu cięgien. Model „c'' stanowi przykładowe skratowanie sterowane algorytmem ewolucyjnym.

Wyjściową geometrią dla wszystkich kształtów oraz przypadków obciążeniowych jest skratowanie modułów w jednym kierunku. Jest ona domyślnym układem będącym referencją dla pomiarów skuteczności działania modelu responsywnego. Współczynniki prezentowane z oznaczeniami kolorystycznymi w

Tabela 27 są ilorazami trzeciej wartości przez drugą, czyli wyniku po modyfikacji algorytmem przez wartość dla struktury skratowanej w prosty sposób. W tabeli zebrano bezwymiarowe wartości funkcji odkształcenia modeli. Reprezentują one proporcje odkształceń, między w różny sposób skratowanymi strukturami. Dodatkowym odniesieniem jest układ prętów środkowych w pozycji pionowej. Jest on generalnie nieefektywny, lecz w sytuacji znacznej dominacji sił pionowych nad poziomymi układ taki przyjmuje najefektywniejszą formę geometryczną. W efekcie dla żadnego przypadku o blisko zerowej sile poziomej algorytm nie znalazł geometrii efektywniejszej co nakazuje wnioskować, że istnieje granica aktywacji systemu wyrażona siłą poziomą, po której powinien nastąpić proces przeliczania efektywnych geometrii. Co więcej granica aktywacji zawiera się w przedziale 0,0-0,1 siły poziomej z badania, czyli poniżej 0,042kN/m^2. Przed tym stanem z kolei należy wszystkie pręty orientować w pozycji domyślnie pionowej. Nakłada to konieczność zdefiniowania granicy aktywacji algorytmu.

Tabela 27. Zestawienie wyników pomiarów odkształceń modeli pod obciążeniem siłami zewnętrznymi. Dla kolejnych 7 przypadków obciążeniowych przebadano 9 wersji struktury wysokiej. W tabeli zebrano wyniki w formie wartości funkcji odkształcenia. Nie reprezentuje ona rzeczywistych

odkształceń, lecz reprezentuje w formie bezwymiarowej proporcje przemieszczeń wszystkich elementów poszczególnych struktur pod zróżnicowanymi obciążeniami.

przypadek obciążeniowy (kierunek sił)	X=0	X=-0,1	X=0	X=-0,1	X=-0,5	X=0	X=-0,5
	Y=0	Y=0	Y=-0,1	Y=-0,1	Y=0	Y=-0,5	Y=-0,5
	Z=-1	Z=-1	Z=-1	Z=-1	Z=-1	Z=-1	Z=-1
1	144,36	5129,09	4812,94	7029,36	25637,44	24052,52	35140,98
	175,25	3805,73	3795,26	6002,07	19638,92	19935,73	28861,46
1x1x4	144,36	3439,79	3417,49	4867,52	17301,65	17262,05	24993,21
	1	0,9	0,9	0,81	0,88	0,87	0,87
2	232,39	13823,58	12877,52	18888,24	69108,5	64377,64	94434,34
	291,03	10539,52	9387,14	14462,95	52964,54	53196,13	71427,05
1x1x8	232,39	8167,18	7959,67	11479,7	40100,78	40152,45	58219,39
	1	0,77	0,85	0,79	0,76	0,75	0,82
3	489,64	14782,73	16257,17	21969,51	73882,15	81076,84	109711
	611,83	9521,42	8937,13	15186,06	47396,38	51285,73	62853,85
1x1x12	489,64	6689	6199,62	9288,49	32994,05	33087,73	47168,73
	1	0,7	0,69	0,61	0,7	0,65	0,75
4	116,44	1161,26	1387,79	1805,05	5789,79	6916,03	9017,46
	148,77	156,55	157,85	165,15	267,89	319,34	384,51
2x2x4	116,44	115,14	113,74	123,42	247,19	276,67	349,57
	1	0,74	0,72	0,75	0,92	0,87	0,91
5	213,26	4915,34	5830,34	7621,44	24554,32	29135,35	38095,15
	281,85	692,79	701,05	958,78	3188,88	3203,43	4545,69
2x2x8	213,26	588,2	538,27	693,43	2636,86	2813,78	3224,99
	1	0,85	0,77	0,72	0,83	0,88	0,71
6	356,89	12072,179	14133,992	18576,793	60319,125	70640,41	92867,867
	503,118	7948,585	7948,585	11286	39507,731	39507,731	56169,282
2x2x12	356,89	2607,437	2594,374	3621,335	34164,963	32402,671	48536,532
	1	0,33	0,33	0,32	0,86	0,82	0,86
7	121,18	1148,31	1398,14	1802,63	5725,46	6976,1	9005,08
	156,26	201,67	192,42	230,97	430,23	367,91	553,47
3x3x4	121,18	115,67	122,86	118,54	240,74	257,61	326,62
	1	0,57	0,64	0,51	0,56	0,7	0,59
8	226,58	4740,99	5757,82	7451,5	23685,29	28777,16	37245,02
	522,21	929,84	929,84	1147,02	2906,58	2906,58	3788,48
3x3x8	226,58	334,1	350,45	433,26	1902,76	1832,98	2347,57
	1	0,36	0,38	0,38	0,65	0,63	0,62
9	388,03	11265,7	13570,78	17623,75	56289,68	67827,87	88101,54
	1116,82	2925,35	2925,35	3758,58	11132,76	11132,76	14675,63
3x3x12	388,03	1539,83	1802,14	2047,96	7520,42	7402,63	10782,18

Największy wzrost efektywności dla struktur 2x2x4 przy sile bocznej równej 0,5g podkreśla korelację efektywnej siły poziomej do smukłości struktury. Dla dużej smukłości efektywne były niskie wartości obciążenia bocznego, z kolei przy wzroście siły znacznie lepsze

efekty uzyskano dla przysadzistych modeli. Na potrzeby kolejnych testów założono najefektywniejszą smukłość struktur za równą 1 do 4, gdzie pierwszy parametr to liczba modułów w kwadratowej podstawie w obu kierunkach, a druga to wysokość struktury liczona również w modułach oraz skalę średnią z badanych czyli o wielkości modułu 2x2 w podstawie.

Nie prezentowano zestawienia dodatkowych deformacji, lecz wraz ze wzrostem wysokości modelu, niezależnie od jego smukłości, zauważa się wyraźne skręcenie globalne struktury. Jest ono zauważalne przy sile poziomej przy wartości 0,026kN/m^2. Osobne badania powinny wykazać zdolność analizowanych modułów do przeciwdziałania zjawisku lub zdefiniować płaszczyznę układania nowych modułów w celu zwiększenia sztywności skrętnej. Rotacja maksymalna wystąpiła dla modułu 2x2x8 i osiągnęła wartość 5,32 stopnia kątowego dla prostego skratowania. Z kolei dla zoptymalizowanego układu wyniosła 4,18 stopnia. Jednak nie dla każdego przypadku modyfikacja algorytmem ewolucyjnym dawała wzrost sztywności skrętnej. Struktura 3x3 moduły w podstawie odznaczała się nierównomiernym skręceniem. Dla kolejnych pięter prezentowała następujące rotacje podawane w stopniach kątowych:

Tabela 28.Zestawienie kolejnych wartości obrotu modułów względem podłoża przy obciążeniu maksymalnym poziomym na wysoką strukturę o małym momencie bezwładności.

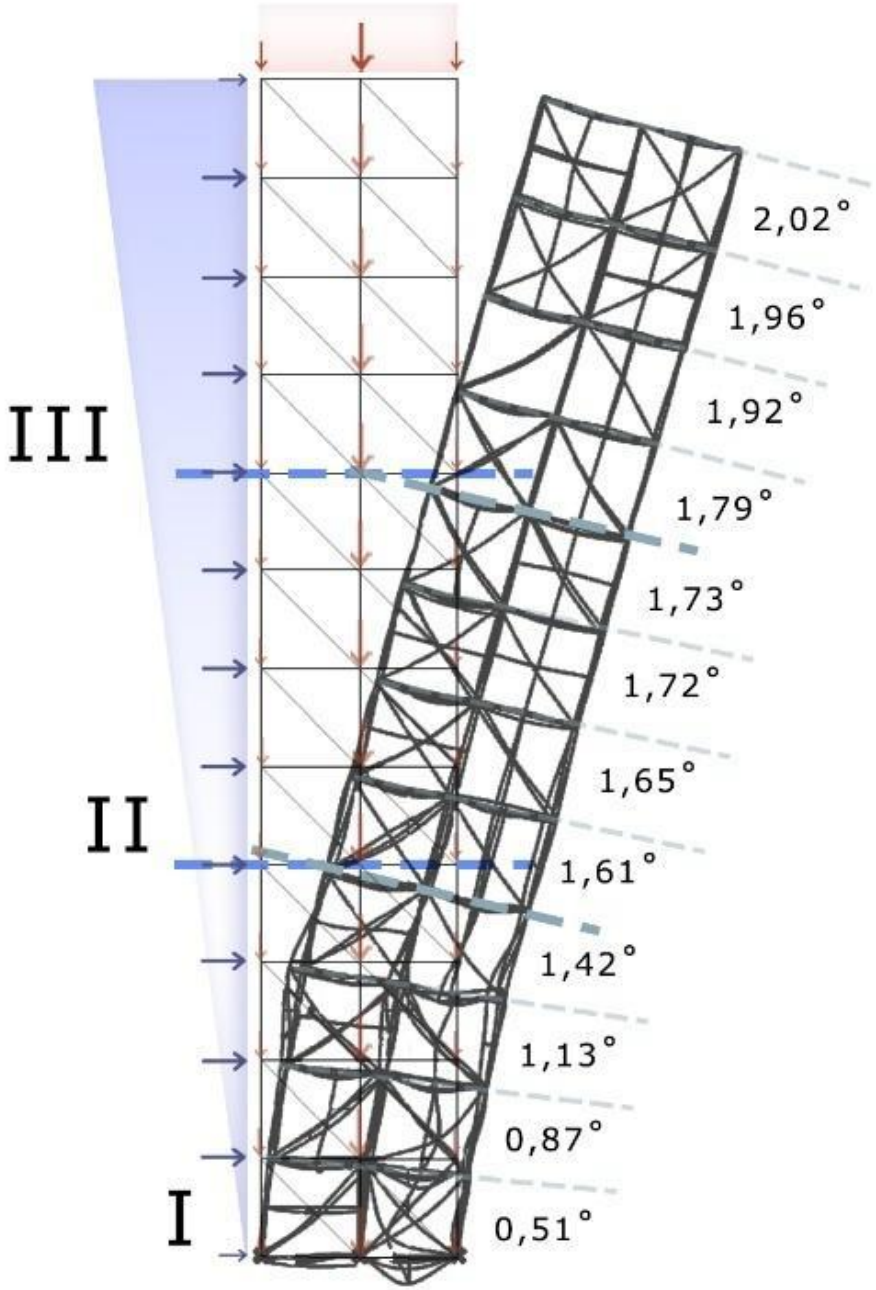
Maksymalne kąty obrotu elementów na danych poziomach dla struktury 3x3x12

Nr poziomu	Obrót w stopniach [°]
1	0,08
2	0,19
3	0,35
4	0,62
5	0,97
6	1,62
7	3,15
8	3,95

Model utrzymuje bardzo dobrą sztywność układu do kondygnacji nr 5. Następnie skokowo zwiększa się kąt nachylenia powodowany wystąpieniem granicy osiowości prętów pionowych. Na kondygnacji 7 skręt przyjmuje największą wartość, ze względu na przekroczenie granicy osiowości, a sztywność utrzymywana jest pionowymi modułami łączącymi zewnętrzne ściany ze środkiem rdzenia struktury. To one poddawane są przy skręcie największej zmianie długości. Ich obrót w module dla zmniejszenia zjawiska odkształcenia obrazuje preferencję systemu do poddawania prętów środkowych siłom rozciągającym bardziej niż ściskającym, co jest zgodne z powszechnie przyjmowanymi rozwiązaniami modelowania.

10.2.5 Tendencje układów prętów środkowych

Układy uzyskiwane w procesie modyfikacji algorytmem ewolucyjnym przyjmują wyraźnie losowy układ. Brakuje w ich topologii wzorów i schematów ułożenia elementów charakterystycznych dla najefektywniejszych stosowanych powszechnie rozwiązań. Losowość ta wpływa na wynik końcowej efektywności. Jej występowanie powodowane jest zbyt dużą liczbą przypadków jakie należałoby przebadać w procesie poszukiwania topologii, aby uzyskać satysfakcjonujący układ sąsiadujących modułów. Mimo znacznego zróżnicowania układu wszystkich prętów ustroju zauważyć można lokalne schematy oraz tendencje uzyskiwania sztywności. W największym stopniu na odkształcenia wpływa układ elementów w dolnej partii struktury (I) przedstawiona na Grafika 102. Pierwsza tercja elementów licząc od dołu struktury ma największy wpływ na efektywność układu, ze względu na możliwość minimalizacji mocy obliczeniowej potrzebnej do wypracowania kształtu o

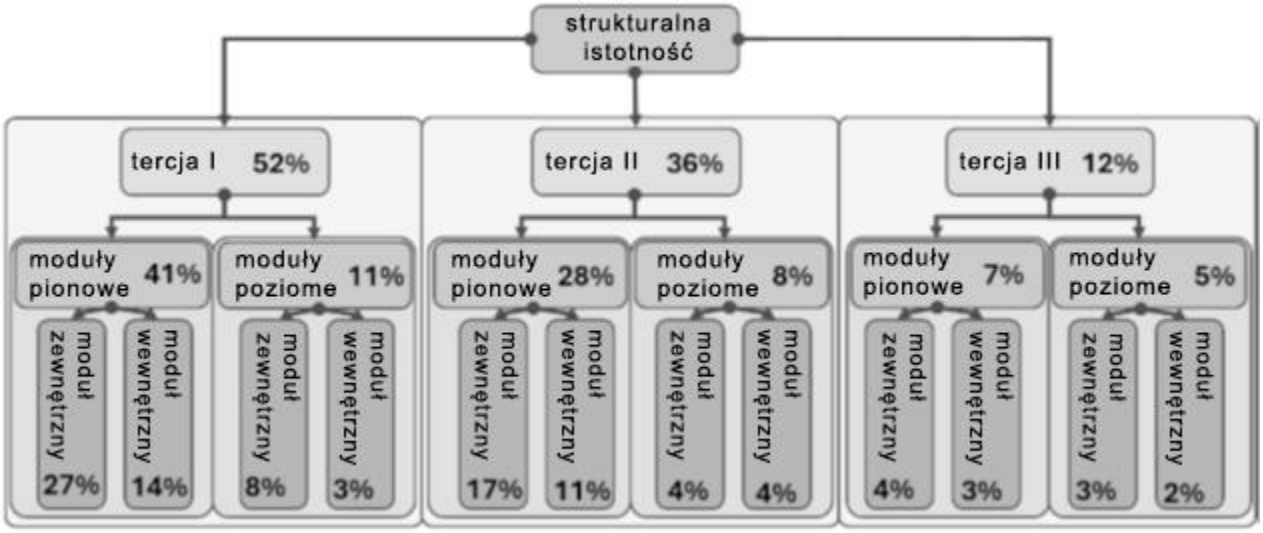


Grafika 102.Geometria zdeformowanej obciążeniami struktury. Odchylenie od pionu liczone jest dla poziomych pasm prętów każdego poziomu modułów osobno.

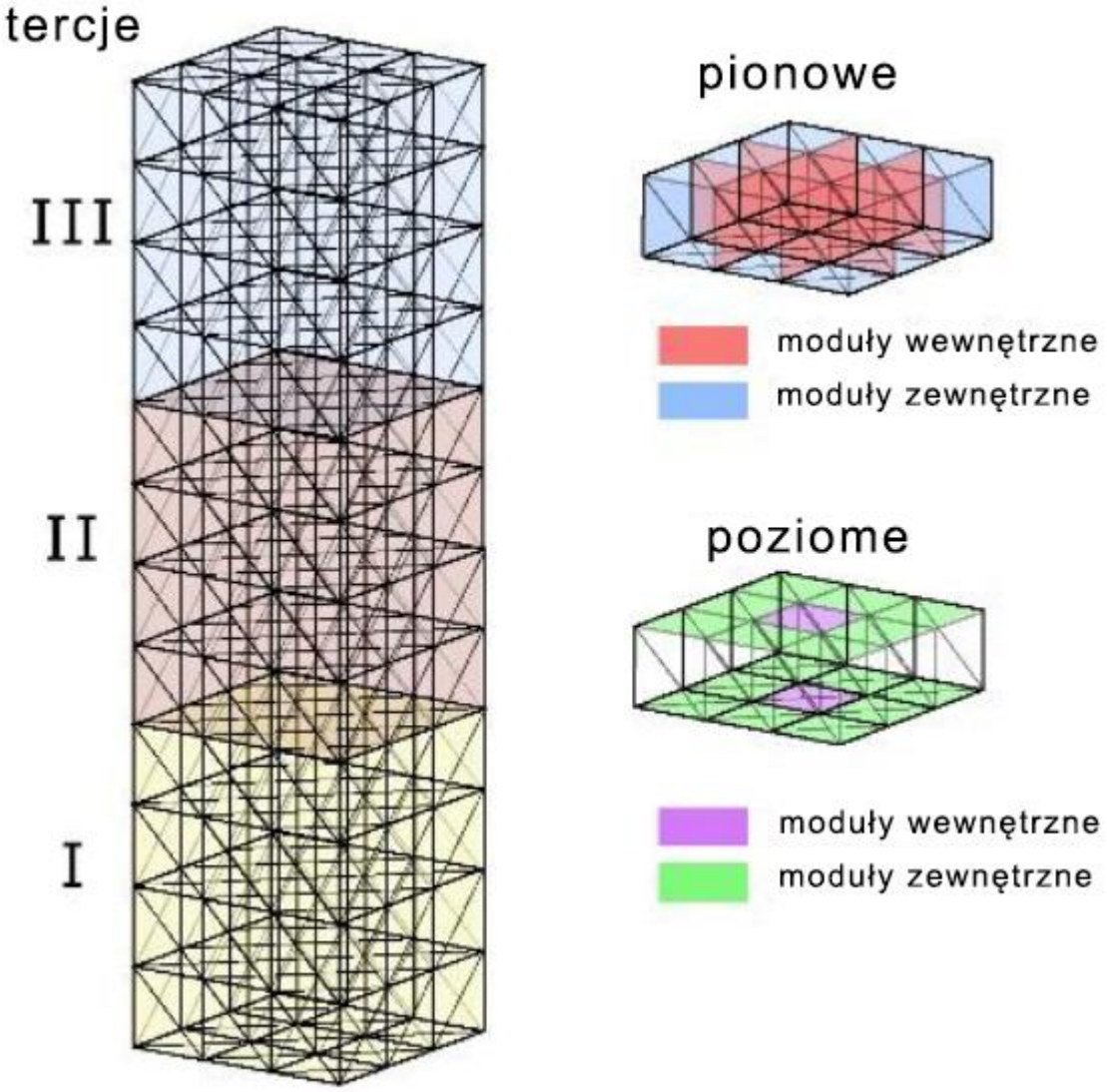
najwyższej sztywności. Większość elementów strefy dolnej oraz środkowej (I) i (II) przyjmuje układ skratowany wykorzystując obrotowy pręt jako stężenie. Program uwzględnia większe bezpieczeństwo struktury podczas pracy rozciąganej pręta, niż podczas ściskania dlatego też ukierunkowanie prętów środkowych wpływa na efektywność modelu. Program najczęściej dąży do uzyskania pracy cięgnowej w miejsce skratowania ściskanego.

Szczególnie dla modeli o większej ilości modułów w podstawie zauważa się powtarzalność rozwiązań na danej grubości przekroju. Tzn. powtarzalność układu pręta środkowego dla modułów pionowych na tej samej wysokości. Jest to najpewniejszy sposób poprawy sztywności podczas poszukiwania jak najszybciej osiągalnych rozwiązań. Dla dłuższych czasów obliczeniowych możliwe jest znalezienie bardziej kompleksowych układów elementów zaburzających tę powtarzalność. Podczas ręcznych pomiarów i zmian topologii w obrębie pojedynczych poziomów elementów poprawę efektywności uzyskiwano jedynie w 13,4% przypadków. Niestety ze względu na ilość możliwych kombinacji jedynie w najmniejszych strukturach udało się uzyskać minimalne kombinacje wysoce efektywne. Z kolei wewnętrzne moduły wpływają na sztywność układu w znacznie mniejszym stopniu niż zewnętrzne. Najbardziej bierną pod omawianym względem grupą elementów są wewnętrzne poziome moduły, których modyfikacja sztywności jest prawie nieodnotowywalna. Minimalnie większą istotnością charakteryzują się moduły poziome zewnętrzne, lecz oba zjawiska wskazują na dobrą bazową sztywność modułów i brak konieczności wzmacniania struktury w poziomie. Determinuje to przeznaczenie zmienności topologicznej jako narzędzia usztywniania pionowego struktury w przypadku obciążeń wiatrem. Dla 3 struktur wykonano pomiary istotności wpływu lokalizacji elementu w strukturze na sztywność całej struktury. Pomiary wykonywano jako dzielenie wyników formuły modyfikacyjnej dla najgorszego ręcznie znalezionego przypadku przez wynik formuły po modyfikacji algorytmem ewolucyjnym.

Według schematu z Grafika 103 podzielono wszystkie moduły wszystkich struktur na grupy. Tylko w największym modelu (3x3x12) wystąpiły wszystkie rodzaje elementów według podziału na 12 typów elementów zgodnie z Grafika 104. Dla mniejszych modeli odpowiednio nie występowały elementy trzeciej i drugiej tercji oraz moduły wewnętrzne poziome. Elementy zostały pogrupowane według wcześniejszych wniosków analiz uzyskanych topologii i deformacji struktur. Badania przeprowadzono dla struktur 2x2x8, 2x2x12 ,3x3x8, 3x3x12.



Grafika 103.Przedstawienie wyników wpływu poszczególnych elementów na sztywność całkowitą struktury. Widoczny jest największy wpływ elementów dolnych sekcji.



Grafika 104.Podział modelu badawczego na elementy przynależne konkretnym segmentom struktury. Na podstawie przedstawionego podziału liczono dalej istotność udziału elementów w całkowitej sztywności modelu.

10.2.6 Analiza istotności poszczególnych elementów modelu

W celu policzenia ***poziomu istotności*** modułów w strukturach wysokich poddawanych badaniu w pierwszej kolejności wykonywano obliczenia istotności. W tym celu różnice ugięć struktury dla danego modułu przy najgorszym i wypracowanym przez algorytm układzie topologicznym dzielono przez sumę ugięć dla całej struktury.

$$in_{x,c} = s_{l_{x,c}} - s_{u_{x,c}} \tag{10.1}$$

$$af_{x,c} = \frac{in_{x,c}}{\sum_{i=0}^{x}(in_{x,c})} \tag{10.2}$$

Współczynnik $af_{x,c}$ jest parametrem określającym udział pojedynczego modułu w pojedynczym przypadku obciążenia na całkowitą sztywność struktury w danym przypadku obciążenia. Parametr przyjmuje wartości od 0 do 1. Dla wszystkich modułów wszystkich struktur zawierał się w przedziale od 0,0003 do 0,0371. Dalej wyznaczany jest poziom

istotności struktury, która wynika z udziału każdego pręta w każdym przypadku obciążenia. Dla parametrów udziału każdego z modułów tworzy się matrycę wartości

$$Maf_x = \begin{bmatrix} af_{x,1} \\ \vdots \\ af_{x,c} \end{bmatrix} \tag{10.3}$$

Następnie do dalszych obliczeń wybierany jest parametr o największej wartości z danej grupy przypadków

$$inl_x = \max_x(af_x) \tag{10.4}$$

Następnie podobnie jak dla wpływu obliczana jest składowa indywidualnego ***wpływu*** na sumaryczny parametr ***wpływu***

$$r_x = \frac{inl_x}{\sum_{i=0}^{x}(inl_x)} \rightarrow r_s = \sum_{i=0}^{m} r_x \tag{10.5}$$

Poziom wpływu jest więc parametrem obrazującym stopień wpływu danej sekcji modułów oraz pojedynczego modułu na podstawie uśrednionych wartości udziału każdego modułu na sumaryczną efektywność struktury. Badanie przeprowadzono półautomatycznie. Poszukiwanie wartości $s_{l_{x,c}}$ oraz $s_{u_{x,c}}$ przeprowadzane było ręcznie oraz spisywane w formie tabelarycznej. Następnie sformatowany arkusz przeliczał automatycznie wartości poszczególnych składników. Wyniki w formie procentowej prezentowane są na Grafika 103.

Z kolei dla obliczenia pewności otrzymanych wartości wykonano obliczenia współczynnika test IQR. Ze względu na brak możliwości przebadania wszystkich możliwych przypadków obciążeniowych ograniczona pula wymusza zastosowanie ***współczynnika determinacji*** w celu estymacji maksymalnych i minimalnych wartości ***poziomu wpływu*** jakie mogą osiągnąć poszczególne moduły oraz sekcje według Grafika 105. Za granicę wartości przyjmuje się górną i dolną granicę według wzoru Q1 i Q3

$$IQR_{S_s} = \sum_{i=0}^{c} IQR_{s,i} \tag{10.6}$$

$$Lower\ bound\ s_s = Q1_{s_s} - 1{,}5 * IQR_{s_s},\ Upper\ bound\ s_s = Q3_{s_s} + 1{,}5 * IQR_{s_s} \tag{10.7}$$

Gdzie kolejno:

$s_{l_{x,c}}$ − największa wartość ugięcia spośród kombinacji ułożenia pręta środkowego danego modułu

$s_{u_{x,c}}$ − Ugięcie dla topologii ułożenia pręta środkowego przez algorytm ewolucyjny

$in_{x,c}$ − wpływ zmian topologii danego modułu na sztywność struktury

$af_{x,c}$ − oddziaływanie danego modułu w odniesienu do wszystkich modułów

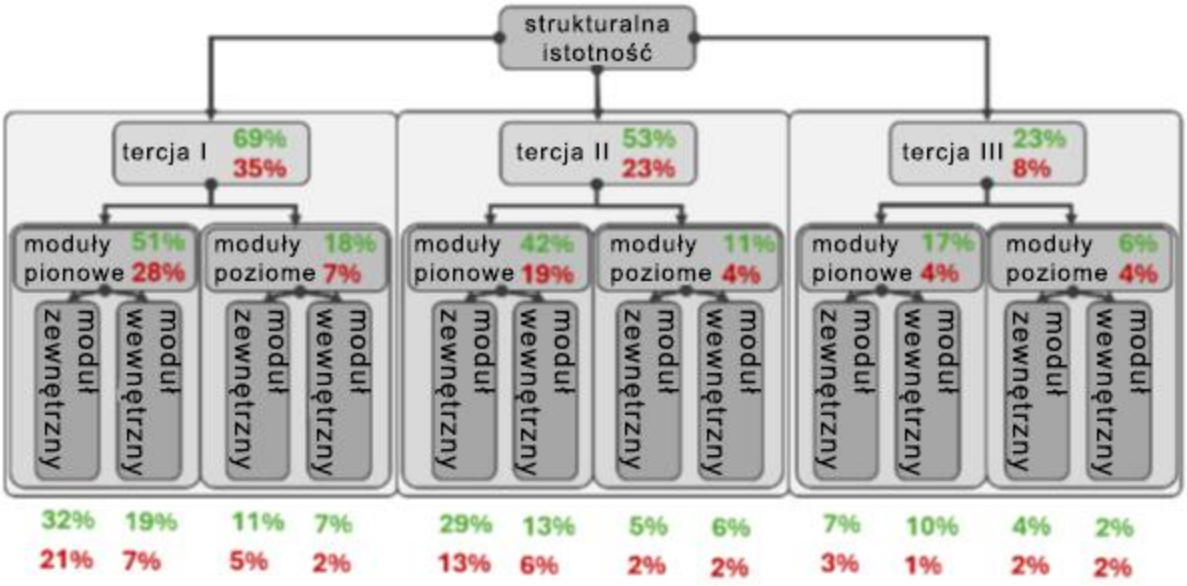
Maf_x − matryca oddziaływań przechowująca dane jednego modułu z wszytkich badań

inl_x − maksymalna wartość oddziaływania topologii modułu na sztywność całego układu

r_x, r_s − kolejno istotność danego modułu oraz istotność całej sekcji modułów na sztywność całkowitą struktury

Obliczono spodziewane graniczne wartości istotności każdej sekcji. Na Grafika 105 kolorem czerwonym oznaczono wartości Q1, a zielonym Q3. Zgodnie z grafiką wartości Q1 oraz Q3 wahają się w sposób zróżnicowany w zależności od typu elementu. Zauważalna jest różnica znaczenia elementów pionowych oraz poziomych. Poziome charakteryzują się

znacznie mniejszym rozstrzałem wartości, lecz przy jednocześnie mniejszym wpływie na ogólną sztywność. Zróżnicowanie wpływu jest mniejsze dla wyżej położonych modułów, lecz proporcjonalnie rośnie dla nich przedział wartości.



Grafika 105.Wyniki wpływu elementów na sztywność struktury. Zakresy podane zostały dla Q1 oraz Q3.

10.2.7 Wnioski badań efektywności geometrii

Wyniki dowodzą zróżnicowania wpływu różnych elementów na sztywność w różnym stopniu. Dominującym rodzajem elementów są wertykalne, a obecność elementów w rdzeniu trzeciej tercji nie jest kluczowa. Jedynie zapewniają one triangulację skratowania wszystkich komórek strukturalnych modułów. Zgodnie z wynikami największy wpływ na sztywność układu mają elementy zewnętrzne dolnej tercji. Dodatkowo są one najbardziej znaczące w przeciwdziałaniu skręceniu struktury zmniejszając je o 52%. Drugim najważniejszym typem są elementy pionowe zewnętrzne drugiej tercji. We wszystkich strukturach elementy poziome pełnią drugorzędną funkcję. Cały rdzeń struktury wszystkich modułów o podstawie 3x3 ma udział w sztywności struktury na poziomie od 5% do 14%. Dla struktur o podstawie 2x2 znacznie większym udziałem odznaczały się moduły poziome, przewyższając udziałem w ogólnej sztywności pionowe elementy wewnętrzne. W strukturach o podstawie 2x2 niektóre rozwiązania przyjmowały postać ortogonalnych układów prętów środkowych z tendencją do orientacji poziomej. Było to szczególnie zauważalne przy dominującej sile pionowej. Dla struktur 1x1 zauważyć można było największą powtarzalność układów na poszczególnych poziomach. Od 1 do 7 poziomu struktur o dwóch oraz trzech tercjach wszystkie elementy przyjmowały kształt ukośny. Na wyższych poziomach efektywniejsze były układy ortogonalne, które program zdecydował się zastosować. Dla największych modułów w pojedynczym poziomie w modułach horyzontalnych zauważalne było prowadzenie prętów ruchomych tak, aby koniec jednego modułu był kontynuacją kolejnego. Wszelkie ręcznie wprowadzane zaburzenia tej zasady skutkowały istotnym negatywnym wpływem na sztywność układów. Oznacza to możliwość zmniejszenia puli potencjalnie efektywnych rozwiązań do topologii, w których zachowana jest ciągłość prętów poziomych. Dalsze ograniczenia przypadków topologii dotyczą ukośnego orientowania zewnętrznych elementów dolnej tercji każdego typu struktury, lecz jedynie przy przekroczeniu pewnej wartości obciążenia poziomego. Podczas poszukiwania efektywnych topologii przez algorytm, ten zaczyna testowanie od najniższych modułów według kolejności podłączania parametrów do algorytmu podczas budowania modelu na cele symulacji. W ciągu pierwszych 20% czasu badań uzyskiwał w większości przypadków efektywność 60% ostatecznego wyniku.

Należy uwzględnić również zróżnicowanie liczby modułów danego rodzaju w strukturze. Przy przeliczeniu istotności w odniesieniu do pojedynczego modułu najbardziej efektywnymi modułami zostają elementy wewnętrzne poziome z istotnością na poziomie 0,75% na moduł. Następnie zewnętrzne pionowe. Ich istotność w dolnej partii to średnio 0,563% na moduł. Najmniejszą istotność wykazały elementy poziome zewnętrzne. Wyniosła ona 0,23% na moduł. Dla struktur o większych podstawach odpowiednio istotność zewnętrznych modułów rosła, lecz była ona nierówna na całym obwodzie. Największy wpływ na sztywność miały moduły skratowane, pozycjonowane równolegle do kierunku przyłożenia największych sił. Proporcja sił wzrastała wraz z wielkością podstawy struktur oraz przyłożonymi siłami bocznymi w zakresie od 1,1 do 4,2 raza.

10.3 Badania potencjału wzrostu efektywności modelu zdolnego do responsywności topologicznej

Dotychczas opisane badania zawężały grupę struktur o szereg właściwości jak smukłość, czy obecność skrajnych lub wewnętrznych modułów, lecz nie prezentowały porównań właściwych, gdzie konfrontowane są ugięcia modeli statycznych z responsywnymi. Dla zbadania opłacalności przeprowadzono badania porównawcze pojedynczego modelu dla kilku kolejnych przypadków obciążenia. Do przeprowadzenia właściwych pomiarów efektywności wykonano kolejny model struktury o wymiarach 2x2x8 modułów, a następnie jednocześnie obciążono go 7 przypadkami obciążeń. Zadaniem algorytmu ewolucyjnego było w pierwszej kolejności wypracowanie pojedynczej geometrii prętów obrotowych do uzyskania uniwersalnego statycznego układu prętów, dla którego sumaryczne ugięcie wszystkich 7 przypadków obciążenia było najmniejsze. W dalszym kroku dla każdego przypadku indywidualnie wypracowywano najefektywniejszą geometrię symulując zachowanie modelu responsywnego, który może dostosowywać się w czasie rzeczywistym do zmiennych warunków środowiskowych. Wszystkie przypadki złożone były z siły grawitacji oraz jednej lub dwóch sił bocznych. Siła grawitacji była stała dla wszystkich elementów i wynosiła g=9,98[m/s^2]. Natomiast siła pozioma zmieniała się wraz ze zmianą wysokości zgodnie z powszechnie przyjmowanymi modelami obciążenia zmiennego w zależności od wysokości. Mimo, iż struktura nie jest tożsama z konstrukcjami, to obrana skala wyznacza znaczne podobieństwo badanego modelu do budynków wysokościowych pod względem wymiarów zewnętrznych oraz statycznej części nośnej. Przy uwzględnieniu wymiarów ścian struktury jako 20x80m i pełnej ekspozycji modelu na obciążenia poziome, wyznaczono wartość ciśnienia dla konstrukcji o analogicznej geometrii do analizowanej w badaniu. Podczas badań nie uwzględniano zachowań struktury w czasie zmian pozycji. Badano jej zachowanie w skwantyfikowanych pozycjach. Przyjmowano do analizy jedynie docelowe geometrie układów. Obciążenia powierzchniowe wyrażone w paskalach sumowano jako obciążenia skupione, przyłożone w punktach węzłowych ściany poddanej danemu obciążeniu. Synteza ta naśladuje zachowanie struktury posiadającej elewację szczelną, mocowaną sztywno w węzłach konstrukcyjnych budynku.

10.3.1 Budowa modelu

Model wykorzystany do badania składa się z 616 prętów. Utwierdzony jest we wszystkich punkach stycznych z poziomem „0” wysokości. Daje to sumarycznie 9 podpór. Do badań dobrano 3 rodzaje skratowania. Pierwsze ukośne powtarzalne dla całej struktury, drugie zoptymalizowane jednocześnie dla wszystkich przypadków obciążenia oraz trzecie optymalizowane indywidualnie dla każdego przypadku obciążenia reprezentujące strukturę responsywną topologicznie. Samą uniwersalną strukturę algorytm ewolucyjny dostosowywał 58 minut, przeprowadzając 1753 iteracje. Finalnie uzyskano wyniki średnio lepsze o 32% dla zoptymalizowanego modelu, względem prostego skratowania równomiernego. Z kolei dla każdego kolejnego z 7 przypadków obciążenia badania prowadzono od 20 do 25 minut przeprowadzając 800 iteracji. Dane zebrano w Tabela 29.

Tabela 29. Wyniki pomiarów ugięć dla struktury uniwersalnej oraz responsywnej w poszczególnych przypadkach obciążeniowych.

wyniki ugięć modelu uniwersalnego statycznego [mm]	ugięcia modelu responsywnego [mm]	przypadek obciążeniowy						
			0	1	2	3	4	5	6
576		0	429	693	2157	2162	573	965	737
575		1	833	432	641	661	578	943	722
311		2	374	335	282	284	366	275	283
310		3	379	334	284	284	369	274	284
754		4	876	765	2358	2361	580	1481	964
310		5	375	333	283	285	364	274	284
311		6	378	336	283	284	370	275	284

Tabela 30. Zestawienie proporcji ugięć struktury statycznej do responsywnej. Zestawienie jest komplementarne do Tabela 29.

		przypadek obciążeniowy						
		0	1	2	3	4	5	6
odkształcenie po modyfikacji	0	0,74	1,20	3,74	3,75	0,99	1,67	1,28
	1	1,45	0,75	1,11	1,15	1,00	1,64	1,26
	2	1,21	1,08	0,91	0,92	1,18	0,88	0,91
	3	1,22	1,08	0,92	0,92	1,19	0,88	0,92
	4	1,16	1,01	3,13	3,13	0,77	1,96	1,28
	5	1,21	1,07	0,91	0,92	1,18	0,88	0,92
	6	1,21	1,08	0,91	0,91	1,19	0,88	0,91

Model uniwersalny reprezentuje statyczny ustrój przestrzenny. Z kolei modele orientowane na pojedyncze przypadki są zbiorem kolejnych odpowiedzi systemu responsywnej struktury na zmienne warunki otoczenia w czasie. Porównanie obu modeli daje wymierny wskaźnik efektywności responsywnej struktury względem statycznych struktur, pozbawionych funkcji responsywnych.

10.3.2 Wyniki badań

Jak wynika z Tabela 30 zauważa się średnio 16% poprawę wyniku efektywności struktury responsywnej względem dostosowywanej do wszystkich przypadków naraz. Nie zauważa się jednak żadnej stałej tendencji zmian, umożliwiającej określenie minimalnej wartości wzrostu efektywności struktury przy użyciu funkcji modyfikacyjnej. Brak pewności uzyskania określonego poziomu efektywności wynika również z samego charakteru pracy algorytmu ewolucyjnego. Należy więc zakładać konieczność uzyskania wytrzymałości minimalnej przez jedną, zoptymalizowaną geometrię, definiując strzałkę ugięcia jako drugorzędny problem strukturalny, który może, lecz nie musi być każdorazowo niwelowany przez formułę modyfikacyjną. Z kolei względem prosto skratowanej struktury poprawa efektywności wynosi 45%. Dalej zauważa się znaczną zmianę efektywności układów między kolejnymi badaniami, co oznacza, że system ruchu i wykrywania obciążeń zewnętrznych musi być odporny na zakłócenia oraz awarie, aby uniknąć sytuacji gdzie dany układ topologiczny ze względu na zbyt dużą dynamikę zmian otoczenia w odniesieniu do reakcji systemu znajdzie się w bardzo niekorzystnym układzie sił. Jak widać w tabeli zabezpieczeniem jest przewymiarowanie układu strukturalnego niespełna 3,8 raza lub odpowiednio szybki system

obliczania i realizacji ruchu reakcji. W przypadku zmiany układu sił zanim system znajdzie efektywniejszą topologię możliwe jest też wprowadzenie powtarzalnego powrotu do domyślnej optymalizowanej geometrii. Zgodnie z tabelą przewymiarowanie będzie w takiej sytuacji wynosiło stale 1,42 raza. Wartość tę można dalej zmniejszać wprowadzając szereg geometrii domyślnych, z których każda przypisana będzie według największej efektywności reakcji na pewną pulę układów sił zewnętrznych. Dla dwóch odmiennych geometrii w badanym przypadku uzyskano redukcję konieczności przewymiarowania elementów do s_f=1,34 raza. Obie wartości są wymiernie akceptowalne pod względem wykonawczym. Należy przy tym założyć awaryjny system powrotu do geometrii bezpiecznej, aby w przypadku awarii podstawowego systemu nadal zachować operacyjność na czas modyfikacji. Dalej należy zbadać opłacalność zbioru bezpiecznych geometrii.

Deformacja struktury następuje nierównomiernie. Szczególnie jest zauważalna w górnej partii struktury. Na wysokości 5, 6 ogniwa wysokości zauważyć można nieproporcjonalnie duże ugięcia struktury w porównaniu do reszty jej geometrii. Przegięcie to nie jest kontynuowane w wyższych partiach struktury, dlatego też wnioskuje się, że dobrą praktyką jest dla takich stref struktury wykonać podwójne skratowanie responsywne, lub wykorzystać masywniejsze przekroje.

10.3.3 Wnioski

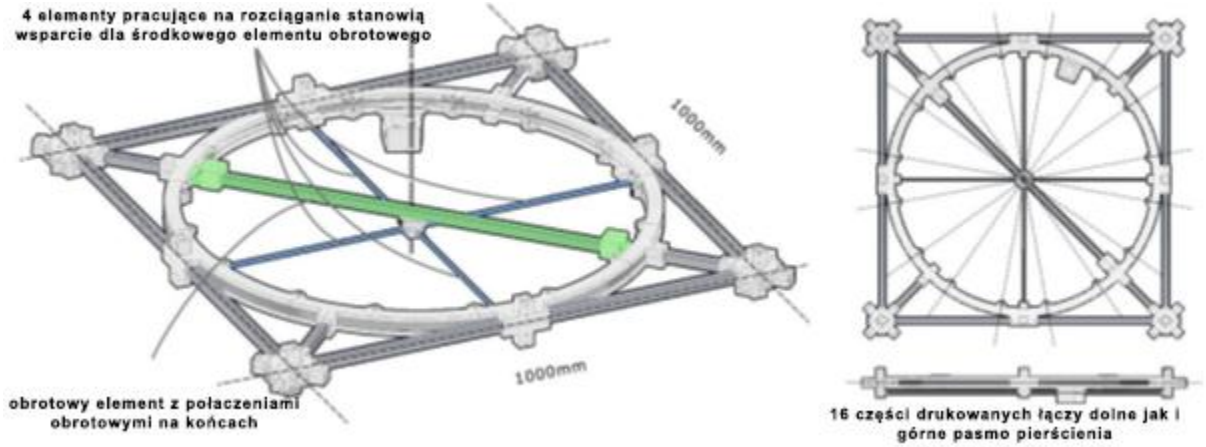
Badanie dowodzi skuteczności implementacji opracowanej metody. Elementy ruchome modelowane w prezentowanej formie spełniają wymagania zmniejszenia ugięcia, tym samym dla struktur obliczanych według przyjętych zasad mogą stanowić sposób zmniejszenia nakładu materiałowego. Kluczowe jest jednak również zbadanie opłacalności w rozliczeniu czasowym. Struktura zmniejsza koszt wykonawczy, wymuszając istnienie niezerowych kosztów eksploatacyjnych jak zużycie komponentów i energia potrzebna do zmiany topologii.

Dla modeli o większej bazowej strzałce ugięcia zauważa się większą efektywność poszukiwania sztywnej topologii. Wraz z rosnącą siłą wiatru wartości strzałki ugięcia analogicznych przypadków obciążenia, lecz z mniejszymi lub większymi wartościami sił charakteryzują się podobną efektywnością jak i ukształtowaniem topologii rozwiązań. Oznacza to, że od pewnej wartości obciążenia poziomego ujednolicają się efektywne topologie. Znajdując granicę lub ustalając ją arbitralnie można podzielić przypadki obciążenia na zakres małych sił bocznych gdzie liczy się proporcja sił bocznych do siły pionowej oraz zakres dużych sił bocznych gdzie przypadki różnicuje się jedynie ze względu na kierunek działania siły. Idealizując działanie wiatru do stale poziomego problemu różnicowania przypadków obciążeniowych upraszcza się do geometrycznej analizy dwuwymiarowej w rzucie.

10.4 Koncepcja fizycznego modelu responsywnego topologicznie

10.4.1 Koncepcja i geometria modelu

Model ogólny teoretyczny oraz jego wstępne wyniki badań wpływają na budowę modelu geometrycznego. Realizowany jest w celu zbadania przewidywalności zachowania elementów wyekstrahowanych z większej grupy. Ma walidować przyjętą geometrię oraz skuteczność ruchu w obrębie pojedynczego modułu, przy zachowaniu odpowiednich warunków brzegowych. W procesie modelowania formy oraz poszczególnych komponentów uwzględniano łatwość realizacji, definiując materiały oraz odpowiednie przekroje elementów montażowych. Zdecydowano się na wykorzystanie aluminium oraz materiału PLA generycznego dla biblioteki Autodesk. Struktura na cele realizacyjne przeskalowana została w proporcji 1:10 i dla takich wymiarów podawane są wszystkie parametry fizyczne.



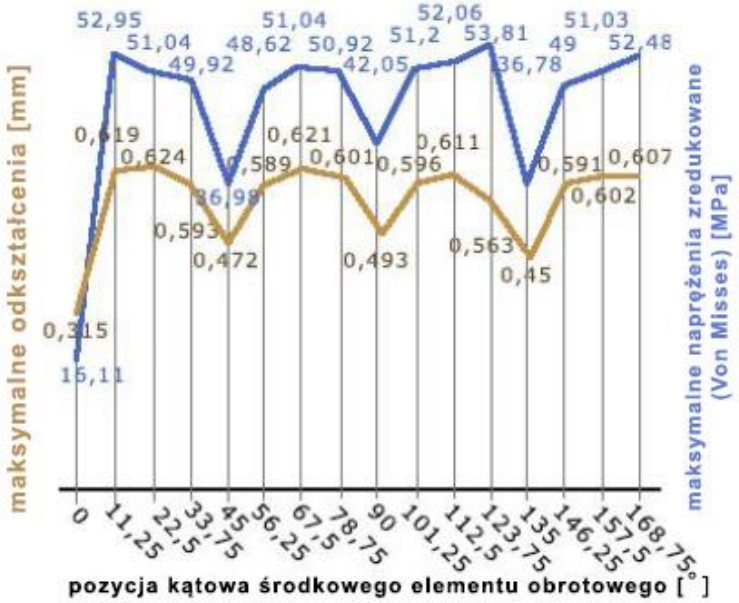
Grafika 106. Koncepcja modelu modułu powtarzalnego responsywnego topologicznie opracowanego na podstawie teorii ruchu opisanej we stępie badań. Struktura dzieli się na część ruchomą oraz statyczną. Zachowuje sztywność nawet przy usunięciu elementu ruchomego, lecz przy jego użyciu podnosi parametry statyczne struktury

Na Grafika 106 przedstawiono koncepcję modelu geometrycznego modułu responsywnego topologicznie. Rama kwadratowa złożona z aluminiowych profili cienkościennych systemu v-slot o wymiarach przekroju 20x20mm i długości 1m w narożach łączona jest elementami wykonanymi w PLA techniką druku 3D. Połączenia są dwukrotnie śrubowane śrubami M4 według opracowania systemowego. Wewnątrz ramy wpisany jest okrąg definiujący pierścień, po którym porusza się pręt środkowy. Pierścień stanowi podkonstrukcję będącą prowadnicą ruchomego pręta. Zapewnia ruch po zaprojektowanym torze, poprzez śrubowe połączenie z prętem w środku osi obrotu. Prowadnica nie stanowi elementu przenoszącego naprężenia poza strefami połączeń. Całość struktury widoczna na grafice stanowi pełny moduł, lecz nie jest on w całości wymagany przy łączeniu modułów ze względu na uwspólnianie elementów ramy. Wszędzie poza zdefiniowanymi kątami 0°, 45°, 90° oraz 135° rama zachowuje sztywność minimalną, wymaganą do przeniesienia naprężeń w zakresie dopuszczalnych wartości określonych dla modelu jako 10MPa, lecz przekracza maksymalne zdefiniowane ugięcia równe 1/300 rozpiętości modułu. Zakłada się, że pręt obrotowy nie bierze udziału w przenoszeniu sił w strukturze podczas ruchu. Specjalnie zaprojektowane przewężenia na prowadnicy tworzą ścisły kontakt między prętem ruchomym a ramą w momencie obrotu do pozycji łączenia, tworząc śluzę usztywniającą. Połączenie to pozwala na przenoszenie sił ściskających oraz rozciągających, lecz ich skuteczność przenoszenia wymaga osobnego opracowana. Po zakleszczeniu pręta w połączeniu, występuje ciągłość profilu na całej długości przekroju. W przenoszeniu sił osiowych prowadnica bierze udział marginalny, przekazując naprężenia w grubości swoich elementów. Wyprowadzone ukośnie z naroży profile usztywniają obręcz i stanowią przedłużenie pręta

środkowego przenosząc osiowo siły. Pręt środkowy został zamodelowany z użyciem takiego samego profilu v-slot jak rama zewnętrzna. Końcami zamocowanymi w sposób przesuwny w obręczy może poruszać się jedynie w jej prowadnicach. Rama łączy się z okręgiem w 8 miejscach. 4 z nich znajdują się w narożach oraz 4 połączone są w środkach długości prętów ramy. Wszystkie połączenia wykonano jako sztywne i mają pozytywny wpływ na sztywność całego układu. Cała obręcz oraz miejsca połączeń wykonane zostały z elementów PLA, wykonanych na drukarce 3D, połączonych wyoblonym środnikiem aluminiowym wykonanym z płaskownika 30x2mm. Na model składa się 41 elementów stanowiących opracowanie autorskie. Ponadto model wyposażony jest w silnik krokowy połączony z ramionami pręta obrotowego poprzez pas klinowy, prowadzony po wewnętrznej stronie prowadnicy. Na cele symulacji ruch sprowadzono do skwantyfikowanych pozycji pręta środkowego. Zewnętrzne elementy posiadają gotowe połączenia, dla kolejnych modułów w celu grupowania w bardziej złożone struktury. Wszystkie połączenia stałe wykonane są jako śrubowane. Zakłada się, że jakość druku wykonanego na drukarce Prusa MK4 jest wystarczająca dla uzyskania pewności połączeń i odpowiedniego stopnia zgodności z symulacjami.

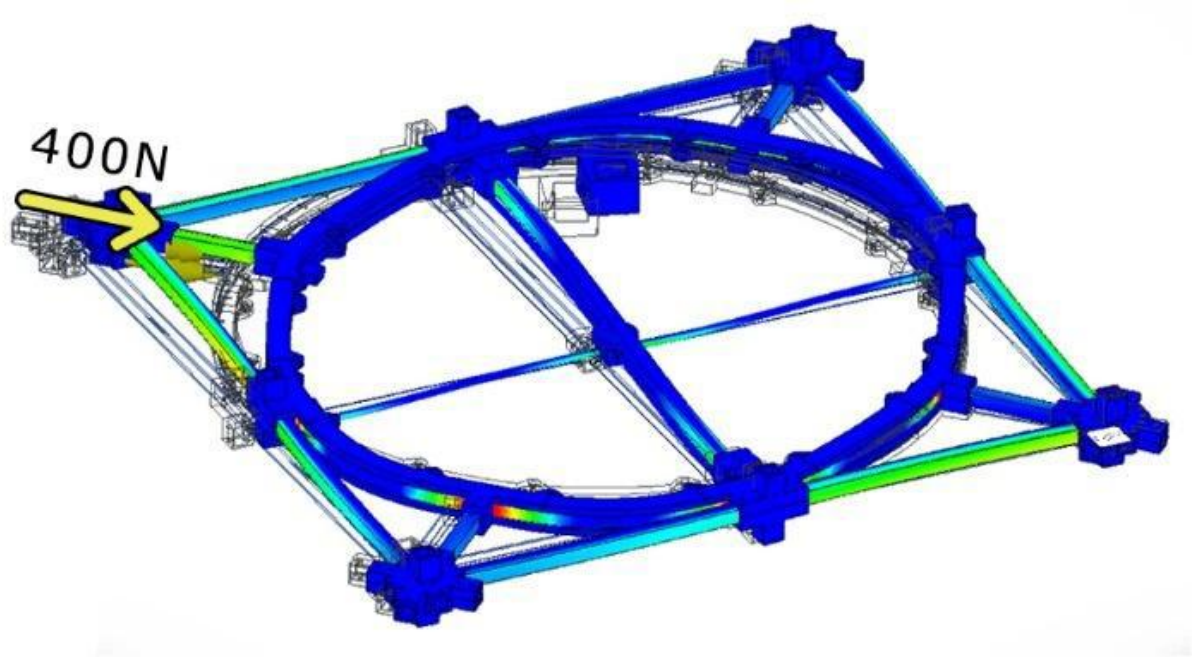
10.5 Badania zachowań modelu i właściwości statycznych w szerokim spektrum pozycji dyskretnych

W celu określenia proporcji elementów stałych do elementów ruchomych przeprowadzono wstępne badanie zachowania struktury dla pręta ułożonego w kolejnych równomiernie rozmieszczonych pozycjach. Skok obrotu między kolejnymi badaniami wynosił 11,25 stopnia. Badaniu podlegały maksymalne naprężenia oraz ugięcie dla siły ściskającej przyłożonej osiowo po przekątnej modelu. Przy stałym obciążeniu jedną siłą o wartości 400N i 1 podporze nieprzesuwnej, sztywnej na przeciwległym końcu struktury sprawdzano zmienność parametrów, w zależności od ułożenia pręta środkowego. Pomimo wprowadzenia tylko jednej podpory zniwelowano wpływ skręcania modelu poprzez wyłączenie składowej obrotu z analizy. Badanie miało na celu sprawdzenie efektywności implementacji responsywności. W punktach 0°, 45°, 90° oraz 135° znajdowały się połączenia sztywne struktury. Dla każdej z tych wartości model blokował się, przekazując naprężenia efektywnie w osi. Schemat badania widoczny jest na Grafika 106 .Pozycja „0” oznaczała ułożenie pręta równolegle do kierunku siły. Wyniki zebrano na wykresie Grafika 107.



Grafika 107.Wykres wartości dyskretnych ugięć oraz naprężeń dla poszczególnych pozycji belki środkowej oznaczonych przez określenie jej kąta względem pozycji referencyjnej dla pojedynczego przypadku obciążeniowego.

Podczas przykładania sił do modułu pierwsze wzrastały naprężenia w prętach ramy równomiernie po obu stronach modułu. Wynika to z zamodelowania niedokładności wykonawczych zaimplementowanych w modelu. Następnie następuje wzrost naprężeń na pręcie obrotowym, szczególnie w miejscu przewężenia końca pręta na prowadnicy. Po fazie osiadania elementów we wzajemnie zakleszczonych położeniach powodowanych naciskiem, następuje skokowe przeniesienie sił i naprężeń na aluminiowe płaskowniki prowadnicy. Naprężenia z ramy są na nią przenoszone w małym zakresie wokół miejsc połączeń ramy oraz prowadnic.



Grafika 108.Przypadek obciążeniowy dla którego przeprowadzano badania pozycji dyskretnych. Dla każdego przypadku przeprowadzano analizę z użyciem MES i generowano wyniki w postaci mapy naprężeń.

W wyniku badań opracowano wykres zmienności parametrów dla ułożenia pręta w każdej skwantyfikowanej pozycji widoczny na Grafika 107. Zauważalne są miejsca występowania połączeń znacznie zmniejszających wartości parametrów, ze względu na zastosowane przewężenia usztywniające na prowadnicach. Z wykresów odczytać można znaczny wpływ połączeń na wytrzymałość modułu. Połączenia gwarantują co najmniej 29% poprawę sztywności struktury oraz zwiększenie maksymalnych sił przy zachowaniu dopuszczalnych naprężeń. Maksymalna różnica między sztywnością układu przy połączeniu oraz poza nim jest równa 49,2%. Dla struktury pełnowymiarowej maksymalne ugięcie określono na 3,3cm. Model przeskalowany zachowuje sztywność na wskazanym poziomie, co oznacza konieczność zwiększenia przekrojów elementów lub zmiany ich geometrii przy ponownym skalowaniu. Należy więc zachować proporcje elementów przy skalowaniu w celu utrzymania żądanej sztywności modułu. W analizie nie uwzględnia się wpływu innych elementów struktury, które mają jedynie w pozytywny sposób oddziałują na sztywność ogólną.

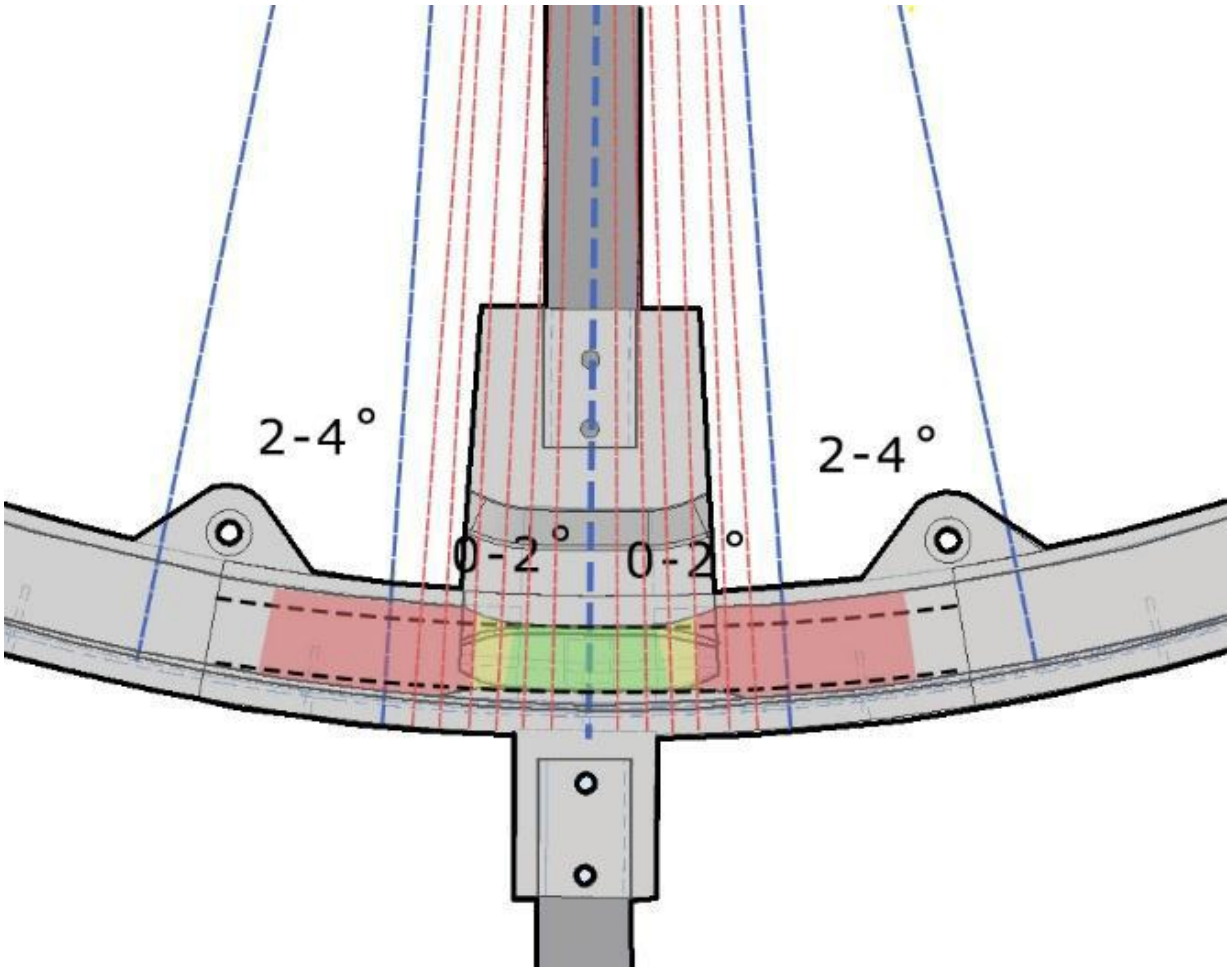
10.5.1 Wnioski

Ze względu na symetryczność śluz blokujących ruch po obu stronach połączenia wykres dla sił rozciągających przebiegał analogicznie. Odnotowywalne jest pewne zachowanie sztywności nawet w znacznej odległości od połączeń. Po pewnym zakresie deformacji prowadnic tworzy się oparcie pręta ruchomego na obręczy i dalsze ciągłe przenoszenie naprężeń. Jest ono zupełnie nieosiowe, lecz podnosi wytrzymałość w minimalnym stopniu powodując znaczny minimalny obrót całego modułu. Obrót ten podczas pomiarów zawierał się w przedziale 0,2-4,5°. Z wykresu zauważa się możliwość ingerencji w geometrię elementów i wykonania cieńszych elementów ramy oraz prowadnic, doprowadzając do zwiększenia

dysproporcji sztywności. Pozwala to na zmniejszenie masy użytego materiału, lecz wymaga użycia lepszego usztywnienia w narożach. Badanie nie pozwala na dokładne przybliżenie przebiegu wykresów. W celu dokładniejszego zbadania jego charakterystyki należy wykonać badanie granicy dopuszczalnego błędu niedokładności połączenia.

10.6 Badanie wpływu zakresu błędu dokładności połączeń modułu na transfer nie osiowych sił między modułami

Podczas pracy modułów te poddawane są częstemu łączeniu oraz rozłączaniu we wskazanych pozycjach według koncepcji. Sam proces połączenia zamodelowano jako zakleszczanie, aby minimalnymi siłami prostopadłymi zabezpieczać sztywność i pewność połączenia. Szerokość połączenia przewidziano tak, aby uzyskać pewien margines błędu podczas łączenia. Połączenie nie jest realizowane poprzez zakleszczanie lub blokowanie elementów przez co minimalizowany jest problem podatności. Połączenie zachowuje znacznie dłuższą żywotność. Dzieje się to jednak kosztem osiowości połączenia. Następuje ono poprzez obrót pręta do wskazanej pozycji. Granica połączenia oraz rozłączenia staje się więc niewyraźna, a wykres sztywności w zależności od kąta obrotu pręta nie przyjmuje wartości binarnych. Dla połączenia należy więc zdefiniować umowną granicę jego zamknięcia. Badanie ma na celu wyznaczenie charakterystyki zmian sztywności układu w zależności od kąta obrotu pręta środkowego, będącego zasymulowaniem niedokładności zatrzymania pręta w wyznaczonej pozycji.



Grafika 109.Strefy wpływu niedokładności połączeń na rozkład naprężeń. Zaznaczono na podstawie wyników zakresy poprawne, dopuszczalne oraz niepoprawne pozycjonowania belki. Zakres pozostaje indywidualny dla zamodelowanej geometrii elementów oraz całego modułu.

Do badania przyjęto układ z badania poprzedniego, gdzie kątem 0° była orientacja pręta środkowego po skosie biegnącym między utwierdzoną podporą, a osiowo przyłożoną siłą 400N. Na osi w orientacji 0° równolegle do kierunku siły zlokalizowano pręt obrotowy. Podczas badania przemieszczano go o 0,25° między kolejnymi badaniami w zakresie 0-2° według Grafika 109. W drugim przedziale 2-4° skok obrotu między kolejnymi badaniami wynosił 0,5 stopnia. Największych naprężeń poszukiwano w zakresie objętości elementu mocowania na prowadnicach oraz końca pręta obrotowego. Oba elementy stanowiły wydruki PLA według opracowania autorskiego. Na podstawie opracowanej dokumentacji przystąpiono do wykonania fizycznego modelu pojedynczego modułu zachowując wszystkie proporcje skali elementów i rodzaje materiałów Grafika 110. Model ma w przyszłych badaniach posłużyć do weryfikacji teoretycznych analiz symulacyjnych.



Grafika 110.Model fizycznej struktury zrealizowanej poprzez autorską pracę z wykorzystaniem druku 3D oraz realizacją połączeń śrubowanych między wszystkimi elementami.

10.7 Podsumowanie

W pracy zaprezentowano nową metodę kształtowania responsywności struktur. Określono teoretyczne zasady działania responsywności w strukturach oraz zwrócono uwagę na podstawowe problemy kształtowania oraz pracy wskazanych struktur. Określono dokładny rodzaj geometrii dla jakich efektywność użycia wskazanej responsywności jest najwyższa. Najefektywniejsze są struktury wysokie, gdzie dominującą siłą jest poziome obciążenie statyczne. Geometrie uzyskują zwiększenie sztywności w procesie użycia algorytmu ewolucyjnego na poziomie 33-63% zależnie od rozrzeźbienia struktury oraz proporcji wymiarów. Z kolei dla badania wspływu skali oraz smukłości modelu układ osiąga maksymalnie wzrost sztywności o 27-66%. Efektywne geometrie zawierają się w zakresie smukłości 1/4-1/6 wysokości modelu w podstawie. Dalsze analizy wykazały 16% wzrost efektywności układu responsywnego nad statycznie zoptymalizowanym modelem podczas wykonanych badań, co stanowi wartość minimalną mogącą ulec zwiększeniu. Jednocześnie zauważono trudności zabezpieczenia struktury na wystąpienie sytuacji awarii jednego z kluczowych systemów sterowania ruchem. Wykazano, że model, aby przenosić obciążenia w

sposób zgodny z postawionymi mu wymaganiami musi być przewymiarowany 3,8 raza bez systemu zapasowego lub 1,4 raza z użyciem systemu zapasowego ruchu awaryjnego.

Wyznaczono w dalszym toku badań zakresy istotności sekcji modelu oraz oszacowano granice wartości istotności dla kolejnych niebadanych przypadków obciążeniowych. Największy wpływ na sztywność mają modele dolnej tercji, w szczególności elementy pionowe. To one stanowią podstawowy element usztywniający strukturę, dlatego też to nad ich rozwojem i zagadnieniami problematyki ruchu w pionie należy pochylić się w dalszej kolejności. Granice w jakich zawierają się szacowane istotności modułów różnią się w zależności od lokalizacji i orientacji. Największy zakres IQR występuje dla pionowych elementów drugiej tercji jednak największą rozbieżnością proporcjonalną wartości odznaczają się moduły poziome. Determinuje to ukierunkowanie badań na sprawność elementów pionowych.

Badania kontynuowano dla modelu szczegółowego uwzględniającego dokładną geometrię. W wyniku pomiarów wyznaczono sztywność pojedynczego pręta i jej zależność od lokalizacji pręta obrotowego. Dokonano analizy naprężeń oraz zakresu błędu dopuszczalnego dla efektywnego połączenia na prowadnicy. Wyznaczono charakterystykę spadku wytrzymałości przy niedokładnościach oraz wykazano konieczność stosowania systemów awaryjnych w celu zwiększenia efektywności struktury. Zależnie od orientacji pręta środkowego odkształcenia mogą być minimalizowane o wartość do 52% przy obciążeniu ukośnym. Niedokładność połączenia wpływa na jego skuteczność przenoszenia naprężeń. Wymagana dokładność określona została na wartość 1° odpowiadając 92% efektywności przenoszenia naprężeń.

W badaniu zastosowano algorytm ewolucyjny pozwalający na swobodne dostosowywanie topologii elementów. Na podstawie uzyskanych wyników nie jest możliwe dobranie prostej funkcji sztywnego sterowania dostosowywaniem topologii do zmiennych obciążeń zewnętrznych. Model sterowany algorytmem pozwolił na wyznaczenie najważniejszych tendencji i co kluczowe umożliwił zawężenie dziedziny opłacalności responsywności topologicznej. Zgodnie z założeniami tezy I algorytm ewolucyjny w strukturze modularnej, responsywnej topologicznie pozostaje narzędziem uniwersalnym, umożliwiającym poszukiwanie zależności na cele opracowywania złożonych modeli zachowań. Teza została potwierdzona poprzez uzyskanie najwyższej skuteczności algorytmem oraz zachowanie stałości wyników dla kolejnych prób badawczych dowodząc, że algorytmy ewolucyjne pozwalają na akceptowalnie równy poziom wyników badań zachowań modeli zmienności struktur responsywnych. Jednocześnie długie czasu poszczególnych badań rosnące w sposób wykładniczy podczas zwiększania liczby modułów obsługiwanych w obrębie pojedynczej struktury uniemożliwiają przebadanie wymiernej liczby topologii dla dowolnych struktur w określonym krótkim odcinku czasu. To uniemożliwia zastosowanie algorytmu ewolucyjnego jako samodzielnego modułu sterowania zachowaniem modeli responsywnych topologicznie. W konsekwencji fakt ten potwierdza słuszność tezy nr II pracy dla badanych w rozdziale typów struktur.

Przedstawiona koncepcja prezentuje skuteczne rozwiązanie zmniejszenia nakładu materiałowego na wykonanie struktury. Pomyślnie przeszła testy efektywności i pod zadanymi warunkami użytkowania i budowy może stanowić efektywną alternatywę dla struktur statycznych. Model przedstawia nowe podejście do kreowania architektury responsywnej wzbogacając ją o dziedzinę reagowania topologią. Przedstawione rozwiązanie należy rozbudowywać w kierunku wyznaczonym w treści pracy jako stężenia pionowe obwodowo wzmacniające strukturę.

11. Modele podnoszenia efektywności struktur z wykorzystaniem rozwiązań responsywności topologicznej

11.1 Wstęp

Dotychczasowe badania responsywności topologicznej pozwoliły na wstępną ewaluację skuteczności tej formy ruchu w odpowiedzi na potrzeby podniesienia efektywności użycia materiału i przestrzeni struktur responsywnych. Struktury responsywne mogą stanowić obok rozpowszechniającej się responsywności geometrycznej alternatywną formę ruchu co udowodniono w rozdziale 10. Dotychczasowy brak badań w tej dziedzinie uniemożliwia określenie predestynacji responsywności topologicznej do konkretnych form struktur poza przeprowadzonymi w pracy badaniami. Mimo stwierdzenia bardzo zróżnicowanego wpływu tej formy ruchu w różnych sekcjach modeli nie przedstawiono metody ewaluacji zamiany fragmentarycznej struktury nośnej na moduły responsywne topologicznie. Dowiedziono, że opracowany wcześniej moduł responsywny podwala na podniesienie efektywności, lecz nie badano jego skuteczności na tle alternatywnych form responsywności topologicznej. W przeciwieństwie do ruchu teleskopowanego siłowników, topologia pozwala na znacznie szerszą gamę ruchów wprowadzających do modelu zmiany rozkładu naprężeń. To wymusza ewaluację alternatywnych form responsywności topologicznej.

Struktury responsywne topologicznie w celu redukcji stopnia złożoności ruchu i zmniejszenia wymagań precyzji ruchu przy zachowaniu właściwości statycznych formowane były w moduły sztywno-ruchome. Podejście to pozwala na proste kształtowanie ograniczonych form przestrzennych, które przy wzroście skali założeń struktury pozwalają na coraz szersze i bardziej ekspresyjne modele nośne. Dotychczas stwierdzona skuteczność responsywności na obciążenia poziome zbieżna jest z wynikami badań niezależnie otrzymanymi przez [197]. Dla obiektów wysokich wzrasta znaczenie dynamicznej kontroli geometrii, ze względu na znacznie większy potencjał do zwiększenia wytrzymałości w przypadku obciążeń poziomych [125]. Podobnie jak w przytoczonych pracach istotna ze względu na efektywność końcową jest analiza wstępna form responsywności, jakie zapewnić mogą maksymalne zyski. Może być ona rozpatrywana jako dwa osobne zagadnienia. Pierwszym jest lokalizacja siłowników w obrębie struktury. Dowiedziono w pracach [65], [89], że minimalizacja liczby siłowników pozostaje najskuteczniejszą formą oszczędności materiałowej w strukturach responsywnych. Minimalizacja ta polegająca na zachowaniu maksymalnej zdolności translacyjnej każdego indywidualnego węzła względem pozostałych elementów struktury, przy minimalnej liczbie elementów ruchomych zmniejsza stopień złożoności struktury i jej zarządzania. Drugie podejście to optymalizacja początkowej topologii i budowy modeli. Dowiedziono, że początkowa forma architektury responsywnej i referencyjna wyjściowa geometria mają kluczowy wpływ na końcową efektywność liczoną jako suma energii wbudowanej oraz kinetycznej danego modelu w rozliczeniu okresu jego użytkowania [69].

Modele modułowe wymagają badań obu zagadnień w oparciu o niezmienny, jasno określony moduł przestrzenny. W jego obszarze prowadzone mogą być badania skuteczności różnych form responsywności topologicznej pod względem układu, liczby i sposobu pracy elementów. W celu przedstawienia metody badania takich modułów oraz przedstawienia spektrum rozwiązań responsywności topologicznej należy przygotować kolejne modele i przeprowadzić ich ewaluację z wykorzystaniem metody opartej na wcześniej przeprowadzonych badaniach.

11.2 Koncepcje ruchu responsywności topologicznej oraz zagadnienia problemowe ich realizacji

Modele responsywne topologicznie wykorzystują znacznie więcej rozwiązań ruchu, niż modele responsywne geometrycznie. Podstawową znaną wcześniej funkcję teleskopowania rozszerzają do biblioteki rotacji, przemieszczeń, rozłączeń, rozdzieleń i scaleń. W większości przypadków wymienione zjawiska następują jednocześnie w parach, dając jeszcze szerszą pulę rozwiązań. Brak ograniczeń liczby elementów oraz swoboda łączenia wszystkich metod zmian wewnątrz modułu niosą za sobą trudności zapewnienia stateczności w każdej pozycji, dla każdej konfiguracji układu elementów struktury. W celu realizacji tego założenia każdy moduł wpisywany jest w sztywną ramę modularną pozwalającą na odpowiednio duże niedokładności połączeń elementów, generujące tym samym nieosiowe siły, prowadzące dalej do zginania modelu. Każda struktura responsywna topologicznie narażona jest na zjawisko zginania ramy poprzez imperfekcje ruchomych połączeń, czego dowiedziono we wcześniejszych badaniach. Skala struktury predestynuje ją do zróżnicowanej skali wpływu imperfekcji na maksymalne momenty gnące. Im bardziej złożony model, tym wpływ ten będzie bardziej znaczący, ze względu na nakładanie niedokładności. Oznacza to, że większe modele wymagają bardziej precyzyjnego sterowania. Przenoszenie osiowe sił wymusza jednocześnie ustalenie punktów mocowania elementów nośnych do ramy zewnętrznej. W najprostszej formie powinno być to 8 punktów, z czego 4 to połączenia narożne, oraz 4 w środkach długości boków ramy.

Powtarzalność modułów jest jednym z parametrów wymagających pogłębionej analizy ze względu na niewystarczające dotychczasowe zbadanie wpływu powtarzalności na model. Zakłada się, że pełna jednolitość modelu rozumiana jako jednakowość wszystkich modułów jest rozwiązaniem nieefektywnym. Hipotezę rozwija się o możliwość określenia przeznaczenia poszczególnych rodzajów elementów modularnych do występowania w określonych sekcjach struktury w określonych warunkach. Zakłada się, że elementy orientowane w dolnych sekcjach pionowo będą mniej efektywne w górnych poziomych częściach modelu w porównaniu do najodpowiedniejszych dla takiego zastosowania modułów.

Zróżnicowane moduły mają różne układy topologiczne oraz geometryczne, jednocześnie tworząc indywidualną pulę ruchów o różnej liczbie dostępnych pozycji. Oznacza to całkowitą dowolność ruchu. Zróżnicowany pozostaje czas potrzebny na różne formy ruchu oraz dla różnych modułów. W konsekwencji skoki i spadki sztywności w strukturze muszą być albo całościowo koordynowane, a ruch musi pozostawać sekwencjonowany, albo ramy wszystkich modułów muszą zapewniać chwilową stateczność struktury pod wpływem dowolnych obciążeń zewnętrznych w zakresie dopuszczalnych kątów oraz wartości obciążenia. Podejście drugie na wstępnym etapie badań i rozpoznania potencjału naukowego jest uzasadnione i realizowane będzie w trakcie prac badawczych.

Niezawodność poszczególnych form ruchu jest ściśle związana z technicznym ich rozwiązaniem, co wymusza każdorazową ewaluację stopnia bezpieczeństwa użycia opracowanych modułów. Jest ona zależna od stopnia wpływu elementarnego ruchu modułu. Bardziej złożone ruchy w responsywności topologicznej, prowadzące do szeregu zmian w topologii mogą być również sekwencjonowane i podlegać podziałowi na etapy w celu zmniejszenia maksymalnych naprężeń generowanych podczas zmian formy. W dalszej części opracowania przedstawiono przykładowe uproszczone opracowanie statyczne modelu na cele określenia wielkości poszczególnych przekrojów oraz wymogu szybkości połączeń.

Mechanizmy sterujące w modułach również wymagają osobnego opracowania. Ruch obrotowy możliwy jest tak z wspomaganiem w formie prowadnic, jak i bez nich, lecz docelowa skala sił przenoszonych w strukturach argumentuje większe zabezpieczenie motoryki modelu i opracowanie podkonstrukcji kierunkujących ruch. Wymagana precyzja połączeń z kolei wprowadza do rozważań koncepcyjnych aspekt mechatroniczny i mechaniczny.

11.2.1 Formy ruchu stosowane w modelach responsywnych topologicznie

W celu badania możliwości użycia zróżnicowanych modułów przygotowano szereg form ruchu. Są one implementowane rozdzielnie, aby uprościć wstępną analizę ich efektywności. Najprostszą formą ruchu stosowaną dotychczas jest teleskopowanie, lecz w modelach responsywnych topologicznie nie może ono występować samodzielnie ze względu na konieczność stałego połączenia elementu na obu końcach ze strukturą sztywną. Oznacza to, że ruch ten pozostaje złożony jako teleskopowanie i jednostronne przemieszczenie węzła. Najczęściej ruch odbywa się wzdłuż krawędzi ramy zewnętrznej. Przybiera on charakter liniowy, lecz z zachowaniem wystarczającej dokładności analiz może być kwantyfikowany na szereg mniejszych korków zmiany geometrii i w rezultacie topologii. Bardziej złożonym ruchem jest obrót. Analizie ruchu w strukturach responsywnych podlega obrót zachowujący pojedynczy punkt stałego obrotowego mocowania z resztą struktury. Analogicznie do wcześniejszych badań może być on zlokalizowany w centralnej części elementu, lub jednym z jego końców. Trzecia forma ruchu To translacja. Jest ona złożonym teleskopowaniem lub jednoczesnym przemieszczeniem obu połączeń jednego elementu. Połączona może być z obrotem. Wymaga użycia dodatkowych elementów prowadnicowych ze względu na pełne chwilowe odłączanie elementu od struktury.

Dalsze różnicowanie ruchu dokonywane jest na podstawie efektów przemieszczeń. Scalanie i rozdzielanie modelu jest wynikiem obrotu, gdy część wiązki elementu zostaje rozdzielona na większą liczbę mniejszych elementów niezależnie przenoszących naprężenia w całym module. Pojedynczy element pozwala na przeniesienie znacznych obciążeń, lecz według ściśle zadanego kierunku. Gdy na model oddziałują zróżnicowane siły pod względem kierunku i miejsca przyłożenia, lub podlegają one ciągłej zmianie w funkcji czasu znacznie skuteczniejszym rozwiązaniem pozostaje użycie siatki mniejszych elementów pozwalających na zachowanie znacznie bardziej jednolitego układu naprężeń w modelu [175], [193]. Jednocześnie gęstsza siatka wykonana z użyciem takiej samej liczby elementów lub materiału pozwala na redukcję deformacji modelu [109]. Łamanie elementów z kolei będące wynikiem dwóch obrotów i rozłączenia węzła, lub rozłączenia obrotu oraz przesunięcia jest najbardziej złożonym ruchem wymagającym koordynacji kilku ruchów elementarnych naraz. Pojedynczy element ciągły zostaje w wyniku obrotu na węźle złożony, uzyskując krótszą formę o większym przekroju. Dla takiego działania modelu należy każdorazowo przeprowadzić dokładną analizę zmian naprężeń i deformacji podczas ruchu modelu

11.2.2 Problematyka niedokładności i podatności połączeń podczas ruchu między topologiami docelowymi

Zagadnienie ugięć pozostaje kluczowe ze względu na zdolności łączenia elementów. Tworząc strukturę przestrzenną zakłada się niezerowe ugięcia modelu w dowolnych jego elementach i punktach. Odkształcenia i niedokładności będą rosły w miejscach, gdzie struktura jest bardziej podatna. Miejsca krytyczne podatności struktury tworzą się w miejscach, gdzie dochodzi do rozłączenia elementów podczas transformacji między topologiami modułu. Każde rozłączenie w modelu oznacza utratę sztywności. To wymusza minimalizację odłączanych jednocześnie elementów oraz kształtowanie połączeń w sposób umożliwiający niwelowanie niedokładności powstających podczas ruchu. Tworzenie śluz łącznikowych, prowadnic lub przemieszczania końców elementów z użyciem ściągów pozycjonujących połączenie do poprawnego zamocowania na ramie modułu pozostaje w szerokim spektrum rozwiązań, jakie należy implementować w celu podniesienia użytkowalności modułu. Zakłada się, że w strukturach responsywnych topologicznie użytkowalność ograniczana jest w pierwszej kolejności przez opisane niedokładności ruchu.

Elementy ruchome podobnie jak w strukturach responsywnych geometrycznie, biorą udział w przenoszeniu naprężeń w modelu. Gdy element pozostaje osiowy jak siłownik o zmiennej długości problematyka wytrzymałości sprowadza się do policzenia wartości krytycznej siły osiowej w różnych stanach modelu. Gdy jednak bardziej złożona responsywność topologiczna wprowadza ruch obrotowy, problematyka jest znacznie bardziej rozbudowana. Element ruchu reprezentowany przez silnik lub przekładnie musi zachowywać sztywność i równoważyć naprężenia podczas nagłych zmian kąta obrotu. W zdecydowanej większości przypadków obrót elementu mimo liniowej natury statycznie interpretowany jest jako dyskretny ponieważ w czasie realizacji ruchu obracany element nie przenosi znaczących sił podłużnych. Oznacza to, że element obrotowy musi zachowywać sztywność i wytrzymałość wyłącznie w pozycjach docelowych.

Struktury responsywne topologicznie korzystające ze scalania oraz rozłączania wiązkowych elementów najczęściej dążyć będą do uzyskiwania jednorodności naprężeń. Te z kolei przyjmować mogą bardzo zróżnicowany charakter w zależności od kierunku przyłożonej siły. W zależności od kierunku każdy element może podlegać tak ściskaniu jak i rozciąganiu. Im krótszy element przenoszący te siły, tym większe ich wartości jest w stanie efektywnie dystrybuować. Odwrotną zależność zauważa się dla węzłów łączących, tworzonych w wyniku fragmentaryzacji pojedynczych elementów siatką. Każde połączenie wprowadza do modelu pewną niedokładność oraz podatność której konieczność wpływu podnoszono wcześniej w pracy. Wszystkie połączenia muszą przenosić siły rozciągające oraz ściskające z jednakową skutecznością, aby maksymalizować wykorzystanie materiału. To wymusza konkretne rozwiązania mechaniczne, pozwalające na zakleszczanie dwukierunkowe elementów w punktach węzłowych. Mimo, iż kształtowanie połączeń nie leży w zakresie niniejszej pracy ich mechaniczne oraz mechatroniczne opracowanie ze względu na interdyscyplinarność zagadnień responsywnej architektury stanowi ważny element holistycznego systemu strukturalnego modelu.

11.2.3 Dyskretyzacja ruchów modeli na cele analizy statycznej

Dotychczasowe modele responsywne geometrycznie poddawano analizie statycznej w układach geometrii docelowych. Zagadnienie ruchów pośrednich nie było wystarczająco dokładnie opisane i nadal wymaga pogłębionych analiz, lecz badania te stanowią właściwy wstęp do ewaluacji zdolności modelu do podnoszenia efektywności. Skuteczność geometrii docelowych jest warunkiem koniecznym dla racjonalizacji użycia responsywności topologicznej i warunek ten powinien być badany w pierwszej kolejności. Badanie to nie odbiega metodologicznie od wcześniej realizowanych. Polegać ma na określaniu rozkładu naprężeń i zachowań struktury w statycznych układach przestrzennych. Oznacza to konieczność dyskretyzacji ruchów liniowych wszystkich elementów modułów. Analiza zachowań pojedynczego modułu powinna więc zostać poprzedzona określeniem wszystkich pozycji docelowych jakie da się uzyskać w procesie transformacji modułu. Analiza ta musi uwzględniać wszystkie zmiany przekrojów, udział połączeń węzłowych obrotowych w elementach dla różnych przypadków obciążeniowych. Dyskretyzacja obrotu pozostaje łatwym zagadnieniem ze względu na docelową małą liczbę kątów elementów rotowanych. Bardziej złożoną problematyką charakteryzuje się translacja oraz teleskopowanie. Arbitralny podział na układy docelowe może być realizowany jako liniowo równy podział zakresu ruchu elementu, gdzie każda kolejna pozycja jest równo oddalona od poprzedniej oraz następnej, lub podział następuje w odniesieniu do równej odległości kątowej, bądź równego podziału punktów mocowania wzdłuż krawędzi zewnętrznej ramy. Każdy moduł responsywny topologicznie musi posiadać matrycę topologii poddawanej wstępnym badaniom efektywności.

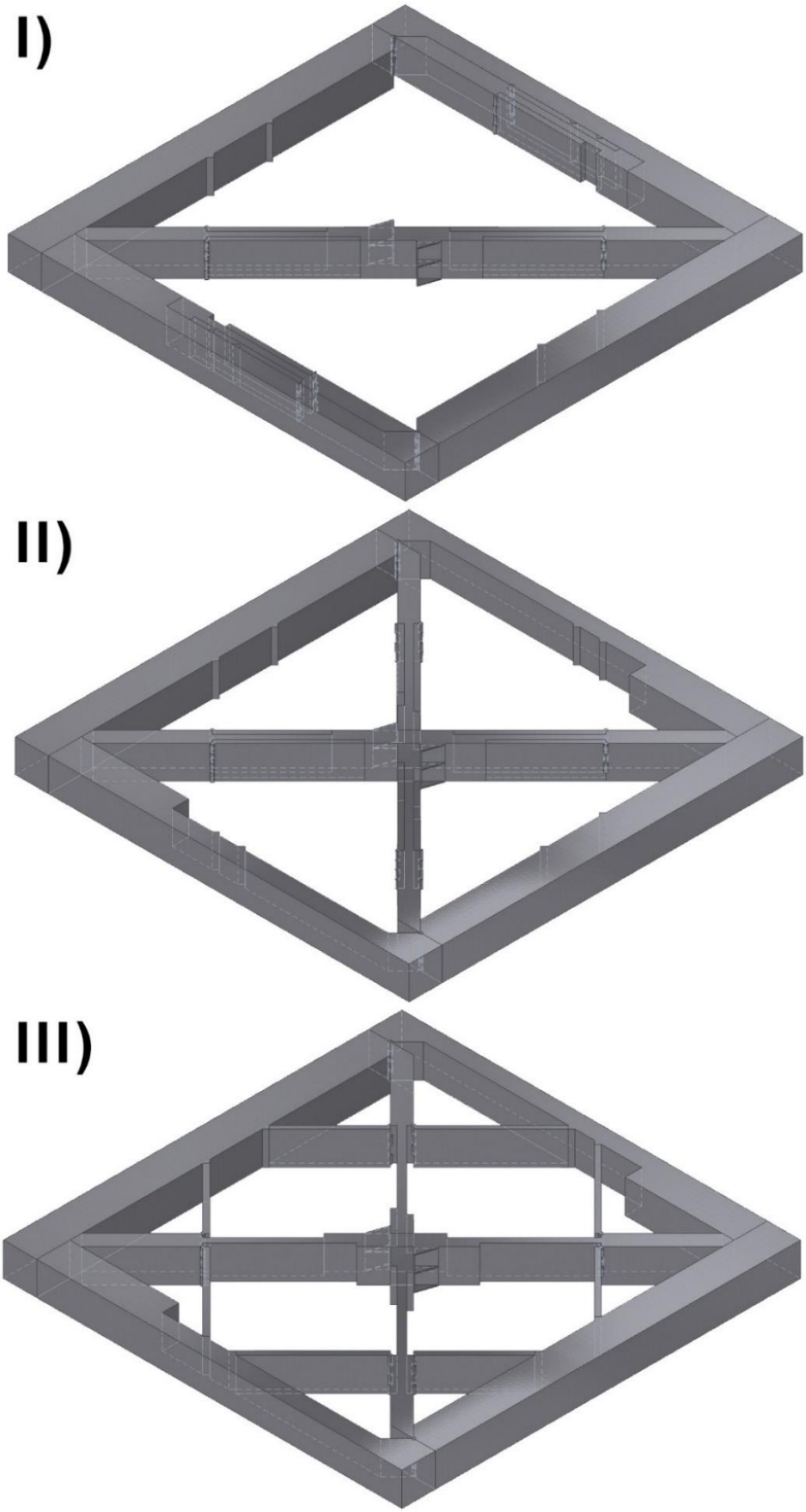
11.3 Modelowanie modułu responsywnego topologicznie wraz z matrycą układów

W celu przedstawienia sposobu kształtowania modelu na potrzeby jego dalszej ewaluacji w pracy przedstawiono kolejne kroki modelowania responsywności topologicznej. Proces przeprowadzono dla pojedynczego modułu, stanowiącego część opracowania dalszej metody ewaluacji responsywności topologicznej. Model ten ma za zadanie prezentować zdolności zmienności modułu do wpływu na układ naprężeń. Złożony jest on z elementów zdolnych do rekurencyjnego podziału trójkątnego. Podział fraktalny pozostaje jednym z najprostszych podziałów efektywnych architektonicznie.

W celu opracowania modelu należy dobrać początkowy moduł stanowiący dalej oś ramy. Dla modelowanego modułu standardowo dobrano jako moduł kwadrat. Dla określenia skali długość jego boku określono jako 2m. Podział trójkątny stanowiący najprostszą geometrię zachowującą pełną sztywność geometryczną uzyskano poprzez połączenie przeciwległych naroży. W obecnej formie moduł pozostaje statyczny. Nie wprowadzono do niego żadnych elementów ruchomych. W dalszej kolejności należy rozpatrzyć możliwości dodania responsywności. W celu stworzenia podziału fraktalnego konieczne jest stworzenie elementów pozwalających na uzyskanie punktu przecięcia przekątnych w punkcie środka masy modelu. Istnieją dwie możliwości uzyskania takiego ruchu. Pierwsza poprzez obrót elementu dołączonego zewnętrznie do ramy modułu w wyniku obrotu zostaje elementem nośnym dotychczas nie pełniąc żadnej funkcji w modelu. Oznacza to, że wraz z rosnącą liczbą podziałów elementu wymagane jest coraz więcej dołączanych elementów, przez co wzrasta przekrój sumaryczny elementu, lecz jego wytrzymałość jest na jednakowym poziomie. Podniesienie masy elementu negatywnie wpływa na jego zdolność dystrybucji sił i zachowania sztywności w układach prostych, nierozłożonych, gdy wszystkie elementy są złożone. Pełne złożenie daje małą efektywność modułu ze względu na wykorzystanie małej części elementów w sposób aktywny. Alternatywnym rozwiązaniem pozostaje wprowadzenie ruchu rozłączania elementów, które stanowią efektywną część przekroju. Wszystkie elementy podlegające rotacji są wbudowane w główną ramę statyczną i podczas pełnego złożenia modułu przenoszą efektywnie znaczne siły wraz z elementami statycznymi. Z kolei ich rozłożenie redukuje przekrój bazowy elementów statycznych, lecz zwiększa ich sztywność poprzez stworzenie dodatkowych punktów stężeń pośrednich. W wyniku rozkładania modułu uzyskuje on coraz gęstszą siatkę elementów wypełniających go, co pozwala na wzrost jednolitości rozkładu naprężeń. Redukcja przekrojów ograniczona jest maksymalnym przewężeniem części struktury statycznej, co uniemożliwia bardziej rozbudowane ruchy zagęszczania siatki podziałem fraktalnym. Szacuje się, że efektywna responsywność topologiczna rozbudowuje funkcję ruchu maksymalnie do 3 kolejnych iteracji. Dla takiej wartości przeprowadzona dalej będzie analiza układów statycznych modułu.

Na Grafika 111 przedstawiono model responsywny topologicznie wraz z kolejnymi iteracjami fraktalnymi jego rozkładania[14]. Charakteryzuje się on trzema etapami zagęszczania struktury, które stanowią jedynie część topologii docelowych, ze względu na możliwość aplikacji układów pośrednich między kolejnymi iteracjami. Ponadto możliwe jest jednostronne rozkładanie modelu. Wraz ze wzrostem liczby podziałów rośnie liczba niezależnych od siebie segmentów, które w miarę zapotrzebowania mogą być składane lub rozkładane indywidualnie. Zauważalne jest redukowanie przekrojów efektywnych struktury w miarę jej zagęszczania. W ostatniej fazie fraktalnej element przekątny ramy uzyskuje 3 usztywnienia wzajemnie równo od siebie odległe. Usztywnienia te kompensują redukcję do 1/3 powierzchni przekroju elementu w części środkowej. Ostateczna wytrzymałość modelu rośnie pozwalając na zmianę charakteru pracy modelu od ukierunkowanej transmisji naprężeń do rozproszonej ich dystrybucji. Widoczne są w ostatnich 2 fazach redukcje częściowe przekrojów ramy zewnętrznej. Wpływają one na jej nośność, lecz również są kompensowane przez dodatkowe punkty stężeń tworzone przez malejące elementy rozpierające. Dalsze iteracje fraktalne określa się jako nieefektywne ze względu na konieczność tworzenia przekrojów cienkościennych z elementów responsywnych, co prowadzi do znacznie bardziej złożonej analizy statycznej oraz dynamicznej.

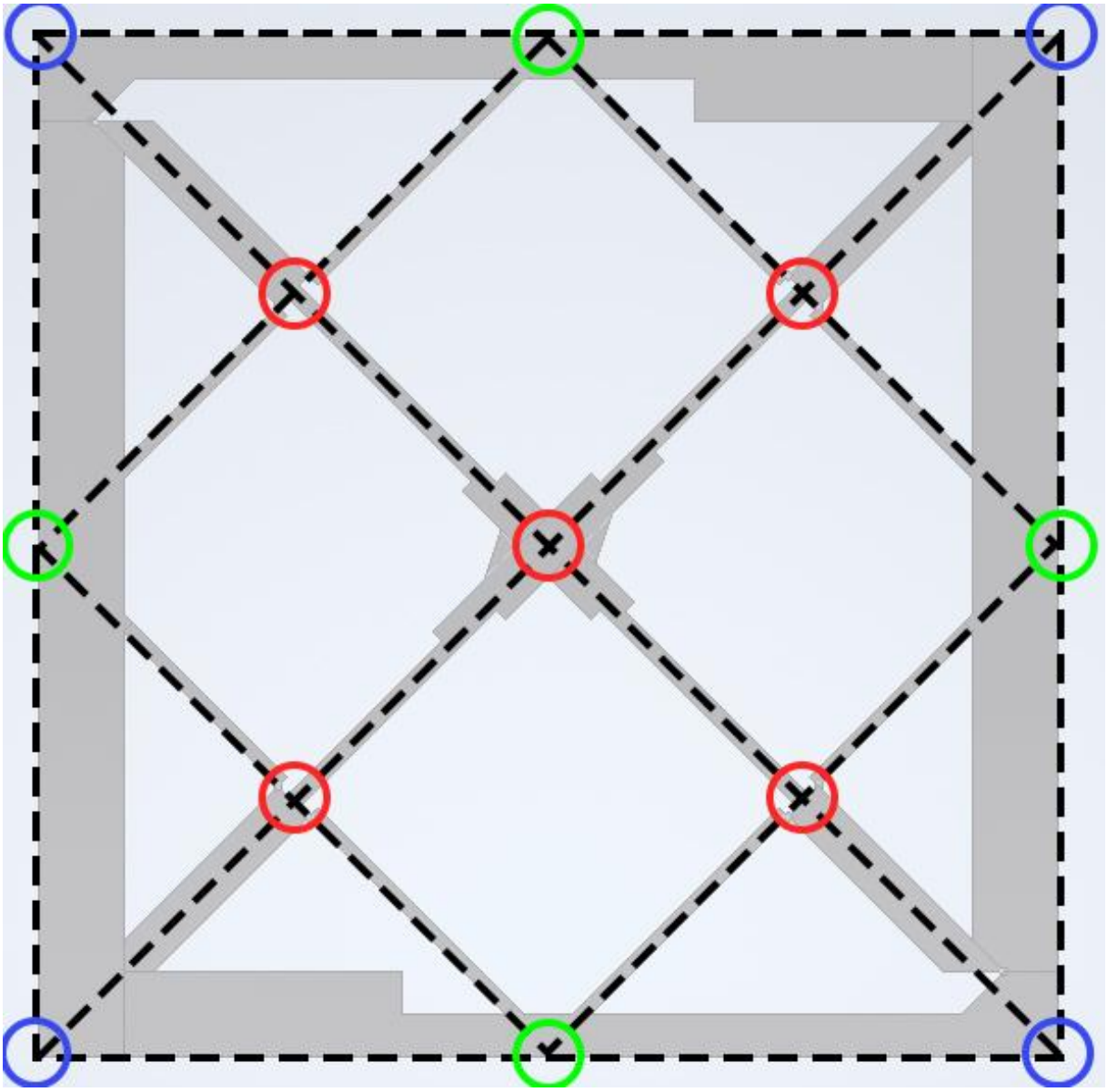
[14] Model został opracowany w sposób koncepcyjny. Nie uwzględniano w nim podatności, ani innych istotnych statycznie form wpływu połączeń między elementami obrotowymi. Przedstawiona metoda ruchu podlega dalszej optymalizacji grubości przekrojów na podstawie wyników analiz statycznych i koncepcyjnych dla topologii docelowych. Działanie to ma na celu podniesienie efektywności architektonicznej modelu określonej jako stosunek masy do sił osiowych przykładanych z dowolnych kierunków. Dla modelu nie opracowywano połączeń umożliwiających grupowanie większej liczby modułów, lecz docelowo model funkcjonować ma jako jedno z rozwiązań modułowej responsywności topologicznej dostępnej do łączenia z innymi rozwiązaniami w sposób uniwersalny.



Grafika 111. Przedstawienie modelu modułu responsywnego topologicznie w 3 kolejnych fazach rozkładania. Model opracowano przy użyciu oprogramowania Autodesk Inventor Professional 2024 i stanowi załącznik do pracy.

11.3.1 Budowa modelu responsywnego

Budowa modelu jak określono wcześniej w pracy powinna być opracowana w sposób modułowy. Nie jest to wymóg konieczny, lecz znacząco podnosi efektywność przenoszenia naprężeń i podnosi sztywność modelu. Na Grafika 112 przedstawiono układ elementów statycznych i responsywnych w widoku z góry w układzie w pełni rozłożonym. Kolorami zaznaczono węzły stałe oraz wtórnie, tworzone w wyniku podziału modelu o zróżnicowanym charakterze pracy podczas przenoszenia sił.



Grafika 112. Schemat budowy modelu responsywnego topologicznie o wyłącznie obrotowym charakterze pracy. Niebieskim kolorem zaznaczono węzły stałe. Wszystkie pozostałe stanowią węzły wtórne generowane w wyniku rozkładania modelu.

Dodatkowo poprowadzono osie środkowe elementów modułu. Zauważalne jest, że ukośne osie przecinają się razem z zewnętrznymi osiami ramy na krawędzi zewnętrznej modelu. Zabieg ten jest celowy i pozwala na wzajemną pracę sąsiednich modułów przy przenoszeniu naprężeń. W założeniu wstępnym moduły mają się łączyć w pełne modele, co oznacza, że rama jednego elementu jest w połowie odpowiedzialna za przenoszenie naprężeń w przypadku większej struktury. Drugą połowę sił przenosi sąsiednia rama. Jeśli dwie sąsiednie ramy łączą się w jedną masywniejszą, wspólnie przenoszącą siły zewnętrzne to osie

elementów ukośnych przecinają się w środkach ram pełnych modeli. Takie przesunięcie punktów przecięć na zewnątrz ramy umożliwia w pełni osiową dystrybucję naprężeń między sąsiednimi modułami. Węzły niebieskie są stałe. Dwa od początku łączą wszystkie 3 elementy schodzące się w nich oraz dwa kolejne początkowo łączą dwa elementy, a w procesie podziału również ostatecznie liczba łączonych przez nie elementów rośnie do 3. Wszystkie pozostałe węzły są wtórne co oznacza, że powstają w wyniku podziału. Muszą one umożliwiać pełne złożenie modelu przy przejściu do jego układu nr I oraz połączenie do 4 elementów jednocześnie przy przejściu pełnym lub częściowym do układu nr III. Zadanie opracowania węzłów składanych jest poza zakresem opracowania przewidzianym w pracy, lecz stanowi nietrywialne zagadnienie interdyscyplinarne architektroniczne[15]. Każde z połączeń musi przenosić siły rozciągające oraz ściskające zachowując pełną skuteczność połączeń. Zauważalne jest, że łączenie elementów może stanowić wyzwanie przy dużych siłach zewnętrznych wywołujących znaczne odkształcenia. Oznacza to konieczność określenia granicznej wartości deformacji przy jakiej następować może ruch modelu. Wszystkie przemieszczenia mniejsze od wartości krytycznej są dopuszczalne i mogą być kompensowane podczas łączenia, natomiast realizacja łączeń powyżej granicy jest ryzykownym działaniem i prowadzić może do permanentnego rozłączenia elementu ruchomego nie mogącego uzyskać wystarczającej siły ruchu do zakleszczenia nowego połączenia elementów. To oznacza, że do chwili ustąpienia siły zewnętrznej model traci część funkcjonalności. Alternatywnie musi zostać zrealizowany ruch sąsiednich modułów pozwalający na odciążenie modułu transformowanego. Angażuje to znaczne zasoby energetyczne i jest nieefektywne, lecz może stanowić rozwiązanie dla sytuacji nieprzewidywanych przypadków obciążeniowych.

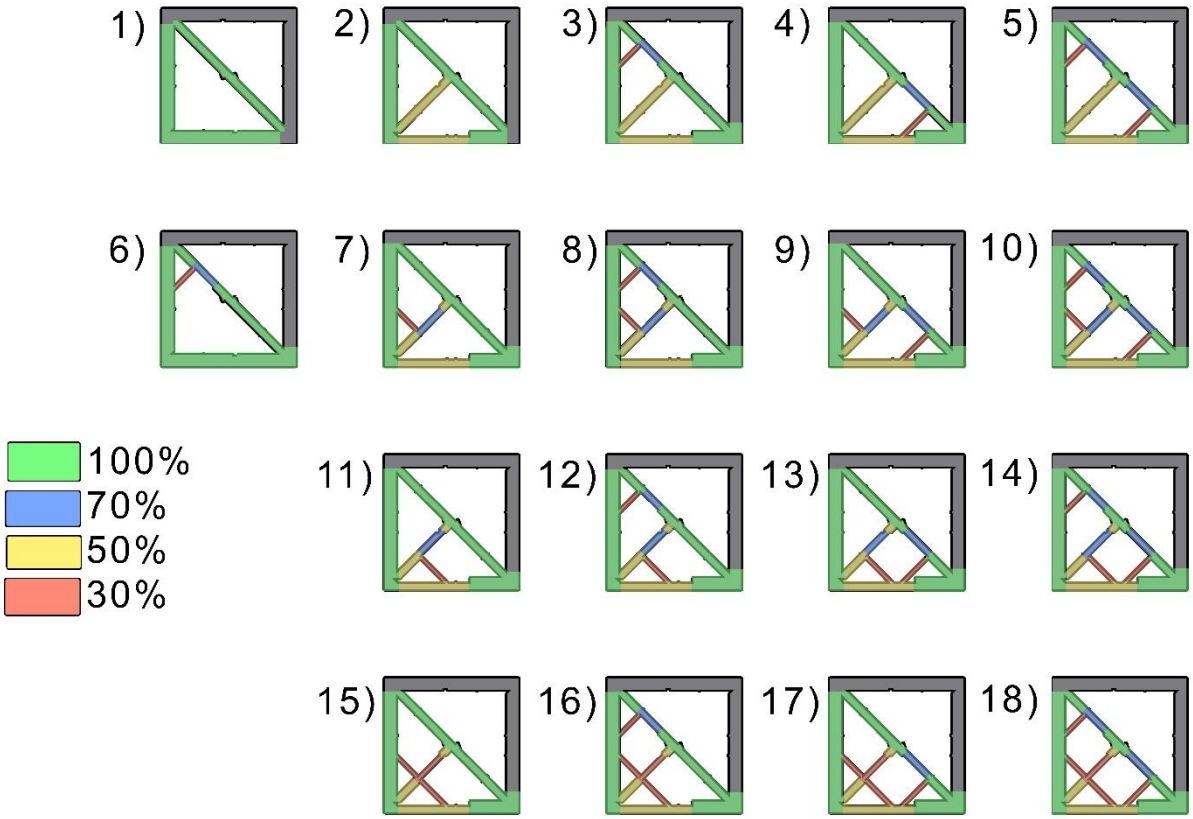
11.3.2 Analiza układów topologicznych

Jak zostało wcześniej opisane każdy moduł, aby określić jego zdolność wykorzystania w strukturze przestrzennej musi podlegać analizie dyskretnych układów. Dokładność badania może być zróżnicowana, lecz uwzględniając moc obliczeniową jednostki sterującej należy dążyć do minimalizacji układów poddawanych badaniu. Analizowany moduł nie cechuje się trudnościami w definiowaniu układów topologicznych. Każdy z ruchomych elementów ma dwa stany sztywne, a wszystkie ruchy pośrednie wykluczają go z analizy ze względu na brak zdolności do przenoszenia naprężeń. Szereg układów topologicznych pozostaje niemożliwy do uzyskania ze względu na wymaganą kolejność ruchu. Elementy 3 etapu aby przeprowadzić proces rozkładania wymagają uprzedniego rozłożenia elementów etapu nr 2. Ostatecznie liczba dostępnych układów maleje do kilkunastu topologii. Należy wszystkie je zebrać i przeanalizować. Stopień dokładności analizy musi być dobierany w oparciu o doświadczenie i wiedzę użytkownika. Na potrzeby badań przeprowadzono podstawową analizę wytrzymałości przekrojów, nie wymagającą wykorzystania dodatkowych narzędzi. Polega ona na określeniu redukcji wytrzymałości poszczególnych segmentów modelu w różnych układach topologicznych.

W pierwszej kolejności zebrano wszystkie możliwe do uzyskania topologie. Jeśli dwa różne układy da się uzyskać poprzez obrót lub odbicie lustrzane całego modelu nie wliczano takiej topologii do puli rozwiązań. Pełny zestaw układów przedstawiono wraz z analizą na Grafika 113. Zauważalne jest, że analizie podlegała tylko jedna połowa struktury. Przypadające na nią 18 układów jest wystarczające dla przedstawienia zasady działania modelu. Aby zebrać wszystkie dostępne topologie dla każdego układu spośród prezentowanych należałoby dobrać po 18 układów na przeciwległym trójkątnym segmencie. Sumarycznie pozwala to na uzyskanie 324 układów modułu. Każdy charakteryzowałby się oryginalnym układem elementów. Dla każdego z 324 przypadków należałoby przebadań szereg układów obciążeń zewnętrznych. Wraz ze wzrostem liczby sąsiednich modułów liczba wymaganych do przebadania układów obciążeń rosłaby wykładniczo. To oznacza, że dla każdego typu modułu implementowanego w strukturę przestrzenną responsywną topologicznie należałoby znacząco rozszerzyć pulę rozwiązań dla poszczególnych przypadków pracy modelu. Alternatywna responsywność

[15] Określenie interdyscyplinarnego problemu architektoniczno-machatronicznego na podstawie [121].

geometryczna podobnie z czasem tworzy bazę gotowych odpowiedzi, stopniowo wypierając działanie algorytmu ewolucyjnego, lecz dla responsywności topologicznej ze względu na znacznie łatwiejsze wyekstrahowanie indywidualnych przypadków i układów zabieg ten jest możliwy do wykonania przed rozpoczęciem działania modelu responsywnego topologicznie. Nie jest więc wymagany etap uczenia struktury sposobów ruchu.



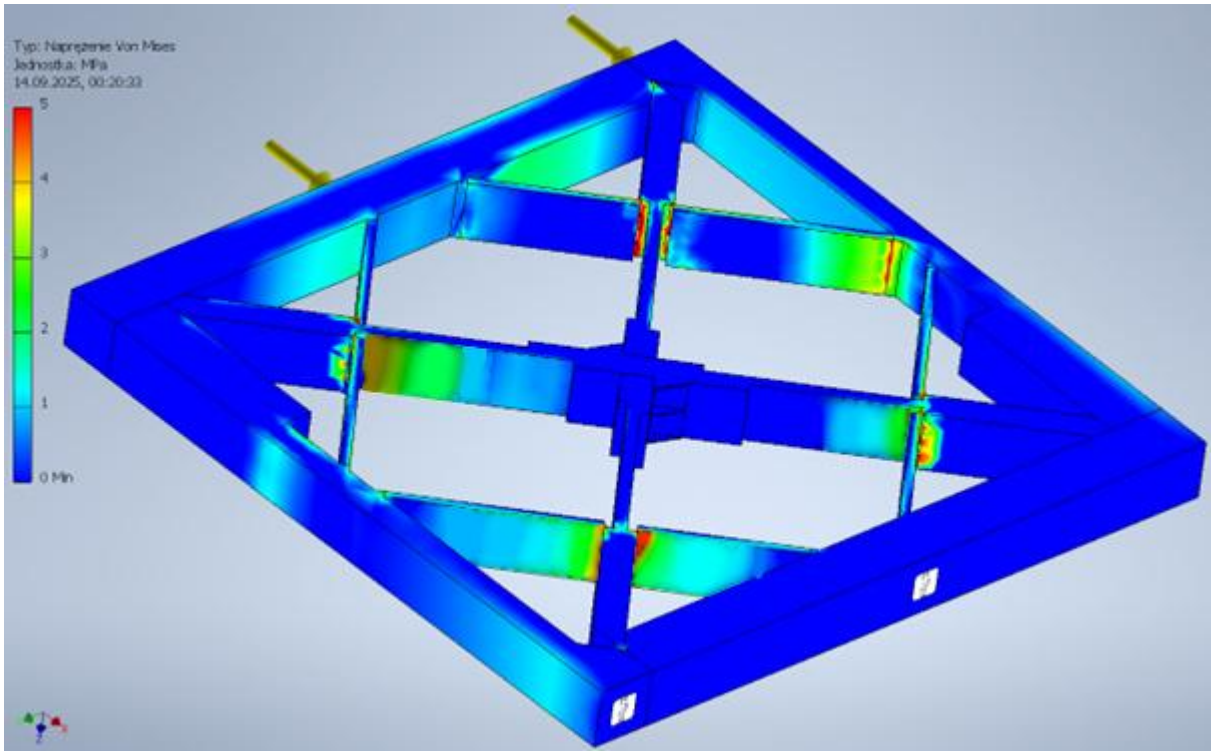
Grafika 113. Matryca przypadków sztywności modułu przygotowana na cele programowania zachowań struktury podczas symulacji. Procenty odnoszą się do szerokości przekroju względem wartości referencyjnej 20cm. Parametr ten bezpośrednio wpływa na momenty bezwładności oraz dalej wytrzymałość modułu.

Dla każdego z przedstawionych układów przeanalizowano szerokość przekroju elementów. Na legendzie zaznaczono procentowo szerokość danego elementu lub jego odcinka. Bazowa szerokość wynosi 20cm, co oznacza, że kolejno można redukować ją do wartości 16cm, 10cm oraz 6cm. Dla elementów krótszych podobnie jak dla elementów mocniej stężonych dobierano maksymalne redukcje przekrojów. Dla bardziej istotnych statycznie elementów nie redukowano wartości poniżej połowy referencyjnej wartości, natomiast belka środkowa statyczna jako najdłuższy element w module redukowana jest wyłącznie do 70% przekroju. Analiza ta jako maksymalne uproszczenie pozwalające na prowadzenie badań zachowań struktury pod szeregiem obciążeń może zostać w prosty sposób zaimplementowana jako model zmian geometrii i topologii do programu, w którym programowane jest zachowanie modułu. Połączenia oraz węzły stałe i wtórne nie są modelowane. Ich forma opracowywana może być w dalszych etapach. Pierwsze analizy prowadzone są wyłącznie dla syntetycznie wypreparowanych układów sztywnych ramowych bez uwzględniania ruchu, czy podatności połączeń.

W przypadku łączenia różnych form responsywności topologicznej jak obrót i translacja należy arbitralnie dokonywać podziału na analogiczne układy topologiczne maksymalizując redukcję różnych przypadków oraz możliwie prosto określając statykę poszczególnych elementów. Przedstawiony schemat stanowi informację na cele symulacji prowadzonej w dalszej części pracy. Ponadto moduły responsywne topologicznie charakteryzują się znacznym uproszczeniem systemów weryfikacji poprawności działania. W odróżnieniu od modeli responsywnych geometrycznie nie wymagają zaawansowanej aparatury wykorzystującej analizę obrazu w czasie rzeczywistym DIC, ani szeregu tensometrów współpracujących z żyroskopami. Czujniki poprawności połączeń wysyłające sygnał binarny na temat połączenia lub rozłączenia w punktach wtórnych węzłowych stanowią wystarczającą weryfikację pełnej sprawności modelu. Nie jest wymagane pomiarowanie podczas ruchów pośrednich ze względu na założenie nieprzenoszenia naprężeń podczas ruchu. Nie wyklucza to konieczności monitorowania naprężeń lecz ze względu na bezpieczeństwo i sprawność pracy modelu system pomiarowy może ulec znacznej redukcji predestynując modele responsywne topologicznie do zastępowania responsywności geometrycznej.

11.3.1 Analiza statyczna z uwzględnieniem połączeń

W celu weryfikacji zdolności modelu do przenoszenia obciążeń w sposób efektywny przez cały moduł przeprowadzono badanie analizy MES w oprogramowaniu Autodesk Inventor Professional 2024. Model modułu podzielono zgodnie z siatką na cele badania tworząc 210 483 elementów skończonych. Siatka przygotowana była w oparciu o lokalny stopień złożoności geometrii przez co program automatycznie dobierał miejsca zagęszczenia siatki. Zostały one następnie ręcznie uzupełnione o zagęszczenie prostych geometrii połączeń w celu podniesienia dokładności wyników. W dalszych krokach określono materiał jako stal 235 i parametrach fizycznych zgodnych z bibliotekami materiałów fizycznych Autodesk, po czym zasymulowano obciążenie struktury na całej ścianie zewnętrznej jednej z krawędzi ram obciążeniem powierzchniowym o sumarycznej sile 10kN. Wyniki badań przedstawiono na Grafika 114.



Grafika 114. Wyniki analizy MES pojedynczego modułu responsywnego topologicznie. Widoczne są wzrosty naprężeń na elementach 3 fazy rozkładania.

Na podstawie graficznej prezentacji wyników zauważa się większe naprężenia na połączeniach. Nie stanowią one części opracowania architektonicznego w niniejszej pracy, co argumentuje ich wykluczenie z symulacji całościowych modelu. Zauważalne jest, że najbardziej wytężone pozostają elementy o największej smukłości rozkładane w fazie nr 3. Wartość naprężeń na nich dochodzi do 2,5MPa co stanowi znikomą część zakresu wytrzymałości materiału. Odnotowywalne jest, że w centralnej części modelu, gdzie dochodzi do przecięcia przekątnych belek modułu występują bardzo małe wartości naprężeń maksymalnie dochodzące do 0,75MPa. Na podstawie wykresu naprężeń spodziewać się można zniszczenia modułu w miejscu połączenia belki 3 fazy z belką przekątną. Ze względu na małą sztywność elementu nie przewiduje się wystąpienia kaskadowego zniszczenia całego modułu, a jedynie częściowego zmiażdżenia lub rozerwania połączenia na końcu wskazanej belki. Dalsze badania innych przypadków powinny móc pozwolić na określenie ich schematów zniszczenia w celu stworzenia matrycy niezawodności modułu. Wraz ze skalowaniem modułu do pełnowymiarowej struktury złożonej z szeregu modułów należy spodziewać się znacznie bardziej jednolitego rozkładu naprężeń. Przed dalszymi badaniami należy również zwiększyć efektywność przekrojów poszczególnych elementów, tak aby uzyskać mniejsze różnice wartości naprężeń na sąsiednich elementach.

11.4 Badania użycia modułu w strukturach modularnych

Przedstawiono już geometrię, topologię i sposób działania modelu. Jego forma oraz szereg zachowań dążących do zmian topologii muszą zostać zaprogramowane w Rhinoceros Grasshopper w celu przeprowadzenia symulacji rozkładu naprężeń i poszukiwania najefektywniejszych topologii. Model ten oparty będzie na matrycy przedstawionej wcześniej określającej procentowy przekrój każdego z elementów w różnych stanach układów topologicznych

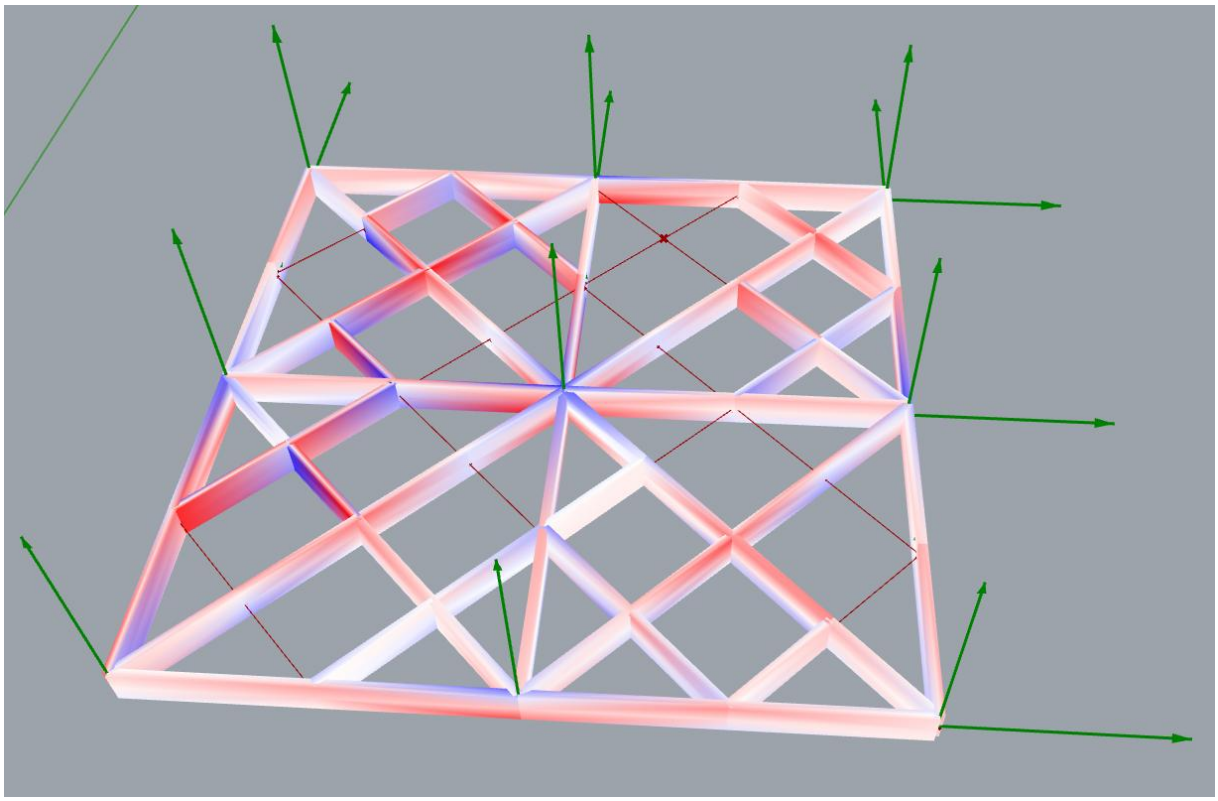
11.4.1 Budowa modelu

Budowa modelu pozostaje syntetyczna geometrycznie. Szereg uproszczeń zastosowanych w modelu nie ma jednak kluczowego wpływu na zachowanie modelu. Jego koncepcję rozpoczęto od zdefiniowania kwadratowej ramy o długości boku 2m z użyciem polecenia ***„line”*** na której określono punkty środkowe. Następnie zdefiniowano linie przekątne w układzie krzyżowym oraz zdefiniowano punkt przecięcia. Między środkami boków rozpięto ukośne linie tworzące osie elementów fazy nr 3 rozkładania modelu oraz również określono punkty wzajemnego przecięcia wszystkich odcinków. W wyniku podziałów powstały 24 elementy sztywno wzajemnie połączone, nie definiujące wytrzymałości połączeń, ani ich zdolności ruchu. Prostej geometrii złożonej z odcinków leżących na osiach elementów nadawano w dalszej kolejności właściwości geometryczne oraz statyczne. W tym celu każda linia zmultiplikowana została 4 razy. Każda kolejna kopia uzyskała inny przekrój pryzmatyczny elementu. Wszystkie elementy określono jako wykonane ze stali S235. Przekroje wszystkich elementów mają kształt prostokątny o wysokości 20cm, lecz są zróżnicowane pod względem szerokości podstawy. W schemacie układów prezentowanym wcześniej określono procentową szerokość wszystkich przekrojów we wszystkich stanach dla pojedynczego półmodułu trójkątnego. Na podstawie wykonanej matrycy zdefiniowano 4 szerokości przekrojów wszystkich elementów tak, aby sumaryczna szerokość wszystkich 4 modułów wynosiła 20cm. Kolejne przekroje zostały zdefiniowane wartością szerokości wynoszącą kolejno 6cm, 4cm, 4cm oraz 6cm. Z sumowania kolejnych przekrojów uzyskiwane są wszystkie wymagane szerokości występujące w matrycy. Sumowanie polega na zdefiniowaniu jednego odcinka w module z użyciem dwóch lub więcej przekrojów. Przekroje te nakładają się na siebie pracując sumarycznie jak odpowiednio szerszy przekrój, mimo iż reprezentowane są graficznie jako elementy nakładające się na siebie. Zauważalne jest, że w czasie zmian układów topologicznych zmieniają się szerokości przekrojów. Zachowanie to symulowane jest poprzez odłączanie i dołączanie odpowiedniej liczby odpowiednich przekrojów do przynależnych im

odcinków w danej topologii. W celu zdefiniowania wszystkich układów topologicznych model wyposażono w funkcję ***„filter”*** pozwalającą na przyłączenie do niej 18 wejść. Na każdym wejściu znajduje się ręcznie definiowana geometria złożona z nakładających się lub zerowych belek danego modułu. Na cele badania za podstawowy moduł określono trójkąt, stanowiący połowę modułu kwadratowego, co zmniejszyło liczbę układów z 324 do 18. Z użyciem funkcji suwaka wartości w zakresie od 1 do 18 na funkcji ***„filter”*** dobierana jest przypisana wartości geometria. Ruch między kolejnymi geometriami odbywa się natychmiastowo bez analizy ruchów pośrednich. Kolejność definiowania geometrii była oparta o coraz bardziej złożone układy, co oznacza, że najwyższe wartości numerów układów pozwalają na ruch elementom fazy nr 3 natomiast niskie wartości określają proste pojedyncze obroty elementów. Na Grafika 115 przedstawiono końcową formę modelu badawczego złożonego z 8 modułów. Wszystkie elementy osiągają identyczne szerokości ze względu na opisane wcześniej zjawisko nakładania elementów, które nie wpływa na zmniejszenie dokładności wyników analizy statycznej. Wszystkie elementy uwzględniane są według ich precyzyjnie określonych szerokości przekrojów.

Model ze względu na ręczny dobór topologii i ich kolejności w filtrze nie ma informacji które układy są sąsiednimi, czyli różnią się ruchem tylko jednego elementu. Wynika z tego, że model badawczy jest dobrym narzędziem poszukiwania efektywnych geometrii, lecz nie może służyć w obecnej formie do analizy ruchów pośrednich. Ręczny dobór geometrii gwarantuje unikanie uzyskiwania topologii niemożliwych, poprzez rozłączność obustronną pojedynczego elementu, lub wystąpienie elementów fazy nr 3 bez pełnego rozłożenia elementów wcześniejszych faz. Przedstawione na grafice moduły do indywidualnej obsługi wymagają własnych fragmentów oprogramowania, dlatego też w celu stworzenia złożonej struktury widocznej na grafice zmultiplikowano 8 kolejnych modułów, z których połowę obrócono o 180 stopni. Każdy z suwaków wyboru geometrii sterowany jest więc indywidualnie przez algorytm ewolucyjny. Żadne dwa moduły, ani półmoduły nie mają wzajemnie wpływu na swoje geometrie co implikuje w pełni swobodny dobór topologii w początkowej fazie poszukiwania efektywnych układów. Podobnie jak elementy ukośne rama modelu modelowana jest nakładającymi się wzajemnie przekrojami. Widoczne na grafice linie nie posiadające formy bryłowej stanowią osie, na których nie występują elementy w danym układzie topologicznym. Zadaniem programu jest samodzielny dobór układów bez danych wejściowych na temat sztywności modelu w danej konfiguracji. Oznacza to, że model nie analizuje które komórki struktury zachowują sztywność połączeń, a które charakteryzują się sztywnością geometryczną[16]. Wszystkie moduły podobnie jak elementy składowe modułów łączone są w sposób sztywny nieprecyzowany w badaniach.

[16] Sztywność połączeń, inaczej sztywność ramową definiuje się w pracy jako sztywność uzyskaną w wyniku ustalenia wszystkich naroży i połączeń jako nieobrotowe, odporne na momenty zginające, lecz wyłącznie dla komórek o liczbie boków większej niż 3. Sztywność geometryczna opisywana wcześniej polega na triangularyzacji komórki w celu uzyskania sztywności wyłącznie poprzez maksymalne uproszczenie geometrii. Połączenia mogą być obrotowe, lecz struktura pozostaje sztywna poprzez niezmienność długość elementów.



Grafika 115. Przygotowany model symulacji zachowań 4 modułów złożonych z 8 półmodułów. układ wsparty na 4 narożach poddawany jest obciążeniom w każdej płaszczyźnie, a wynik iw czasie rzeczywistym prezentowane są w formie graficznych wykresów na modelu.

Na każdym skrajnym narożu struktury zamodelowano podporę przegubową nieprzesuwną, a następnie zdefiniowano obciążenia pionowe zgodne z wartością siły grawitacji. Struktura działa jako poziomy model poddawany naprężeniom nie osiowym. Obciążenia przykładane do struktury mogą być definiowane w punktach węzłowych oraz na całej długości każdego z elementów. Zakłada się jednak, że struktura od góry przykryta jest powłoką o własnej sztywności dystrybuującą siły na najbliższe elementy w otoczeniu pojedynczej komórki. Najbardziej charakterystyczne i poddawane badaniom są siły osiowe przykładane poziomo. Mogą przybierać dowolny zwrot w płaszczyźnie XY.

Dla każdego przypadku obciążeniowego model dąży do uzyskania jak najmniejszej wartości strzałki ugięcia przy zachowaniu dopuszczalnej wartości naprężeń. Zakłada się, że najdłuższym obliczeniowo zadaniem dla algorytmu ewolucyjnego będzie dobór sąsiednich komplementarnych układów topologicznych. Pojedynczy wybór spośród 18 kolejnych geometrii jest zagadnieniem trywialnym nie podlegającym badaniu, lecz wzajemne układy sąsiednich półmodułów oraz dalej modułów wymagają bardziej złożonych form poszukiwania topologii. Sumarycznie dla zamodelowanej struktury istnieje $1{,}1*10^{10}$ kombinacji topologicznych. Tylko część wzajemnie sąsiednich układów efektywnie dystrybuuje naprężenia. Zakłada się również, że efektywne sąsiednie układy charakteryzują się pełną ciągłością elementów strukturalnych między modułami. Oznacza to, że belka ukośna prowadzona przez całą długość jednego modułu musi mieć kontynuację w elemencie sąsiednim ortogonalnie lub ukośnie. Zależności tej jednak nie implementuje się do modelu jako zasady kształtowania odpowiedzi, ze względu na konieczność określenia jej prawdziwości w wyniku badań poszukiwania topologii.

Do badań wybrano liniowy model analizy MES, pozwalający na znaczne przyspieszenie badań względem modelu nieliniowego. Dokładność wyników pozostanie zachowana ze względu na spodziewaną małą deformację elementów. Najważniejsze w analizie pozostają maksymalne wartości naprężeń i ugięć oraz proporcje wyników między topologiami. Wszystkie te wartości pozostają zachowane na jednakowym poziomie podczas

badań modelu. Algorytm ewolucyjny dobiera do 15 geometrii na sekundę, co pozwala na bardzo precyzyjne określenie otoczenia wartości ekstremów funkcji ugięcia od typu układu topologicznego.

Na cele badania zdefiniowano 4 przypadki obciążeniowe przykładane z dwóch kierunków w płaszczyźnie XY oraz 2 przypadki pionowego obciążenia w płaszczyźnie XZ zbudowane wyłącznie z wykorzystaniem pionowej składowej siły. Każde badanie poszukiwania efektywnych topologii realizowane jest przez 5 minut kiedy to algorytm ewolucyjny dobiera układy w celu jak największej redukcji strzałki ugięcia. Każde badanie rozpoczyna się od identycznej wyjściowej topologii w pełni złożonego modelu zachowującego kierunkową sztywność zgodnie ze zwrotem pojedynczej przekątnej. Przekątna ta zaburza osie symetrii, przez co konieczne było zwiększenie początkowej liczby 2 przypadków obciążeniowych poziomych do 4 co nadal stanowi dalece koncepcyjne badanie o wartości jakościowej bardziej niż ilościowej wyników. Badanie ma na celu wyłącznie przedstawienie metody ewaluacji struktury responsywnej topologicznie.

11.4.1 Wyniki badań

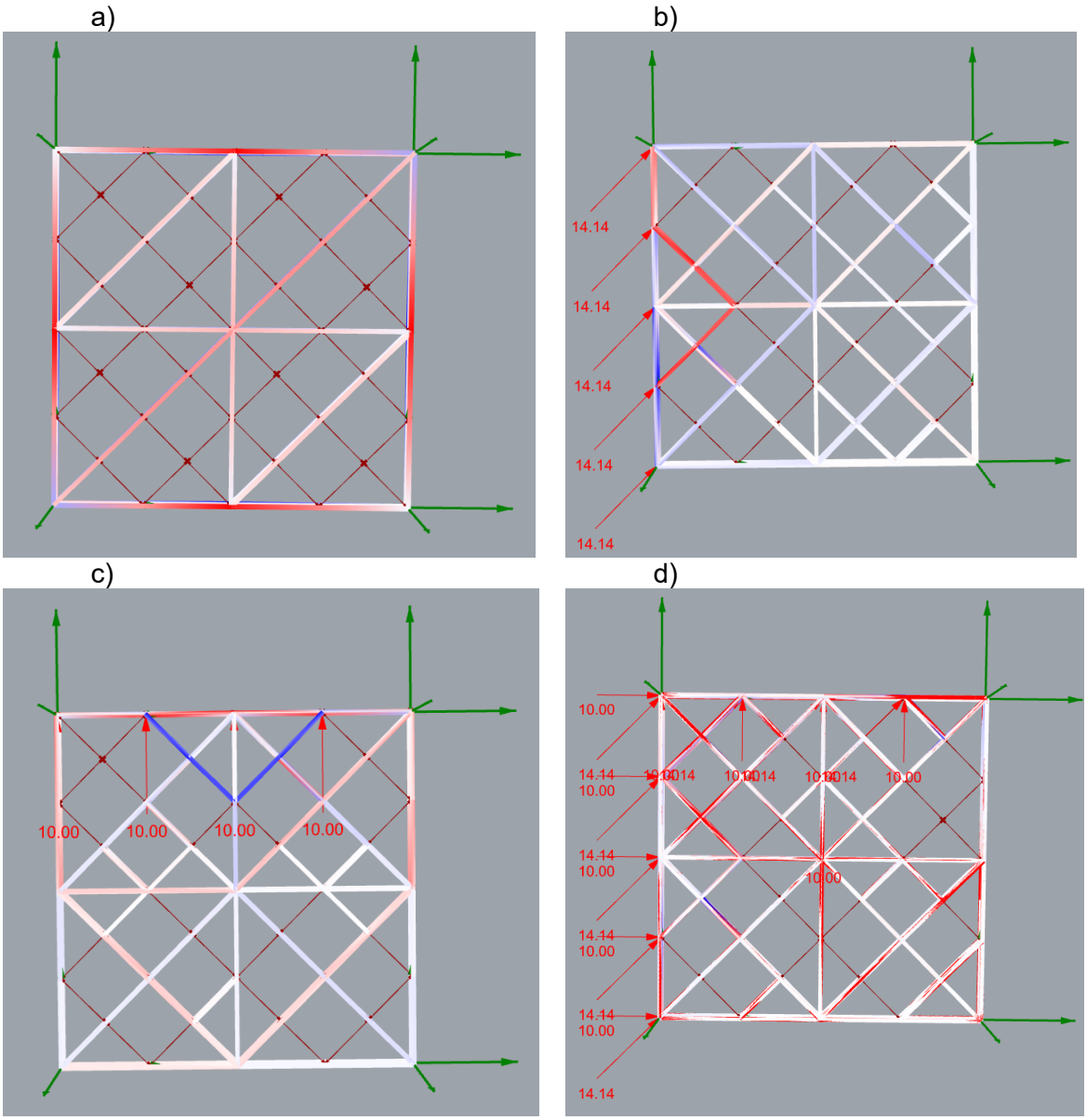
Badania redukcji ugięć wykazały skuteczność we wszystkich przypadkach, w znacznie krótszym niż pierwotnie zakładano czasie obliczeniowym. Wyniki zestawiono w ujęciu tabelarycznym. Na potrzeby porównania wyników przygotowano dwie grupy wyników referencyjnych. Pierwsze wartości prezentują ugięcia dla przypadku całkowicie złożonego modelu widocznego na Grafika 116 na pozycji „a)". Są one wzajemnie bardzo zbliżone ze względu na podobieństwo geometryczne. Różnicowane są na podstawie kolejno szóstych raz siódmych cyfr wartości po przecinku. Ze względu na brak istotności różnic tych nie zaznaczano w Tabela 31 prezentującej zestawienie wyników.

Tabela 31. Zestawienie wyników ugięć dla 6 przypadków obciążeniowych geometrii w 3 wersjach geometrii modelu. Kolejne wiersze reprezentują coraz bardziej efektywne struktury spośród których najefektywniejsze są modele responsywne. Wyniki uzasadniają dalsze badania responsywności topologicznej.

Obciążenie	1	2	3	4	5	6
składowa X [kN]	10	0	10	10	0	0
składowa Y [kN]	0	10	10	10	0	0
składowa Z [kN]	0	0	0	0	-10	-10
ugięcia przy prostej topologii [m]	0,0676	0,0676	0,0676	0,0676	0,0314	0,0314
ugięcia przy modyfikacji dla uwspólnionych przypadków [m]	0,0631	0,0518	0,0196	0,0211	0,0442	0,0442
ugięcia przy zastosowaniu responsywności topologicznej [m]	0,035	0,035	0,0149	0,0133	0,0304	0,0303

Złożone układy charakteryzują się najwyższymi wartościami ugięć, motywując zastosowanie struktur responsywnych topologicznie. Drugi wiersz wartości odnosi się do przypadku pojedynczej modyfikacji topologii uniwersalnej dla wszystkich analizowanych przypadków jednocześnie. Wszystkie 6 układów obciążeń poddawanych było obliczeniom równolegle, a wynikiem każdorazowo była wartość największego ugięcia. Zadaniem modelu było dobranie układu, który wywoływałby najmniejszą maksymalną wartość ugięcia spośród wszystkich

przypadków. Wygenerowana topologia widoczna jest na Grafika 116 na pozycji „d)". Trzeci wiersz wartości stanowi zebrane wyniki indywidualnych wartości ugięć dla indywidualnych topologii poszukiwanych dla każdego przypadku obciążeniowego osobno. Przykłady układów dla kolejno przypadków 4 oraz 2 przedstawione są na pozycjach „b)" oraz „c)" Grafika 116.



Grafika 116. Zestawienie wynikowych topologii dla wybranych przypadków badań efektywności modułów. Grafika "a)" prezentuje model sztywny nieoptymalizowany z prostym pojedynczym stężeniem ukośnym. „b)" oraz „c)" prezentują wyniki badań dla struktury responsywnej gdzie każdorazowo topologia dostosowywana jest do indywidualnego przypadku obciążeniowego. W „d)" przedstawiono efektywną topologię niezmienną dostosowaną jednocześnie do wszystkich 6 przypadków obciążeniowych.

Poszukiwanie topologii przebiegało w sposób znacznie szybszy od pierwotnie zakładanego. Maksymalny czas potrzebny algorytmowi na znalezienie topologii odpowiadającej najniższej wartości wynosił 30 sekund. W dwóch przypadkach był on redukowany do 7 sekund. Znaczna redukcja ugięć następowała w ciągu pierwszych 3 sekund umożliwiając uzyskanie satysfakcjonujących wyników. Dla każdego przypadku obciążeniowego redukcja wynosiła od 24% do 45% początkowej wartości ugięcia względem struktury modyfikowanej uniwersalnie.

Każdy z przypadków indywidualnie modyfikowanych charakteryzował się oryginalną topologią. Tendencje w 6 kolejnych próbach były zauważalne i dotyczyły liczby podziałów w zależności od odległości modułu od przyłożonej siły. W bezpośrednim sąsiedztwie sił zewnętrznych moduł efektywnie pracował przy większym rozrzeźbieniu elementów. Układy większej liczby odcinkowych belek o mniejszych momentach bezwładności pozwalały na równomierniejsze przeniesienie sił. Każdorazowo struktura dążyła do akumulacji naprężeń w dwóch strumieniach trasowanych ostatecznie do podpór przeciwległych. Moduły najbardziej odległe od punktów przyłożenia sił dla 3 z 6 przypadków nie wymagały rozkładania belki przekątnej. W formie zwartej bryły pozwalała ona przeniesienie znacznych wartości naprężeń na podporę. Zasada ta powtarzała się w każdym przypadku, lecz należy przeprowadzić dokładniejsze badania pozwalające na stwierdzenie siły zależności definiowanej jako procent przypadków obciążeniowych dla których zasada pozwala na uzyskanie najefektywniejszych topologii.

Zauważalne jest przerywanie ciągłości trasowania sił wzdłuż pojedynczych osi kolejnymi odcinkami belek, lecz wyłącznie na styku ram sąsiednich modułów. Ramy charakteryzują się wystarczającą sztywnością, aby umożliwiać wprowadzenie zaburzeń ciągłości belek. Część z elementów poprzecznych rozkładanych w 3 fazie z kolei stanowi wyłącznie usztywnienia redukujące wyboczenia elementów, zapobiegające powstaniu zjawiska zwichrzenia dla dłuższych smukłych elementów.

11.4.2 Wnioski

Przedstawiony sposób wstępnej analizy pozwala na ocenę zdolności modelu do dalszych prac nad dokładną jego geometrią w zakresie pryzmatycznych przekrojów oraz form połączeń elementów. Wyniki badań pokazują znaczny potencjał do dalszego rozwoju tak modułu jak i przedstawionej metody poprzez wprowadzenie innych form ewaluacji efektywności form responsywności topologicznej odmiennych od prostego obrotu. Moduł charakteryzuje się bardzo dużą sztywnością, której redukcję w celu zmniejszenia masy własnej modelu należy przeprowadzić w procesie osobnych badań. Proste warunki brzegowe przedstawione w badaniu MES pozwalają na uzyskanie zbliżonych wyników z większym modelem badania prowadzonego z użyciem programu Grasshopper. Oznacza to możliwość przyspieszenia generowania wynikowych topologii przy zachowaniu dokładności wyników analiz.

11.5 Efektywność architektoniczna responsywności topologicznej

Modele responsywne topologicznie przedstawione w pracy stanowią pierwszą propozycję zastosowania nowego typu responsywności w kształtowaniu struktur. Nie istnieją obecnie badania analogiczne do przeprowadzonych, przez co niemożliwe jest odniesienie możliwości wykorzystania technologii do podobnych struktur. Responsywność topologiczna znacznie poszerza pulę rozwiązań ruchu w strukturach, pozwalając na zachowanie pierwotnej formy bryłowej elementów nośnych. Znacząco ułatwia to zastosowanie przedstawionych modułów w architekturze. Jak przedstawiono na początku rozdziału najważniejszą funkcjonalnością jest stałość formy zewnętrznej. Inaczej niż w przypadku responsywności geometrycznej nie wymaga się określania przestrzeni buforowej na potrzeby zmienności bryły podczas dostosowywania do zróżnicowanych przypadków obciążeniowych. Stałość ta pozwala na określenie sposobu pracy modułów jako pionowych lub poziomych co implikuje ich dostosowanie optymalizowanymi w dalszych badaniach elementami. Stałość geometryczna umożliwia prostą implementację permanentnych otworować zachowujących geometrię oraz wymiary, co w architekturze jest konieczne dla zapewnienia funkcjonalności. Możliwość kształtowania prostych, ortogonalnych struktur tworzy łatwy w zastosowaniu system niewymagający specjalistycznej wiedzy, obniżając wymagania na cele architektonicznego kształtowania brył obiektów. Jak przedstawiono w 1.1 kształtowanie bezpośrednio poprzedza projektowanie, dotyczy konstrukcji i jest przynależne dziedzinie

architektury. Łatwość użycia systemu wpływać będzie więc pozytywnie na zdolność stosowania systemu. Prostota ta w głównej mierze zdefiniowana przez modularność musi być nią implementowana we wszystkich rozwiązaniach responsywnych topologicznie, aby korzystnie wpływać na użycie systemu. Modularność podobnie jak w strukturach ramowych, lecz w bardziej konsekwentnej i konserwatywnej formie jest podstawą do wprowadzenia cyrkularności w responsywności topologicznej. W modułach możliwe jest wydzielenie części belkowych oraz węzłowych analogicznie do podziałów modułów na potrzeby druku 3D. Zachowując podział elementów możliwa jest pełna niezależność konserwacji struktur wykonanych z wykorzystaniem modułów responsywnych topologicznie. Podnosi to walory cyrkularności i ułatwia wprowadzenie jej poprzez uproszczenie ewaluacji jakości składowych modeli przestrzennych na potrzeby certyfikacji zdolności do ponownego użycia.

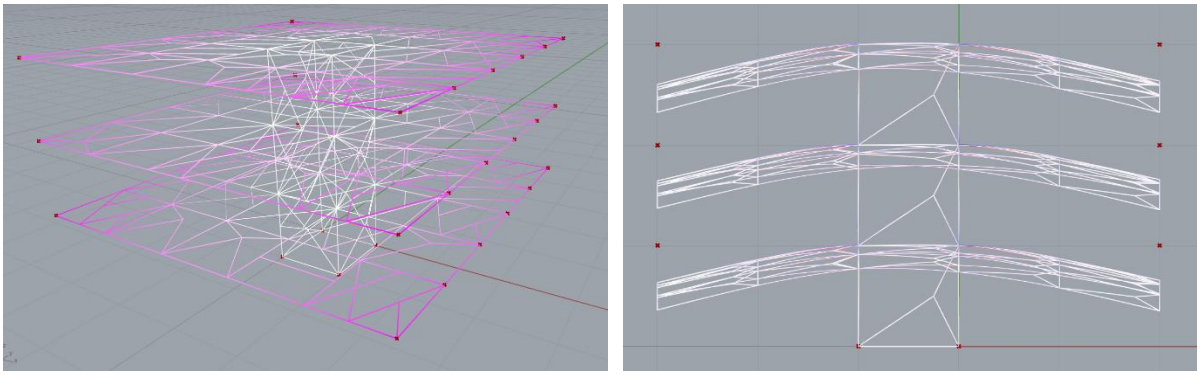
Moduły responsywne topologicznie umożliwiają, poprzez możliwość zróżnicowanego kształtowania formy modułów, uzyskanie dowolnych stopni otwarcia segmentów struktur. Stopień wypełnienia modułów, jak przedstawiony w rozdziale, może być swobodnie sterowana minimalnym kosztem wytrzymałości modułów. Każda geometria modułu ma alternatywne układy topologiczne o podobnej efektywności, co oznacza, że do modyfikacji kształtu możliwe jest wprowadzenie dodatkowych zmiennych. Jedną z nich może być stopień zacieniania struktury. Utrzymanie odpowiedniego nasłonecznienia może być sterowane w sposób liniowy systemami zewnętrznymi żaluzji, rolet lub analogicznych systemów, lecz może być wprowadzone w strukturę nośną jako parametr współodpowiedzialny za układ elementów dystrybuujących siły w modelu. Wykorzystując częściowo lub w pełni przepuszczalne okładziny lub moduły maskujące w pewnym stopniu jednolite nasłonecznienie możliwe jest przez użycie w topologii modułu większej liczby elementów 3 etapu rozkładania, stanowiących najcieńsze, lecz liczne elementy wywołujące efekty oświetleniowe zbliżone do lameli systemów zacieniających. Z kolei priorytetyzacji ruchu elementów na części masywne etapu nr 1 rozkładania modelu pozwolą na pełniejsze doświetlenie większymi otworowaniami. Konieczne jest stosowanie elementów maskujących wywołujących rozpraszanie i redukcję zjawiska olśnienia wewnątrz struktury funkcjonalnej, lecz podobne rozwiązania systemowe strukturalno-okładzinowe mogą stanowić odpowiedź na zapotrzebowanie na uniwersalne, proste w użyciu kompletne systemy.

Jednym z parametrów określających systemy architektoniczne jest elastyczność funkcjonalna systemu strukturalnego. Szereg systemów dedykowany jest konkretnym typom obiektów, co ogranicza ich funkcjonalność. Systemy uniwersalne pozwalają przy minimalizacji elementów strukturalnych na maksymalizację zróżnicowania przestrzennego. Liczba elementów systemu jest jednym z wyznaczników uniwersalności systemu. Responsywne topologicznie struktury, jak przedstawiono w badaniach, można realizować z wykorzystaniem pojedynczego modułu. Rozbudowa bazy kompatybilnych ze sobą modułów jedynie podnosić może efektywność ruchu obiektu, gdyż każdy moduł kształtowany jest w oparciu o zasadę zdolności użycia w dowolnej orientacji. Jak przedstawiono w badaniach pewne rozwiązania elementów predestynowane są do układów pionowych lub poziomych, lecz w znacznym stopniu cechę tę można równoważyć odpowiednimi układami topologicznymi w wyniku ruchu modułu responsywnego topologicznie. Funkcjonalność modułów przedstawiona w badaniach pozostaje na wysokim poziomie, co pozwala na zastosowanie ich technologii w kształtowaniu szerokiego spektrum typów struktur architektonicznych. Moduły pozwalają na tworzenie struktur cienkościennych o grubości struktury równej jednej grubości modułu, lecz możliwe jest również kształtowanie wielopasmowych struktur na wzór kratownic przestrzennych, lecz o ortogonalnym układzie. Każdy typ kształtowania ma indywidualną wytrzymałość, lecz jest możliwy do zrealizowania pojedynczym modułem strukturalnym co umożliwia prowadzenie badań nad zdolnością użycia modułów responsywnych topologicznie w każdym typie struktur architektonicznych.

Podobnie trasowanie przewodów, instalacji na potrzeby obsługi struktury czy dalej funkcji wewnątrz modeli jest uproszczone poprzez stałość geometryczną struktur. W każdym module występują elementy stałe, najczęściej w postaci ramy, która stanowi odpowiedni stelaż dla funkcji trasowania instalacji. Każdy moduł w każdej orientacji realizować może tę funkcję jako w pełni dodatkową, opcjonalną, pozwalającą architektowi na dowolność kształtowania form pod względem analizowanej obsługi.

W badaniach udowodniono, że dokładność połączeń elementów w modułach jest kluczowa dla zachowania zdolności przenoszenia sił i dystrybuowania naprężeń w sposób jednolity w module. Możliwość dobrania odpowiedniej technologii połączeń, niwelującej zauważone trudności pozwoli na bardzo równe reakcje modeli na zróżnicowane obciążenia. Badania dowiodły, że modele mogą uzyskać wystarczającą adaptacyjność topologii, aby znacznie równiej reagować redukcją naprężeń, niż realizowały to moduły responsywne geometrycznie. Przedstawiony na Grafika 117 koncept struktury wysokiej zrealizowany został z użyciem pojedynczego modułu z którego uzyskano tak sztywny rdzeń pionowy, jak i poszczególne poziome płaszczyzny tożsame z modułem konstrukcyjnym obiektów wysokich. Moduł w kilku kolejnych układach podlega szeregowi zróżnicowanych obciążeń, na które każda z instancji modułu odpowiada quasi-indywidualnie. Model umożliwia uzyskanie wystarczająco szerokiego zakresu topologii, aby równoważyć w efektywny sposób wszystkie przedstawione typy obciążeń. Zginanie, obciążenia osiowe, nieosiowe, rozrywanie, miażdżenie stanowią grupę oddziaływań na które moduł w granicach wartości maksymalnych określanych zawsze indywidualnie jest w stanie każdorazowo znaleźć odpowiednią topologię reakcji.

Modele responsywne topologicznie jako nowe rozwiązania w responsywności wymagają szerokiego przebadania przed rozpoczęciem badań sposobów ich realizacji i stosowania, lecz w pierwszych analizach i pomiarach wskazują na dużą efektywność, umożliwiającą porównywalne korzyści do obecnie popularniejszej responsywności geometrycznej. Ich uniwersalność uzyskana modularnością i dużą grupą reakcji topologicznych przy jednoczesnej wyraźnej dyskretyzacji ruchów pozwalają na bardzo szerokie badania koncepcyjne zdolności wykorzystania modułów w architekturze. Opracowanie sposobu działania, realizacji modułów, użycia, a dalej konserwacji i warunków cyrkularności może wyłącznie podnieść ich efektywność jako wprowadzenie dodatkowych funkcji do systemu. Tworzą one systemy strukturalne o logice budowy identycznej do obecnych systemów, na siatce ortogonalnej lub analogicznej, czyniąc rozwiązania inkluzywnymi w realizacji.



Grafika 117. Przedstawienie koncepcji struktury nawiązującej do architektonicznych obiektów wysokich.

12. Streszczenie rozprawy doktorskiej

Kształtowanie Modeli Ruchu Nowoczesnych Systemów Strukturalnych z Wykorzystaniem Rozwiązań Architektury Responsywnej

Autor: mgr inż. arch. Szymon Jankowski

Promotor: dr hab. inż. Waldemar Bober, prof. PWr

Promotor pomocniczy: dr inż. arch. Kajetan Sadowski

Architektura responsywna stanowi niszową dziedzinę, dynamicznie się zmieniającą, stale poszukującą rozwiązań elementarnych jak i bardziej złożonych zagadnień swojej tematyki w celu podniesienia jakości wykorzystania dostępnych zasobów materiałowych, poprzez obniżenie nakładu na realizację struktur wykorzystując zastąpienie części materiału ruchem, bilansując w sposób dodatni nakłady na realizację responsywności w porównaniu do obiektów statycznych. Znaczna indywidualizacja podejść do modelowania rozwiązań responsywnych oraz interdyscyplinarność, przejawiająca się kompleksowością wpływu zagadnień strukturalnych tak na etapie koncepcyjnym, jak dalej realizacyjnym na efektywność działania rozwiązań skutecznie hamują rozwój badań, czyniąc dziedzinę ekskluzywną. Przedstawione w pracy podejścia do modelowania architektonicznego odpowiedzi na elementarne wyzwania architektury responsywnej mają pozwalać na podniesienie uniwersalności procesu tworzenia rozwiązań responsywności.

Jednocześnie przedstawiono szereg zagadnień stanowiących podstawę do dalszych pogłębionych badań w każdym z poruszonych zagadnień i dokonano ewaluacji narzędzia poszukiwania tendencji zachowań modeli zmian geometrii struktur responsywnych w postaci algorytmu ewolucyjnego. W pracy poruszono zagadnienia modeli zmian geometrii, jak i kształtowania elementów w zakresie ich geometrii oraz pracy, spełniających indywidualne wymagania geometrii i sposobu działania na cele realizacji ruchu w architekturze. Szereg elementów na cele kreowania przyszłych systemów strukturalnych architektury responsywnej zostało opracowanych w toku rozprawy, a następnie przedstawiono sposób oceny ich pracy, wpływu na realizację zmienności w czasie, skuteczność działania oraz zakres funkcjonalności.

Cele skupione wokół sposobu wykorzystania algorytmu ewolucyjnego nakreślają kierunek pracy poświęconej w znacznej części zmienności form struktur w czasie. Przedstawiono różnice w kształtowaniu ruchu różnych typów struktur, nakreślając ich indywidualne cechy statyczne i modelowe oraz wpływ na sposób realizacji w nich responsywności. Przeprowadzono szereg zróżnicowanych badań wykorzystujących autorskie metody badawcze oraz specjalnie opracowane stanowisko badawcze pozwalające na bardziej uniwersalną realizację responsywności. Badania dotyczyły form ruchu struktur, lecz również sposobów ewaluacji ich efektywności, metod pomiaru zdolności do wykorzystania responsywności, poprawności elementarnych rozwiązań. Na przykładzie szeregów badań przedstawiono wpływ ich kompleksowości na wyniki, dowodząc konieczności badania rozwiązań w skali makro z możliwie dużym ograniczeniem wykorzystania warunków brzegowych, ze względu na brak zdolności precyzyjnego ich określenia w architekturze responsywnej.

Praca została podzielona na dwie części, którymi kolejno jest wprowadzenie wraz z przedstawieniem postulatów, historii i obecnej formy architektury responsywnej oraz część badawcza poświęcona analizie modeli zachowań oraz ewaluacji rozwiązań responsywnych. Sama część badawcza z kolei skupiona jest wokół 6 głównych zagadnień, którymi kolejno są

responsywność w strukturach prętowych, responsywność wykorzystująca symulacje dynamicznymi relaksacjami, efektywne modele zachowań powłok, zmienność geometryczna ram przestrzennych, kształtowanie systemów strukturalnych dla modeli responsywnych oraz stanowiąca kluczowy wynik badań pracy doktorskiej responsywność topologiczna. We wszystkich wskazanych obszarach przedstawiono metodykę badania responsywności, autorskie rozwiązania modeli zachowań oraz form przestrzennych elementów oraz uzyskano wyniki skuteczności poddawane następnie analizie i nakreśleniu dalszych kierunków badań.

W części poświęconej wstępnemu przedstawieniu responsywności złożonym z 3 rozdziałów omówione zostały sposoby historycznej ewolucji responsywności jako tworu modeli zmiennych oraz osobno rozwijanych systemów pomiarowych i informatycznych. Omówiono obecne badania i ich charakter, a także opisano podstawowe problemy architektury responsywnej nowe jak i te występujące od jej początków. Sformułowano tezy oraz cele pracy, a także opisano budowę stanowiska badawczego, silnie dostosowanego do tworzenia i badania responsywności.

Część badawcza charakteryzuje się schematycznością układu treści, lecz każdorazowo porusza odmienne zagadnienia. Rozdział IV omawia prostą responsywność kratownicy przestrzennej pozwalającą na ruch deterministyczny bazujący na dynamicznych relaksacjach analogicznej struktury. Ewaluowane są rozwiązania dostosowania parametrów symulacji do maksymalizacji efektywności. Rozdział V prezentuje badania struktury powłokowej i modelowania dla niej systemów ruchu. Rozdział prezentuje tak kształtowanie modelu ruchu jak i elementarnych rozwiązań systemu strukturalnego. Następnie w rozdziałach VI oraz VII kolejno przedstawione są modyfikatory modeli powłokowych oraz ramowych pozwalające na lokalną modyfikację naprężeń oraz kontrolę geometrii. Rozwiązanie to przedstawione jest koncepcyjnie, a następnie na podstawie założeń budowane są modele symulacji oraz programowane sposoby zachowań struktur nimi operowanych. W rozdziale VIII przedstawiono rozwiązanie określone jako preakcje mające stanowić dopełnienie modeli zachowań struktur na potrzeby szybszej reakcji na zmianę obciążeń zewnętrznych. Rozdział IX charakteryzuje się odmienną od wcześniejszych rozdziałów budową ze względu na poruszane zagadnienia kształtowania systemu strukturalnego. Nie są omawiane modele zachowań, lecz ze względu na znaczny brak systemów strukturalnych na cele obiektów responsywnych autor odpowiada na potrzebę, przedstawiając metodę kształtowania systemu. Następnie w rozdziale X oraz XI stworzona zostaje koncepcja responsywności topologicznej. Wykreowane zostają jej założenia, opisane są zakładane efekty, a następnie realizowane są modele spełniające założenia. Rozdziały te łączą budowę modeli zachowań z modelami fizycznymi prezentując odmienną formę badań, niż dotychczas. Badaniom podlega szereg modułów strukturalnych oraz wpływ ich lokalizacji w różnych częściach struktur przestrzennych. Badane są parametry najefektywniej sterowane responsywnością topologiczną oraz definiowany jest zakres funkcjonalny modeli, w jakich granicach opłacalne jest wykorzystanie responsywności topologicznej. Każdy temat stanowi osobne zagadnienie badawcze, nie podlegające translacji wyników między dziedzinami, dlatego też każdy uzyskuje własne podsumowanie wyników prac jak i dla każdego nakreślone zostają dalsze wymagane prace, które w większość tematów ze względu na ich oryginalność wymagają rozszerzenia badań elementarnych przed przystąpieniem do dalszych prac bardziej złożonych koncepcji, a następnie modeli symulacyjnych i fizycznych.

13. Dissertation Abstract

Modeling Shape-Changing models of Modern Structural Systems with Responsive Architecture Solutions

Author: mgr inż. arch. Szymon Jankowski

Supervisor: dr hab. inż. Waldemar Bober, prof. PWr

Assistant Supervisor: dr inż. arch. Kajetan Sadowski

Responsive architecture constitutes a niche field, undergoing dynamic transformation and continuously seeking both elementary solutions and more complex approaches within its thematic scope, with the aim of enhancing the efficiency of material resource utilization. This is achieved by reducing the material input required for the realization of structures through the substitution of matter with motion, thereby generating a positive balance between the implementation costs of responsiveness and those of static objects. The considerable individualization of approaches to modeling responsive solutions, combined with the inherently interdisciplinary character of the field—manifested in the complex influence of structural considerations at both the conceptual and implementation stages on the effectiveness of solutions—significantly hinders research progress, rendering the domain exclusive. The approaches to architectural modeling presented in this dissertation, addressing fundamental challenges of responsive architecture, are intended to increase the universality of the process of developing responsive solutions.

Simultaneously, the dissertation presents a set of issues that constitute a foundation for further, more in-depth research in each of the topics discussed, alongside an evaluation of a tool designed to investigate behavioral tendencies of geometric transformations in responsive structures, implemented in the form of an evolutionary algorithm. The dissertation examines models of geometric change, as well as the design of elements in terms of geometry and performance, fulfilling specific requirements of form and operation to enable motion in architectural contexts. A number of components aimed at shaping future structural systems of responsive architecture were developed during the research process. Methods for assessing their performance, temporal variability, efficiency, and functional scope were subsequently proposed.

The research objectives, centered on the use of an evolutionary algorithm, outline a trajectory of work largely dedicated to the temporal variability of structural forms. Differences in the modeling of motion across distinct types of structures are discussed, emphasizing their unique static and behavioral characteristics, as well as their impact on the realization of responsiveness. A wide range of studies were conducted, employing original research methods and a specially designed experimental setup that enables a more universal implementation of responsiveness. These investigations encompassed both structural motion forms and methods for evaluating their efficiency, measurement techniques for responsiveness potential, and the validity of elementary solutions. By means of experimental series, the dissertation demonstrates the influence of research complexity on outcomes, highlighting the necessity of macro-scale testing with minimized boundary conditions, owing to the inherent difficulties of precisely defining such conditions in responsive architecture.

The dissertation is divided into two major parts: the introductory section, which outlines postulates, historical development, and the current state of responsive architecture; and the research section, dedicated to analyzing behavioral models and evaluating responsive solutions. The research component is organized around six principal topics: responsiveness in truss structures, responsiveness through dynamic relaxation simulations, effective shell

behavior models, geometric variability of spatial frames, structural system design for responsive models, and, as the key contribution of the dissertation, topological responsiveness. In all these areas, methodologies for investigating responsiveness are presented, along with original models of structural behavior and spatial forms, followed by performance assessments, analytical interpretations, and the delineation of future research directions.

The introductory discussion of responsiveness, consisting of three chapters, examines its historical evolution as a concept encompassing both variable models and independently developed measurement and computational systems. Current research directions and their characteristics are analyzed, alongside fundamental challenges of responsive architecture, both contemporary and originating at its inception. Research hypotheses and objectives are formulated, and the construction of a specialized experimental setup—tailored to the creation and investigation of responsiveness—is described.

The research section is characterized by a systematic structure, though each chapter addresses a distinct issue. Chapter IV discusses elementary responsiveness of spatial trusses, enabling deterministic motion based on dynamic relaxation of analogous structures, with a focus on parameter optimization to maximize efficiency. Chapter V examines shell structures and their motion systems, encompassing both the modeling of motion and the development of elementary structural solutions. Chapters VI and VII introduce modifiers for shell and frame models, enabling localized stress adjustments and geometric control. These solutions are first presented conceptually, followed by the development of simulation models and programmed behavioral mechanisms for structures incorporating them. Chapter VIII introduces the concept of “preactions,” intended to enhance structural behavior models by accelerating responses to changes in external loads. Chapter IX diverges from previous chapters, focusing on the design of structural systems rather than behavioral models. Addressing the notable lack of dedicated structural systems for responsive objects, a method for system design is proposed.

Chapters X and XI present the concept of topological responsiveness. Its assumptions are formulated, anticipated effects are described, and models meeting these criteria are developed. These chapters combine behavioral modeling with physical experimentation, thus introducing a novel research approach. Multiple structural modules and their placement within spatial structures are investigated, assessing the parameters most effectively governed by topological responsiveness and defining the functional scope and limits of its practical applicability. Each research topic is treated as a distinct field of study, with results that cannot be directly transferred across domains. Accordingly, each topic is summarized individually, and directions for further research are proposed. Due to their originality, most areas require expansion of elementary studies before advancing to more complex conceptual work and subsequent simulation and physical modeling.

14. Spis grafik

GRAFIKA 1.SCHEMAT BLOKOWY ELEMENTÓW SKŁADOWYCH STRUKTURY RESPONSYWNEJ. W ZALEŻNOŚCI OD STOPNIA ZŁOŻONOŚCI MODELU LICZBA PODSYSTEMÓW I ELEMENTÓW MOŻE ULEGAĆ ROZWINIĘCIU ILOŚCIOWEMU, LECZ NIE JAKOŚCIOWEMU. 23
GRAFIKA 2.KOLEJNOŚĆ DZIAŁAŃ W ITERACYJNYM PROCESIE BADANIA ŚRODOWISKA I REAKCJI STRUKTURY RESPONSYWNEJ. SCHEMAT PRZEDSTAWIA DWUSTOPNIOWE ZAPĘTLENIE. 42
GRAFIKA 3.SCHEMAT PRZEDSTAWIA WPŁYW DOKŁADNOŚCI POMIARÓW NA SKUTECZNOŚĆ REAKCJI SYSTEMU. GDY POMIARY NIE ZACHOWUJĄ ODPOWIEDNIEJ PRECYZJI NASTĘPUJE BŁĘDNE ROZPOZNANIE PRZYPADKU OBCIĄŻENIOWEGO. W KONSEKWENCJI WYSTĘPUJE MOŻLIWOŚĆ PRZECIĄŻENIA STRUKTURY. 43
GRAFIKA 4. SCHEMAT BLOKOWY DWÓCH SYSTEMÓW KONIECZNYCH DO WPROWADZENIA W STRUKTURZE RESPONSYWNEJ. SYSTEMY TE PODLEGAJĄ CORAZ CZĘŚCIEJ UNIFIKACJI W JEDEN KOMPLEKSOWY SYSTEM.. 46
GRAFIKA 5.SCHEMAT OPŁACALNOŚCI PODNOSZENIA EFEKTYWNOŚCI POPRZEZ WPROWADZANIE RUCHU I CYRKULARNOŚCI DO STRUKTUR STATYCZNYCH. 49
GRAFIKA 6.SCHEMAT EWOLUCJI MODELI ZACHOWAŃ. WPROWADZENIE UCZENIA MASZYNOWEGO LUB STWORZENIE PEŁNEJ MATRYCY REAKCJI POZWALA NA ZNACZĄCĄ REDUKCJĘ STOPNIA ZŁOŻONOŚCI PEŁNEGO MODELU ZACHOWAŃ. PROCES REDUKCJI DLA KAŻDEJ STRUKTURY MA INDYWIDUALNE TEMPO. 53
GRAFIKA 7. WPŁYW STOPNIA NASYCENIA MODELU ZACHOWAŃ NA POZIOM BEZPIECZEŃSTWA GENEROWANIA REAKCJI STRUKTURY RESPONSYWNEJ. 54
GRAFIKA 8. SCHEMAT BUDOWY MODELU KOMPUTEROWEGO KRATOWNICY PRZESTRZENNEJ WRAZ Z PUNKTAMI KONTROLNYMI UMOŻLIWIAJĄCYMI STEROWANIE MODELEM 59
GRAFIKA 9.SPOSÓB DZIAŁANIA MODELU STEROWANEGO RUCHAMI ANALOGICZNEJ MEMBRANY. JEŚLI MODEL ZAREJESTRUJE OBCIĄŻENIE Z PRAWEJ STRONY PRZEPROWADZI SYMULACJĘ CIŚNIENIA NAPIERAJĄCEGO NA MEMBRANĘ ZE STRONY PRZECIWNEJ 61
GRAFIKA 10. MODEL BADANIA WYDATKU ENERGETYCZNEGO SYMULOWANEJ STRUKTURY. DWIE PROSTOPADŁE PŁYTY POŁĄCZONE Z TENSOMETRAMI ZBIERAJĄ INFORMACJE O PRĘDKOŚCI WIATRU, KTÓRE SĄ INTERPRETOWANE PRZEZ MIKROKONTROLER, A NASTĘPNIE W ZROZUMIAŁYM DLA JEDNOSTKI CENTRALNEJ FORMACIE PRZESYŁANIE DO PROGRAMU RHINOCEROS GRASSHOPPER, GDZIE STANOWIĄ DANE WEJŚCIOWE ZMIANY GEOMETRII MODELU. 74
GRAFIKA 11. SCHEMAT BLOKOWY I WYNIKOWA GEOMETRIA STEROWANA PARAMETRYCZNIE DLA MODELU POWŁOKI DEFORMOWANEJ RUCHEM PODPÓR. 78
GRAFIKA 12.SCHEMAT UKŁADU TYPÓW PODPÓR W STRUKTURZE. DLA KAŻDEGO UKŁADU POWŁOKA WSPARTA JEST W 4 PUNKTACH NAROŻNYCH, LECZ ZAWSZE ZRÓŻNICOWANY POZOSTAJE UKŁAD STOPNI SWOBODY. 83
GRAFIKA 13.OPRACOWANIE MODELU FIZYCZNEJ PODPORY Z WYKORZYSTANIEM OPROGRAMOWANIA AUTODESK INVENTOR 2024. 85
GRAFIKA 14. WIZUALIZACJA ZAKRESU RUCHU POZIOMEGO PODPORY RUCHOMEJ STRUKTURY RESPONSYWNEJ. SKALA RUCHU DOPASOWANA ZOSTAŁA DO SKALI STRUKTURY. MODEL KOMPUTEROWY PODPORY ZREALIZOWANY W PROGRAMIE AUTODESK INVENTOR PROFESSIONAL 2024 STANOWI ELEMENT ZAŁĄCZNIKA NR 5.B PRACY. 86
GRAFIKA 15.AKSONOMETRYCZNE PREZENTACJE ELEMENTÓW PODPORY WYKONANE PRZEZ AUTORA W PROGRAMIE AUTODESK INVENTOR 2024 STANOWIĄ CZĘŚĆ ZAŁĄCZNIKA NR 5.B PRACY. ELEMENTY PRZYGOTOWANO W MODULE SYSTEMU V-SLOT 2020. 87
GRAFIKA 16.MODEL PODPORY ODPOWIEDZIALNY ZA SWOBODNY OBRÓT MOCOWANIA WZGLĘDEM RUCHOMEJ CZĘŚCI PODPORY. MODELE STANOWIĄ ZAŁĄCZNIKI NR 5.D.1 ORAZ 5.D.2 DO PRACY. 87
GRAFIKA 17.SCHEMAT ELEKTRONIKI STEROWANIA RUCHEM PODPORY Z UŻYCIEM MIKROKONTROLERA ARDUINO UNO REV3 Z UŻYCIEM WŁASNEGO OPROGRAMOWANIA. 89
GRAFIKA 18. GOTOWY FIZYCZNY MODEL STRUKTURY RESPONSYWNEJ, W PEŁNI FUNKCJONALNY, UMOŻLIWIAJĄCY DO PRZESUWU PRZY SIŁACH POZIOMYCH DO 200N. 90
GRAFIKA 19. PRZYKŁADOWY MODEL POŁĄCZENIA PODPORY SZTYWNEJ Z MODELEM MEMBRANOWYM. ANALOGICZNY PROBLEM ŁĄCZENIA WYSTĘPUJE NA POŁĄCZENIU PODPORY Z POWŁOKĄ. ZE

WZGLĘDU NA SZTYWNY CHARAKTER POWŁOKI W BADANYM MODELU NIE WYSTĘPUJE POTRZEBA STĘŻANIA KRAWĘDZI, KTÓRA W POWŁOKACH MEMBRANOWYCH STANOWI KLUCZOWY ELEMENT ZACHOWANIA GEOMETRII. 90
GRAFIKA 20. PRZEDSTAWIENIE MODELU MOCOWANIA POWŁOKI DO PODPORY. POZWALA ONO NA JEDNORODNĄ DYSTRYBUCJĘ NAPRĘŻEŃ MIĘDZY ELEMENTAMI ORAZ UNIKNIĘCIE ZMIANY ZNAKU NAPRĘŻEŃ W NAROŻU MODELU. 91
GRAFIKA 21.MODEL PODPORY OPARTEJ NA DWÓCH SIŁOWNIKACH. STEROWANIE ODBYWA SIĘ POPRZEZ RUCH BIEGUNOWY DWÓCH SIŁOWNIKÓW. MODEL WYKONANO PRZY UŻYCIU PROGRAMU AUTODESK INVENTOR PROFESSIONAL 2024. STANOWI ON ZAŁĄCZNIK NR 5.C PRACY. 93
GRAFIKA 22.PRZEDSTAWIENIE AKSONOMETRYCZNE ZAKRESU PRZESTRZENI RUCHU PODPORY POWŁOKI. 93
GRAFIKA 23. WIDOK Z GÓRY UKŁADU PODPORY. WSZYSTKIE PARAMETRY GEOMETRYCZNE POZOSTAJĄ ZMIENNE CO POZWALA NA PROSTE DOSTOSOWANIE ZAKRESU RUCHU MODELU ORAZ FORMY JEGO GRANIC. MODEL BADANIA PODPORY ZOSTAŁ WYKONANY W PROGRAMIE RHINOCEROS GRASSHOPPER I STANOWI ZAŁĄCZNIK NR 5.H PRACY. 94
GRAFIKA 24.SCHEMAT BLOKOWY ALGORYTMU STEROWANIA RUCHEM PODPORY I ANALIZY JEJ STATYKI. ALGORYTM ZREALIZOWANO W PROGRAMIE RHINOCEROS GRASSHOPPER. 95
GRAFIKA 25. SCHEMATY 4 UKŁADÓW OGRANICZEŃ RUCHU PODPORY DLA 4 ZRÓŻNICOWANYCH ZESTAWÓW WARTOŚCI PARAMETRÓW DOBORU GEOMETRII. WSZYSTKIE UKŁADY PODLEGAJĄ BADANIU JEDNOLITOŚCI NAPRĘŻEŃ W NICH WYSTĘPUJĄCYCH. 96
GRAFIKA 26.SCHEMAT UKŁADU OBCIĄŻEŃ NA CELE BADANIA JEDNOLITOŚCI ROZKŁADU NAPRĘŻEŃ. 97
GRAFIKA 27. FORMOWANIE PRZYPADKÓW OBCIĄŻENIOWYCH NA CELE EWALUACJI JAKOŚCI ZAKRESÓW PRACY PODPÓR DLA 4 KOLEJNYCH MODELI. 97
GRAFIKA 28. MODEL POWŁOKI Z ZAIMPLEMENTOWANYMI MODELAMI PODPÓR OPRACOWANYCH GEOMETRYCZNIE, ANALIZOWANYCH W SPOSÓB SZCZEGÓŁOWY POD KĄTEM STATYKI I ZDOLNOŚCI RUCHU. MODEL SYMULACJI OPRACOWANY W PROGRAMIE RHINOCEROS GRASSHOPPER STANOWI ZAŁĄCZNIK 5.G PRACY. 101
GRAFIKA 29. WIDOK AKSONOMETRYCZNY KONCEPCJI MODELU FIZYCZNEGO RUCHOMEJ POWŁOKI WYKORZYSTUJĄCEJ ZJAWISKO ELASTOOPTYCZNE DO WIZUALIZACJI NAPRĘŻEŃ. 103
GRAFIKA 30. PRZEDSTAWIENIE MODULARNEGO SYSTEMU ELEMENTÓW ŁĄCZNIKÓW TWORZĄCYCH SZALUNKI DLA DEFORMACJI PŁASKIEJ PŁYTY POLIWĘGLANOWEJ. MODEL OPRACOWANY W PROGRAMIE AUTODESK INVENTOR PROFESSIONAL I STANOWI ZAŁĄCZNIK NR PRACY. 105
GRAFIKA 31. PERSPEKTYWICZNE ZOBRAZOWANIE SYMULOWANEGO MODYFIKATORA PUNKTOWEGO ZAMOCOWANEGO W 5 PUNKTACH DO POWŁOKI. PRZEDSTAWIONO UPROSZCZENIA GEOMETRYCZNE ODPOWIADAJĄCE ZŁOŻONOŚCI OBLICZENIOWEJ MODELU. MODEL STANOWI ZAŁĄCZNIK NR 6.G PRACY. 110
GRAFIKA 32.ETAPY LOKALIZACJI MODYFIKATORÓW NA POWIERZCHNI POWŁOKI W CELU SYMULACJI PROCESU AKTYWNEGO WYGINANIA 113
GRAFIKA 33.MODEL MODYFIKATORA WRAZ Z 6 SIŁOWNIKAMI ORAZ RDZENIEM CENTRALNYM. MODEL OPRACOWANY W PROGRAMIE AUTODESK INVENTOR 2024. 116
GRAFIKA 34. MODEL SIŁOWNIKA 5-PUNKTOWEGO POŁĄCZONEGO Z POWŁOKĄ. PRZEDSTAWIONO SPOSÓB WYKORZYSTANIA ŁĄCZNIKÓW ROZKŁADAJĄCYCH NAPRĘŻENIA. MODEL OPRACOWANO W PROGRAMIE AUTODESK INVENTOR PROFESSIONAL 2024 I STANOWI ZAŁĄCZNIK NR 6.E PRACY. 117
GRAFIKA 35. PRZEKROJE PRZEZ ŁĄCZNIK. WIDOCZNA JEST ŚRUBA ŚRODKOWA POZWALAJĄCA NA UZYSKANIE SPRĘŻENIA POŁĄCZENIA. 118
GRAFIKA 36.ANALIZA MES WYKONANA NA POJEDYNCZYM MODELU MODYFIKATORA PRZEDSTAWIA NIEJEDNORODNOŚĆ NAPRĘŻEŃ NA POWIERZCHNI SIŁOWNIKÓW. ANALIZA PRZEPROWADZONA Z WYKORZYSTANIEM OPROGRAMOWANIA AUTODESK INVENTOR NASTRAN. 120
GRAFIKA 37. AKSONOMETRYCZNY WIDOK WYNIKÓW GRAFICZNYCH ANALIZY MES. STREFY WOKÓŁ PUNKTÓW MOCOWANIA MODYFIKATORA DO POWŁOKI CHARAKTERYZUJĄ SIĘ NISKIMI NAPRĘŻENIAMI. 121
GRAFIKA 38.UPROSZCZONA GEOMETRYCZNA BUDOWA SIŁOWNIKA I SPOSÓB DOBORU PUNKTU MOCOWANIA DRUGIEGO KOŃCA WRAZ Z RZUTOWANIEM SIŁOWNIKA NA POWŁOKĘ. 125
GRAFIKA 39.WYNIKOWE UKŁADY MODYFIKATORÓW WRAZ Z ROZKŁADEM NAPRĘŻEŃ NA POWIERZCHNI POWŁOKI. 127

GRAFIKA 40.TENDENCJE MODYFIKATORÓW DO UZYSKIWANIA UKŁADÓW ANALOGICZNYCH DO ŚCIĄGÓW STRUKTUR POWŁOKOWYCH W CELU REDUKCJI SIŁ POZIOMYCH W MODELU. UKŁADY TAKIE ZE WZGLĘDU NA ZNACZNE DŁUGOŚCI MODYFIKATORÓW UZYSKUJĄ BARDZO NIEEFEKTYWNE TOPOLOGIE. 133
GRAFIKA 41. NAJWYRAŹNIEJSZE TENDENCJE W POSTACI SPRĘŻEŃ KRAWĘDZI POWŁOKI ORAZ UKŁADÓW RÓWNOLEGŁYCH I PROSTOPADŁYCH. DLA DOWOLNEGO PRZYPADKU OBCIĄŻENIOWEGO MODEL UZYSKIWAŁ JEDEN Z WYMIENIONYCH UKŁADÓW. 134
GRAFIKA 42.INTERPOLACJA WYNIKOWYCH NAPRĘŻEŃ Z RÓŻNYCH ŹRÓDEŁ ORAZ INTERPRETACJA WARTOŚCI DLA RÓŻNYCH PRZYPADKÓW GEOMETRYCZNYCH. 135
GRAFIKA 43. MODEL SIŁOWNIKA Z PRZEDSTAWIENIEM GRAFICZNYCH WYNIKÓW ANALIZY MES. MODEL PRZYGOTOWANO W OPROGRAMOWANIU AUTODESK INVENTOR PROFESSIONAL 2024, A NASTĘPNIE PRZEBADANO W AUTODESK INVENTOR NASTRAN Z UŻYCIEM NIELINIOWEJ ANALIZY STATYCZNEJ. PLIK MODELU MODYFIKATORA STANOWI ZAŁĄCZNIK NR 6.A PRACY. 137
GRAFIKA 44.KONCEPCJA MODULARNEJ STRUKTURY MODYFIKATORÓW ORAZ SPOSOBU STEROWANIA ZMIANAMI GEOMETRII STRUKTUR SZTYWNYCH WĘZŁOWO. 143
GRAFIKA 45.SPOSOBY WPŁYWU NA GEOMETRIĘ STREFY WĘZŁOWEJ STRUKTURY Z WYKORZYSTANIEM MODYFIKATORÓW. 144
GRAFIKA 46.SCHEMAT STREFY WĘZŁOWEJ STRUKTURY RAMOWEJ. GRAFIKA PRZEDSTAWIA ZŁOŻONOŚĆ STEROWANIA KAŻDYM Z ELEMENTÓW MODELU. RUCH WYKONYWANY JEST W 3 PŁASZCZYZNACH DLA WSZYSTKICH BELEK ORAZ SŁUPÓW. 145
GRAFIKA 47.SCHEMAT BLOKOWY PROGRAMU STEROWANIA POJEDYNCZYM MODUŁEM WYPOSAŻONYM W SIŁOWNIKI WRAZ Z PEŁNYM MODUŁEM. WRAZ ZE WZROSTEM LICZBY MODUŁÓW W SPOSÓB NIELINIOWY WZRASTA STOPIEŃ ZŁOŻONOŚCI RUCHU. 147
GRAFIKA 48.PEŁNY MODEL BADAWCZY ZŁOŻONY Z POŁĄCZONYCH MODUŁÓW ELEMENTARNYCH WRAZ Z UKŁADEM PODPÓR. MODEL STANOWI ZAŁĄCZNIK NR 7.F PRACY. 148
GRAFIKA 49.MODEL BADAWCZY Z GRAFICZNĄ PREZENTACJĄ WYNIKÓW BADAŃ ODKSZTAŁCEŃ PODCZAS KONTROLI GEOMETRII DLA JEDNEGO Z PRZYPADKÓW OBCIĄŻEŃ POZIOMYCH ZEWNĘTRZNYCH. 152
GRAFIKA 50.TOPOLOGIA MODELU SZTYWNEGO TOPOLOGICZNIE ZACHOWUJE PODOBIEŃSTWO DO STRUKTURY O KWADRATOWYCH MODUŁACH, LECZ TOPOLOGIĄ WYMUSZA INNE METODY KSZTAŁTOWANIA ODPOWIEDZI SIŁOWNIKAMI. 157
GRAFIKA 51. WYNIKOWA MAPA NAPRĘŻEŃ DLA STRUKTURY SZTYWNEJ TOPOLOGICZNIE. 161
GRAFIKA 52.SCHEMATYCZNE PRZEDSTAWIENIE DZIAŁANIA KOLEJNYCH 4 MODELI ZACHOWAŃ SKŁADAJĄCYCH SIĘ NA HYBRYDOWY ITERACYJNY MODEL ODPOWIEDZI STRUKTURY NA OBCIĄŻENIA ZEWNĘTRZNE. 165
GRAFIKA 53.SCHEMAT DZIAŁANIA MODELU ZACHOWAŃ HYBRYDOWO-ITERACYJNEGO POZWALAJĄCEGO NA PRZYSPIESZENIE REAKCJI STRUKTURY. 167
GRAFIKA 54.SCHEMAT LINIOWY STRUKTURY O SWOBODNEJ GEOMETRII. MODEL POSIADA POWTARZALNE WĘZŁY POD WZGLĘDEM TOPOLOGICZNYM, LECZ O INDYWIDUALNYCH ZALEŻNOŚCIACH KĄTOWYCH MIĘDZY ELEMENTAMI. 171
GRAFIKA 55.KAŻDY WĘZEŁ ZDEFINIOWANY JEST JAKO ZŁOŻONA STREFA WĘZŁOWA WYPOSAŻONA W MODYFIKATORY. 172
GRAFIKA 56.SCHEMAT DZIAŁANIA MODELU ZWIĘKSZANIA GRUBOŚCI KRATOWNICY. NA GRAFICE PRAWEJ WIDOCZNYCH JEST WSZYSTKIE 50 GEOMETRII BADANYCH JEDNOCZEŚNIE. MODEL STANOWI ZAŁĄCZNIK NR 8.B PRACY. 183
GRAFIKA 57.SCHEMAT GEOMETRII DLA MODELU NR 2 UZYSKIWANYCH JEDNOCZEŚNIE WRAZ Z WYKRESEM ZALEŻNOŚCI UGIĘĆ OD STOPNIA DEFORMACJI GEOMETRII MODELEM ZACHOWAŃ. MODEL STANOWI ZAŁĄCZNIK NR 8.D PRACY. 185
GRAFIKA 58.MODEL UZYSKANY W WYNIKU DZIAŁANIA ALGORYTMU DYNAMICZNYCH RELAKSACJI. MODEL STANOWI ZAŁĄCZNIK NR 8.E PRACY. 186
GRAFIKA 59.PRZYKŁADOWY WYKRES STRUMIENI SIŁ WEDŁUG TEORII ROZKŁADU NAPRĘŻEŃ WEDŁUG PROF. WACŁAWA ZALEWSKIEGO. WIDOCZNY JEST WPŁYW NAROŻY OTWOROWAŃ NA ROZKŁAD STRUMIENI. UKŁAD STRUMIENI SIL JEST KOMPLEMENTARNY Z MAPĄ NAPRĘŻEŃ. W MIEJSCU ZWIĘKSZONEGO ZAGĘSZCZENIA LINII STRUMIENI MAPA PRZYJMUJE WYRAŹNIEJSZY KOLOR SYGNALIZUJĄC WIĘKSZE NAPRĘŻENIA. 187

GRAFIKA 60.PRZYKŁAD GEOMETRII KRATOWNICY UZYSKANY W WYNIKU DZIAŁANIA MODELU OPARTEGO O KONCEPCJĘ STRUMIENI SIŁ. KAŻDA ZE SFER REPREZENTUJE ZAKRES WPŁYWU STRUMIENI NA POSZCZEGÓLNE WĘZŁY. 189
GRAFIKA 61.UKŁAD GEOMETRYCZNY W WIDOKU Z GÓRY. ZAUWAŻALNY JEST NAJWIĘKSZY WPŁYW WĘZŁÓW ŚRODKOWYCH NA GEOMETRIĘ KRATOWNICY REFERENCYJNEJ. MODEL STANOWI ZAŁĄCZNIK NR 8.C PRACY. 191
GRAFIKA 62. ZESTAWIENIE PRZYPADKÓW OBCIĄŻENIOWYCH DLA MODELI PREAKCJI. WSZYSTKIE PRZYPADKI SYMULOWANE SĄ GRUPAMI OBCIĄŻEŃ PUNKTOWYCH LUB OBCIĄŻENIAMI POWIERZCHNIOWYMI O STAŁYM CHARAKTERZE ODDZIAŁYWANIA. 195
GRAFIKA 63.ZESTAWIENIE WYNIKÓW GEOMETRYCZNYCH REAKCJI MODELU NA JEDEN Z PRZYPADKÓW OBCIĄŻENIOWYCH WRAZ Z GRAFICZNĄ REPREZENTACJĄ NAPRĘŻEŃ POLICZONYCH Z UŻYCIEM MES. 197
GRAFIKA 64.WYKRES ZALEŻNOŚCI WARTOŚCI STRZAŁKI UGIĘCIA OD STOPNIA INTENSYWNOŚCI REAKCJI MODELU. ZAUWAŻALNE JEST JEDNO WYRAŹNE EKSTREMUM GLOBALNE ORAZ SZEREG EKSTREMÓW LOKALNYCH WPŁYWAJĄCYCH NA TRUDNOŚĆ UZYSKIWANIA NAJEFEKTYWNIEJSZYCH WYNIKÓW POSZUKIWANIA GEOMETRII Z UŻYCIEM ALGORYTMU EWOLUCYJNEGO. 198
GRAFIKA 65.PRZYKŁADOWY WYNIK DEFORMACJI GEOMETRII KRATOWNICY PRZEZ MODEL NR 2 WRAZ Z PREZENTACJĄ WYKRESÓW NAPRĘŻEŃ DLA POSZCZEGÓLNYCH PRĘTÓW. ZAUWAŻALNE SĄ GŁÓWNE KIERUNKI PRZENOSZENIA NAPRĘŻEŃ W STRONĘ WSZYSTKICH PODPÓR MODELU. IM BARDZIEJ LINIA ŁĄCZĄCA PUNKT PRZYŁOŻENIA SIŁY Z PODPORĄ POKRYWAŁA SIĘ Z UKŁADEM PRĘTÓW, TYM WIĘKSZY WZROST EFEKTYWNOŚCI MODEL WYKAZYWAŁ. 199
GRAFIKA 66.PRZYKLADOWY WYNIK GEOMETRYCZNEJ MODYFIKACJI KRATOWNICY WRAZ Z PRZEDSTAWIONYM PROBLEMEM SKALI REAKCJI WPŁYWAJĄCYM NA NIEEFEKTYWNĄ PROPORCJĘ WYSOKOŚCI POSZCZEGÓLNYCH WĘZŁÓW MODELU. 200
GRAFIKA 67. ROZKŁAD STRUMIENI SIŁ NA REFERENCYJNYM MODELU POWŁOKI. NA JEGO PODSTAWIE OBLICZANA JEST DEFORMACJA KRATOWNICY. WYNIK DEFORMACJI PRZEDSTAWIONY JEST WRAZ Z GRAFICZNYM WYNIKIEM ROZKŁADU NAPRĘŻEŃ NA GRAFICE. 202
GRAFIKA 68.WYKRESY ZMIAN WARTOŚCI UGIĘĆ PODCZAS RUCHÓW POŚREDNICH DL A WSZYSTKICH MODELI. ZAUWAŻALNE JEST, ŻE WSZYSTKIE MODELE PRZEKRACZAJĄ CHWILOWO MAKSYMALNE NAPRĘŻENIA REFERENCYJNEJ STRUKTURY STATYCZNEJ. 203
GRAFIKA 69. KOLEJNE FAZY ZMIANY GEOMETRII STRUKTURY STEROWANEJ MODELEM NR 4 MIĘDZY GEOMETRIĄ REFERENCYJNĄ, A DOCELOWĄ. ZAUWAŻALNE SĄ ZNACZNE ZMIANY UKŁADU NAPRĘŻEŃ WYMAGAJĄCE POGŁĘBIONEJ ANALIZY STATYCZNEJ. 205
GRAFIKA 70."A)"PRZYKŁAD MODELU STOSUJĄCEGO SEKWENCJONOWANIE RUCHU PODCZAS ZMIANY GEOMETRII. "B)"ZMIANA GEOMETRII MODELU PODCZAS PROSTEJ TRANSFORMACJI MIĘDZY KOLEJNYMI GEOMETRIAMI. MODEL SEKWENCJONOWANY UZYSKUJE ZNACZNĄ REDUKCJĘ NAPRĘŻEŃ PODCZAS RUCHU WZGLĘDEM MODELU REFERENCYJNEGO. 206
GRAFIKA 71. 50 KOLEJNYCH GEOMETRII MODELU NR 1 WRAZ Z WYKRESEM WARTOŚCI UGIĘĆ DLA KAŻDEJ BADANEJ FORMY KRATOWNICY. 208
GRAFIKA 72. SCHEMATYCZNE PRZEDSTAWIENIE ZŁOŻONOŚCI RUCHU MODELU KRATOWNICY, W KTÓRYM WSZYSTKIE ELEMENTY NOŚNE POZOSTAJĄ RUCHOME. TEORIA RUCHU I NIELINIOWEJ PRACY SIŁOWNIKÓW. 211
GRAFIKA 73. MODEL BADAWCZY RUCHÓW POŚREDNICH Z PŁASZCZYZNAMI NA KTÓRYCH ROZCIĄGANA JEST KRATOWNICA PRZESTRZENNA. ZAZNACZONE SĄ WIDOCZNE PUNKTY GEOMETRII POŚREDNICH STEROWANYCH ALGORYTMEM EWOLUCYJNYM. 214
GRAFIKA 74. WYKRES WSZYSTKICH WARTOŚCI NAPRĘŻEŃ STANÓW POŚREDNICH WSZYSTKICH WYSTĘPUJĄCYCH W MODELU PRĘTÓW. WIDOCZNE JEST ZNACZNE ZRÓŻNICOWANIE REAKCJI ELEMENTÓW MODELU NA ZMIANY GEOMETRII. 215
GRAFIKA 75.WYNIKOWE TRASOWANIE ZMIAN GEOMETRII MODELU UWZGLĘDNIAJĄCE REDUKCJĘ NAPRĘŻEŃ W STANACH POŚREDNICH. CHARAKTERYZUJE SIĘ ZNACZNIE BARDZIEJ ZŁOŻONĄ TRAJEKTORIĄ TRANSLACJI WĘZŁÓW, LECZ POZOSTAJE OPŁACALNA ZE WZGLĘDU NA NAPRĘŻENIA MAKSYMALNE. 217
GRAFIKA 76. PRZYKŁADOWA ZNACZNA ZMIANA TRASOWANIA ZMIAN GEOMETRII STRUKTURY. LEWA GRAFIKA PREZENTUJE MODEL REFERENCYJNY PRZED MODYFIKACJĄ, NATOMIAST PRAWA GRAFIKA OBRAZUJE EFEKTYWNIEJSZY SPOSÓB RUCHU MODELU. 218
GRAFIKA 77.GEOMETRIA STRUKTURY UZYSKANA W WYNIKU PRZY MODELU ZACHOWAŃ. CHARAKTERYZUJE SIĘ BARDZO DUŻYM STOPNIEM ZŁOŻONOŚCI PRZESTRZENNEJ, KAŻDY WĘZEŁ

ZACHOWUJE INDYWIDUALNOŚĆ KIERUNKÓW WYPROWADZENIA POŁĄCZEŃ, A CAŁA STRUKTURA POZOSTAJE NIEZWYKLE WRAŻLIWA NA NIEDOKŁADNOŚCI WYKONAWCZE. 222
GRAFIKA 78.SCHEMAT ISTOTNOŚCI OGRANICZEŃ STRUKTURALNYCH SYSTEMÓW PRZESTRZENNYCH DO REALIZACJI MODELI ARCHITEKTURY RESPONSYWNEJ. 224
GRAFIKA 79.PRYZKŁADY GEOMETRII NIEMOŻLIWYCH DO UZYSKANIA W WYNIKU RUCHU STRUKTURY RESPONSYWNEJ. MODEL ZACHOWAŃ UZNAŁ UKŁADY ZA EFEKTYWNE ZE WZGLĘDU NA BRAK ANALIZY RUCHÓW POŚREDNICH PODCZAS KTÓRYCH DOCHODZI DO SZEREGU NIEDOZWOLONYCH PRZECIĘĆ ELEMENTÓW STRUKTURALNYCH. 225
GRAFIKA 80.WYNIK MODYFIKACJI GEOMETRII FRAGMENTÓW STRUKTURY. ZAUWAŻALNA JEST RÓŻNICA PROPORCJI REAKCJI GEOMETRYCZNYCH SYSTEMU. DOLNE PASMO WYMAGA RUCHU O ZNACZNIE WIĘKSZEJ SKALI NIŻ PASMO GÓRNE. 227
GRAFIKA 81.KONCEPCYJNE OPRACOWANIE BUDOWY WĘZŁA W DRUGIEJ PŁASZCZYŹNIE ZE WZGLĘDU NA DOSTĘPNOŚĆ DO PUNKTÓW POŁĄCZEŃ WĘZŁA Z PRĘTAMI. 230
GRAFIKA 82.KONCEPCJA MODELOWANIA RAMION POŁĄCZEŃ WĘZŁA ZE WZGLĘDU NA DOSTĘPNOŚĆ UZYSKIWANYCH GEOMETRII STRUKTUR PRZESTRZENNYCH I MINIMALIZACJĘ NIEOSIOWOŚCI. 230
GRAFIKA 83. SPOSÓB ŁĄCZENIA PRĘTA Z ELEMENTEM WĘZŁOWYM. NA PRAWEJ GRAFICE WIDOCZNY JEST ZAKRES ROTACJI KAŻDEGO Z PRĘTÓW POZWALAJĄCY NA RUCH MODELU RESPONSYWNEGO. 232
GRAFIKA 84. OSTATECZNA KONCEPCJA MODELU ELEMENTÓW WĘZŁOWYCH POZWALAJĄCYCH NA UZYSKANIE WYSTARCZAJĄCEGO STOPNIA OBROTU WSZYSTKICH ELEMENTÓW RUCHOMYCH WZGLĘDEM ELEMENTÓW STATYCZNYCH. 233
GRAFIKA 85.PRZEDSTAWIENIE SPOSOBU UZYSKANIA ROTACJI NA WĘŹLE . PO PRAWEJ STRONIE WIDOCZNA FORMA BRYŁY, NA KTÓREJ OPARTA ZOSTAŁA KONCEPCJA MODELU BRYŁOWEGO WĘZŁA DLA STRUKTUR RESPONSYWNYCH. 233
GRAFIKA 86.KONCEPCJA MODELU BRYŁOWEGO WĘZŁA Z PRZEDSTAWIENIEM PODZIAŁU NA ELEMENTY ZŁOŻENIA. STRUKTURA SKŁADA SIĘ Z POWTARZALNYCH 12 SEGMENTÓW ŁĄCZONYCH MIĘDZY SOBĄ WIELOPUNKTOWO. WĘZEŁ UZYSKUJE WYTRZYMAŁOŚĆ DOPIERO PO ZŁOŻENIU CAŁOŚCI JEGO MODELU. 235
GRAFIKA 87.WYNIKI ANALIZY MES ROZKŁADU NAPRĘŻEŃ W STRUKTURZE OBCIĄŻONEJ SIŁAMI OSIOWYMI 3 PRĘTÓW WYWOŁUJĄCYCH OBRÓT MODELU. NA PRAWEJ GRAFICE WIDOCZNY JEST PRZEKRÓJ PRZEZ WĘZEŁ PREZENTUJĄCY PODZIAŁ NA ELEMENTY SKŁADOWE MODELU. 236
GRAFIKA 88.KONCEPCJA STRUKTURY MOŻLIWA DO UZYSKANIA W WYNIKU UŻYCIA SYSTEMOWYCH WĘZŁÓW OPRACOWANYCH W OPISANYCH BADANIACH. WĘZEŁ W SZCZEGÓLNOŚCI PREDESTYNOWANY JEST DO UŻYCIA W STRUKTURACH O POWTARZALNYCH MODUŁACH STRUKTURALNYCH. 237
GRAFIKA 89. ZŁOŻONY ZESTAW 5 WĘZŁÓW GOTOWYCH DO WYKORZYSTANIA W STRUKTURZE FIZYCZNEJ. MODELE CHARAKTERYZUJĄ SIĘ POWTARZALNĄ BUDOWĄ, DUŻĄ TOLERANCJĄ WYKONAWCZĄ ORAZ ELASTYCZNOŚCIĄ UZYSKIWANYCH GEOMETRII. 238
GRAFIKA 90.KONCEPCJA MODELU WĘZŁA CENTRYCZNEGO Z PRZEDSTAWIENIEM ELEMENTÓW SKŁADOWYCH POWTARZALNEJ STRUKTURY DWUNASTOŚCIANU. 241
GRAFIKA 91.SCHEMAT ZAKRESÓW RUCHU POSZCZEGÓLNYCH POŁĄCZEŃ WĘZŁA Z PRĘTAMI. KOLOREM ZIELONYCH PRZEDSTAWIONO PRZESTRZEŃ RUCHU POJEDYNCZYCH POŁĄCZEŃ. KOLOREM SZARYM ZAZNACZONO MARTWĄ STREFĘ WĘZŁA SŁUŻĄCĄ RÓWNOMIERNEJ DYSTRYBUCJI NAPRĘŻEŃ W BRYLE WĘZŁA. 243
GRAFIKA 92.WYNIKI GRAFICZNE ANALIZY MES MODELU WĘZŁA CENTRYCZNEGO. NA LEWEJ GRAFICE PRZEDSTAWIONO WYNIKI ZE SZTUCZNYM OGRANICZENIEM ZAKRESU DO 5KPA, NATOMIAST Z PRAWEJ STRONY PRZEDSTAWIONO NIESKALOWANY WYKRES GRAFICZNY NAPRĘŻEŃ DOCHODZĄCY DO 0,1MPA. 244
GRAFIKA 93.MODEL SAMOFORMUJĄCEGO WĘZŁA O ZNACZNEJ NIEOSIOWOŚCI. MODEL NIE JEST LIMITOWANY LICZBĄ POŁĄCZEŃ WOKÓŁ POJEDYNCZEGO WĘZŁA. 248
GRAFIKA 94.WYNIK ANALIZY MES MODELU TRZYELEMENTOWEJ STRUKTURY SAMOEKSPANDUJĄCEJ. GŁÓWNE NAPRĘŻENIA ZGODNIE Z WYKRESEM ZLOKALIZOWANE SĄ W OTOCZENIU WĘZŁÓW. 249
GRAFIKA 95.KONCEPCJA NAZEWNICTWA ELEMENTÓW STRUKTURY EKSPANDUJĄCEJ PODCZAS WZROSTU. NAZEWNICTWO MA NA CELU OKREŚLENIE SPOSOBU NADZORU NAD WZROSTEM I REDUKCJĄ STRUKTURY. 250

GRAFIKA 96.SCHEMAT PRACY MODYFIKATORÓW POZWALAJĄCEJ NA UNIKNIĘCIE FORM POŚREDNICH PRĘTÓW I MINIMALIZACJĘ LICZBY RĘCZNYCH INTERWENCJI W STRUKTURĘ PODCZAS PROCESU WZROSTU. 251
GRAFIKA 97.KONCEPCJA MODELU SAMOEKSPANDUJĄCEGO STRUKTURY JEDNOPOWŁOKOWEJ Z ELEMENTÓW TELESKOPOWANYCH. 252
GRAFIKA 98.PORÓWNANIE SPOSOBU DZIAŁANIA MODELI RESPONSYWNYCH GEOMETRYCZNIE ORAZ TOPOLOGICZNIE. ZAUWAŻALNE JEST ZNACZNIE ŁATWIEJSZE WYKORZYSTANIE RESPONSYWNOŚCI TOPOLOGICZNEJ ZE WZGLĘDU NA WYKORZYSTANIE PRZESTRZENI WOKÓŁ STRUKTURY. 256
GRAFIKA 99.ZAPROGRAMOWANIE MODELU BADAWCZEGO OPIERAŁO SIĘ NA POŁĄCZENIU SZEREGU POWTARZANYCH MODUŁÓW W JEDNOLITĄ STRUKTURĘ. OSOBNO PROWADZONO BADANIA ZACHOWANIA CAŁEGO MODELU ORAZ POJEDYNCZEGO MODUŁU UWZGLĘDNIAJĄCEGO GEOMETRYCZNĄ ZŁOŻONOŚĆ KONCEPCJI. 260
GRAFIKA 100.PRZEDSTAWIENIE DWÓCH RODZAJÓW MODELI PODDAWANYCH BADANIU EFEKTYWNOŚCI RESPONSYWNOŚCI TOPOLOGICZNEJ. OBA MODELE MAJĄ INNY CHARAKTER REAKCJI NA SIŁY POZIOME ORAZ PIONOWE. 263
GRAFIKA 101. TRZY KOLEJNE UKŁADY SKRATOWAŃ MODELI ZŁOŻONYCH Z MODUŁÓW RESPONSYWNYCH TOPOLOGICZNIE. MODEL "A" JEST BAZOWYM UKŁADEM NIE OPTYMALIZOWANYM POD WZGLĘDEM STRUKTURALNYM. UKŁAD "B" STANOWI PROSTE SKRATOWANIE EFEKTYWNE, POWSZECHNIE STOSOWANE SZCZEGÓLNIE PRZY UŻYCIU CIĘGIEN. MODEL „C” STANOWI PRZYKŁADOWE SKRATOWANIE STEROWANE ALGORYTMEM EWOLUCYJNYM. 265
GRAFIKA 102.GEOMETRIA ZDEFORMOWANEJ OBCIĄŻENIAMI STRUKTURY. ODCHYLENIE OD PIONU LICZONE JEST DLA POZIOMYCH PASM PRĘTÓW KAŻDEGO POZIOMU MODUŁÓW OSOBNO. 269
GRAFIKA 103.PRZEDSTAWIENIE WYNIKÓW WPŁYWU POSZCZEGÓLNYCH ELEMENTÓW NA SZTYWNOŚĆ CAŁKOWITĄ STRUKTURY. WIDOCZNY JEST NAJWIĘKSZY WPŁYW ELEMENTÓW DOLNYCH SEKCJI. 270
GRAFIKA 104.PODZIAŁ MODELU BADAWCZEGO NA ELEMENTY PRZYNALEŻNE KONKRETNYM SEGMENTOM STRUKTURY. NA PODSTAWIE PRZEDSTAWIONEGO PODZIAŁU LICZONO DALEJ ISTOTNOŚĆ UDZIAŁU ELEMENTÓW W CAŁKOWITEJ SZTYWNOŚCI MODELU. 271
GRAFIKA 105.WYNIKI WPŁYWU ELEMENTÓW NA SZTYWNOŚĆ STRUKTURY. ZAKRESY PODANE ZOSTAŁY DLA Q1 ORAZ Q3. 273
GRAFIKA 106. KONCEPCJA MODELU MODUŁU POWTARZALNEGO RESPONSYWNEGO TOPOLOGICZNIE OPRACOWANEGO NA PODSTAWIE TEORII RUCHU OPISANEJ WE STĘPIE BADAŃ. STRUKTURA DZIELI SIĘ NA CZĘŚĆ RUCHOMĄ ORAZ STATYCZNĄ. ZACHOWUJE SZTYWNOŚĆ NAWET PRZY USUNIĘCIU ELEMENTU RUCHOMEGO, LECZ PRZY JEGO UŻYCIU PODNOSI PARAMETRY STATYCZNE STRUKTURY 277
GRAFIKA 107.WYKRES WARTOŚCI DYSKRETNYCH UGIĘĆ ORAZ NAPRĘŻEŃ DLA POSZCZEGÓLNYCH POZYCJI BELKI ŚRODKOWEJ OZNACZONYCH PRZEZ OKREŚLENIE JEJ KĄTA WZGLĘDEM POZYCJI REFERENCYJNEJ DLA POJEDYNCZEGO PRZYPADKU OBCIĄŻENIOWEGO. 278
GRAFIKA 108.PRZYPADEK OBCIĄŻENIOWY DLA KTÓREGO PRZEPROWADZANO BADANIA POZYCJI DYSKRETNYCH. DLA KAŻDEGO PRZYPADKU PRZEPROWADZANO ANALIZĘ Z UŻYCIEM MES I GENEROWANO WYNIKI W POSTACI MAPY NAPRĘŻEŃ. 279
GRAFIKA 109.STREFY WPŁYWU NIEDOKŁADNOŚCI POŁĄCZEŃ NA ROZKŁAD NAPRĘŻEŃ. ZAZNACZONO NA PODSTAWIE WYNIKÓW ZAKRESY POPRAWNE, DOPUSZCZALNE ORAZ NIEPOPRAWNE POZYCJONOWANIA BELKI. ZAKRES POZOSTAJE INDYWIDUALNY DLA ZAMODELOWANEJ GEOMETRII ELEMENTÓW ORAZ CAŁEGO MODUŁU. 280
GRAFIKA 110.MODEL FIZYCZNEJ STRUKTURY ZREALIZOWANEJ POPRZEZ AUTORSKĄ PRACĘ Z WYKORZYSTANIEM DRUKU 3D ORAZ REALIZACJĄ POŁĄCZEŃ ŚRUBOWANYCH MIĘDZY WSZYSTKIMI ELEMENTAMI. 281
GRAFIKA 111. PRZEDSTAWIENIE MODELU MODUŁU RESPONSYWNEGO TOPOLOGICZNIE W 3 KOLEJNYCH FAZACH ROZKŁADANIA. MODEL OPRACOWANO PRZY UŻYCIU OPROGRAMOWANIA AUTODESK INVENTOR PROFESSIONAL 2024 I STANOWI ZAŁĄCZNIK DO PRACY. 289
GRAFIKA 112. SCHEMAT BUDOWY MODELU RESPONSYWNEGO TOPOLOGICZNIE O WYŁĄCZNIE OBROTOWYM CHARAKTERZE PRACY. NIEBIESKIM KOLOREM ZAZNACZONO WĘZŁY STAŁE. WSZYSTKIE POZOSTAŁE STANOWIĄ WĘZŁY WTÓRNE GENEROWANE W WYNIKU ROZKŁADANIA MODELU. 290
GRAFIKA 113. MATRYCA PRZYPADKÓW SZTYWNOŚCI MODUŁU PRZYGOTOWANA NA CELE PROGRAMOWANIA ZACHOWAŃ STRUKTURY PODCZAS SYMULACJI. PROCENTY ODNOSZĄ SIĘ DO

SZEROKOŚCI PRZEKROJU WZGLĘDEM WARTOŚCI REFERENCYJNEJ 20CM. PARAMETR TEN BEZPOŚREDNIO WPŁYWA NA MOMENTY BEZWŁADNOŚCI ORAZ DALEJ WYTRZYMAŁOŚĆ MODUŁU. 292
GRAFIKA 114. WYNIKI ANALIZY MES POJEDYNCZEGO MODUŁU RESPONSYWNEGO TOPOLOGICZNIE. WIDOCZNE SĄ WZROSTY NAPRĘŻEŃ NA ELEMENTACH 3 FAZY ROZKŁADANIA. 293
GRAFIKA 115. PRZYGOTOWANY MODEL SYMULACJI ZACHOWAŃ 4 MODUŁÓW ZŁOŻONYCH Z 8 PÓŁMODUŁÓW. UKŁAD WSPARTY NA 4 NAROŻACH PODDAWANY JEST OBCIĄŻENIOM W KAŻDEJ PŁASZCZYŹNIE, A WYNIK IW CZASIE RZECZYWISTYM PREZENTOWANE SĄ W FORMIE GRAFICZNYCH WYKRESÓW NA MODELU. 296
GRAFIKA 116. ZESTAWIENIE WYNIKOWYCH TOPOLOGII DLA WYBRANYCH PRZYPADKÓW BADAŃ EFEKTYWNOŚCI MODUŁÓW. GRAFIKA "A)" PREZENTUJE MODEL SZTYWNY NIEOPTYMALIZOWANY Z PROSTYM POJEDYNCZYM STĘŻENIEM UKOŚNYM. „B)” ORAZ „C)” PREZENTUJĄ WYNIKI BADAŃ DLA STRUKTURY RESPONSYWNEJ GDZIE KAŻDORAZOWO TOPOLOGIA DOSTOSOWYWANA JEST DO INDYWIDUALNEGO PRZYPADKU OBCIĄŻENIOWEGO. W „D)” PRZEDSTAWIONO EFEKTYWNĄ TOPOLOGIĘ NIEZMIENNĄ DOSTOSOWANĄ JEDNOCZEŚNIE DO WSZYSTKICH 6 PRZYPADKÓW OBCIĄŻENIOWYCH. 298
GRAFIKA 117. PRZEDSTAWIENIE KONCEPCJI STRUKTURY NAWIĄZUJĄCEJ DO ARCHITEKTONICZNYCH OBIEKTÓW WYSOKICH. 301

15. Spis tabel

TABELA 1. ZESTAWIENIE PARAMETRÓW PRACY DLA ALGORYTMU EWOLUCYJNEGO. 60
TABELA 2.WYBRANE WYNIKI BADANIA DOBORU UNIWERSALNYCH PARAMETRÓW SYMULACJI DLA RUCHÓW STRUKTURY RESPONSYWNEJ NAŚLADUJĄCE ZMIANY GEOMETRII MEMBRANY. PEŁNE WYNIKI BADAŃ STANOWIĄ ZAŁĄCZNIK NR 1.A 65
TABELA 3.KOLEJNE PROGI ZMIAN GEOMETRII DLA ROSNĄCEJ LICZBY ITERACJI OBLICZEŃ DYNAMICZNEJ RELAKSACJI. 66
TABELA 4.ZALEŻNOŚĆ EFEKTYWNOŚCI STRUKTURY OPARTEJ NA GEOMETRII UZYSKANEJ PRZEZ MEMBRANĘ OD LICZBY ITERACJI SYMULACJI DYNAMICZNYCH RELAKSACJI. PEŁNE ZESTAWIENIE WYNIKÓW BADAŃ ZNAJDUJE SIĘ W ZAŁĄCZNIKU NR 2 – „ROZDZIAŁ 3 - BADANIA WPŁYWU LICZBY ITERACJI NA EFEKTYWNOŚĆ WYNIKÓW” 67
TABELA 5. WYNIKI BADAŃ EFEKTYWNOŚCI UNIFIKACJI PRZYPADKÓW OBCIĄŻENIOWYCH. PEŁNE ZESTAWIENIE WYNIKÓW ZNAJDUJE SIĘ W ZAŁĄCZNIKU NR 3 - "ROZDZIAŁ 3 - BADANIA WPŁYWU LICZBY ITERACJI NA EFEKTYWNOŚĆ WYNIKÓW" 69
TABELA 6. BILANS OBLICZEŃ SYMULACJI ZAPOTRZEBOWANIA ENERGETYCZNEGO NA RUCH MODELU. PEŁNE ZESTAWIENIE WYNIKÓW STANOWI ZAŁĄCZNIK NR 4.A. 73
TABELA 7. WYNIKI BADANIA WPŁYWU FORMY PODPARĆ STRUKTURY NA SKUTECZNOŚĆ UZYSKIWANIA WYŻSZYCH EFEKTYWNOŚCI STATYCZNYCH POWŁOKI. DLA POSZCZEGÓLNYCH PRZYPADKÓW OBCIĄŻENIOWYCH UŁOŻONYCH KOLUMNAMI ZEBRANO WYNIKOWE NAPRĘŻENIA LICZONE JAKO % WYKORZYSTANIA PRZEKROJU MODELU PODPORY. PEŁNE ZESTAWIENIE WYNIKÓW BADAŃ ZNAJDUJE SIĘ W ZAŁĄCZNIKU „ROZDZIAŁ 5 - BADANIA STRUKTURY STEROWANEJ DYNAMICZNYMI RELAKSACJAMI”. 84
TABELA 8. WARTOŚĆ „X” ODNOSI SIĘ DO ODLEGŁOŚCI PRZEDSTAWIONEJ NA GRAFIKA 25. PEŁNE ZESTAWIENIE WYNIKÓW STANOWI ZAŁĄCZNIK NR 6.D PRACY. 99
TABELA 9. WYNIKI BADAŃ PRZEMIESZCZEŃ PODPÓR DLA 4-PODPOROWEGO MODELU POWŁOKI. PEŁNE ZESTAWIENIE BADAŃ STANOWI ZAŁĄCZNIK NR 6.D PRACY. 100
TABELA 10. ZESTAWIENIE PARAMETRÓW ALGORYTMU EWOLUCYJNEGO NA POTRZEBY SYMULACJI DZIAŁANIA MODYFIKATORÓW. 110
TABELA 11. ZESTAWIENIE WYNIKÓW POMIARÓW DLA STRUKTURY REFERENCYJNEJ ORAZ PRZYPADKU NR 5. PEŁNE ZESTAWIENIE WYNIKÓW STANOWI ZAŁĄCZNIK NR 6.C PRACY. 114
TABELA 12.ZESTAWIENIE PARAMETRÓW BADANIA POZWALAJĄCYCH NA WYRÓWNANIE SZANS UZYSKANIA ISTOTNYCH WYNIKÓW W KAŻDYM Z POMIARÓW. DOBÓR WARTOŚCI POZWALA NIWELOWAĆ ROSNĄCĄ LICZBĘ ROZWIĄZAŃ GEOMETRYCZNYCH DO PRZESZUKANIA PODCZAS KAŻDEJ PRÓBY BADAWCZEJ. 126
TABELA 13.ZESTAWIENIE WYNIKÓW PARAMETRÓW STATYCZNYCH STRUKTURY W ZALEŻNOŚCI OD LICZBY MODYFIKATORÓW SKŁADAJĄCYCH SIĘ NA JEDNOLITY SYSTEM RUCHU. PEŁNE ZESTAWIENIE WYNIKÓW BADAŃ STANOWI ZAŁĄCZNIK NR 6.B PRACY. 128
TABELA 14. WYNIKI BADANIA EFEKTYWNOŚCI UŻYCIA PRECYZYJNIE STEROWANEGO POZYCJONOWANIA SIŁOWNIKÓW MODYFIKATORÓW PUNKTOWYCH. PEŁNE ZESTAWIENIE WYNIKÓW STANOWI ZAŁĄCZNIK NR 6.B PRACY. 132
TABELA 15.WYNIKI BADAŃ REDUKCJI POJEDYNCZYCH PARAMETRÓW DLA KOLEJNYCH PRÓB BADAWCZYCH PODCZAS WYKORZYSTANIA MODYFIKATORÓW STRUKTUR RAMOWYCH. PEŁNE ZESTAWIENIE WYNIKÓW WRAZ Z OPISEM KATEGORII OBCIĄŻEŃ OPISANYCH W TREŚCI STANOWI ZAŁĄCZNIK NR 7.C PRACY. 150
TABELA 16. ZESTAWIENIE WYNIKÓW POMIARÓW WPŁYWU SKALI MODYFIKATORÓW DO STRUKTURY NA PARAMETRY STATYCZNE I GEOMETRYCZNE MODELU. WSZYSTKIE BADANIA ZOSTAŁY PRZEPROWADZONE NA GRUPIE BADAWCZEJ OBCIĄŻEŃ Z WCZEŚNIEJSZYCH ETAPÓW BADAŃ. PEŁNE ZESTAWIENIE WYNIKÓW BADAŃ STANOWI ZAŁĄCZNIK NR 7.D PRACY. 154
TABELA 17.WYNIKI BADAŃ EFEKTYWNOŚCI SYSTEMU MODYFIKATORÓW RAMOWYCH DLA STRUKTURY SZTYWNEJ. DLA KAŻDEGO PARAMETRU INDYWIDUALNIE PRZEPROWADZANO BADANIA. 159
TABELA 18. CZAS LICZONY W SEKUNDACH POTRZEBNY NA UZYSKANIE WYNIKÓW TAKICH SAMYCH LUB WYŻSZYCH PRZY UŻYCIU MODELU HYBRYDOWO-ITERACYJNEGO W PORÓWNANIU DO MODELU STEROWANEGO ALGORYTMEM EWOLUCYJNYCH WYKORZYSTANYM WE WCZEŚNIEJSZYM BADANIU. 169
TABELA 19. WYNIKI BADAŃ DLA RÓŻNYCH PRZYPADKÓW OBCIĄŻENIOWYCH. KAŻDA PRÓBA BADAWCZA UZYSKIWAŁA PRIORYTET NA REDUKCJĘ POJEDYNCZEGO PARAMETRU. 173

TABELA 20.WYNIKI BADANIA WPŁYWU KOSZTU PARAMETRU UGIĘCIA NA STOPIEŃ WYTĘŻENIA ELEMENTÓW STRUKTURY. WARTOŚĆ „...” OZNACZA NIEUZYSKANIE KOŃCOWEJ GEOMETRII. 174
TABELA 21.ZESTAWIENIE WYNIKÓW BADAŃ MODYFIKACJI TRASOWANIA ZMIAN GEOMETRII KRATOWNICY. PODCZAS KAŻDEGO BADANIA PIORYTETYZOWANO PODNIESIENIE EFEKTYWNOŚCI POJEDYNCZEGO PARAMETRU. 216
TABELA 22.ZESTAWIENIE WYNIKÓW ANALIZY EFEKTYWNOŚCI UŻYCIA POSZCZEGÓLNYCH SEKCJI STRUKTURY DO REDUKCJI STRZAŁKI UGIĘCIA MODELU POD WPŁYWEM GRUPY PRZYPADKÓW OBCIĄŻENIOWYCH. WARTOŚĆ „A)” DEFINIUJE PROPORCJĘ WYNIKÓW STRUKTURY RESPONSYWNEJ GÓRNĄ POWŁOKĄ DO STRUKTURY RESPONSYWNEJ DOLNĄ POWŁOKĄ. WARTOŚĆ „B)” PREZENTUJE WYNIKI PROPORCJI STRUKTURY RESPONSYWNEJ OBIEMA POWŁOKAMI DO STRUKTURY RESPONSYWNEJ GÓRNĄ POWŁOKĄ, NATOMIAST WARTOŚĆ „C)” PREZENTUJE PROPORCJĘ EFEKTYWNOŚCI RESPONSYWNOŚCI OBIEMA POWŁOKAMI DO RESPONSYWNOŚCI DOLNĄ POWŁOKĄ. 225
TABELA 23.WYNIKI BADAŃ ZALEŻNOŚCI WARTOŚCI MAKSYMALNYCH DOPUSZCZALNYCH NAPRĘŻEŃ W MODELU OD WIELKOŚCI ŚREDNICY SFERY W KTÓRA WPISANY MOŻE ZOSTAĆ WĘZEŁ. 237
TABELA 24.ZESTAWIENIE WYNIKÓW BADANIA WPŁYWU STOPNIA WYZNACZALNOŚCI STATYCZNEJ MODELU NA JEGO MAKSYMALNE WARTOŚCI DEFORMACJI. 239
TABELA 25. ZESTAWIENIE WYNIKÓW POMIARÓW DLA STRUKTUR PODDAWANYCH ZRÓŻNICOWANYM OBCIĄŻENIOM. KOLEJNE BADANIA OZNACZONO JAKO A-STRUKTURA POZIOMA Z JEDNYM POZIOMEM, B-STRUKTURA POZIOMA Z DWOMA POZIOMAMI, C-STRUKTURA PIONOWA O PODSTAWIE 1X4, D-STRUKTURA PIONOWA O PODSTAWIE 2X4 MODUŁY. 262
TABELA 26.ZESTAWIENIE PRZYPADKÓW OBCIĄŻENIOWYCH NA CELE BADANIA EFEKTYWNOŚCI W RÓŻNYCH PRZYPADKACH STATYCZNYCH ODDZIAŁYWAŃ. WSZYSTKIE OBCIĄŻENIA POSIADAJĄ NIEZEROWĄ SKŁADOWĄ PIONOWĄ ODPOWIADAJĄCĄ ZA ODDZIAŁYWANIE GRAWITACJI. 264
TABELA 27. ZESTAWIENIE WYNIKÓW POMIARÓW ODKSZTAŁCEŃ MODELI POD OBCIĄŻENIEM SIŁAMI ZEWNĘTRZNYMI. DLA KOLEJNYCH 7 PRZYPADKÓW OBCIĄŻENIOWYCH PRZEBADANO 9 WERSJI STRUKTURY WYSOKIEJ. W TABELI ZEBRANO WYNIKI W FORMIE WARTOŚCI FUNKCJI ODKSZTAŁCENIA. NIE REPREZENTUJE ONA RZECZYWISTYCH ODKSZTAŁCEŃ, LECZ REPREZENTUJE W FORMIE BEZWYMIAROWEJ PROPORCJE PRZEMIESZCZEŃ WSZYSTKICH ELEMENTÓW POSZCZEGÓLNYCH STRUKTUR POD ZRÓŻNICOWANYMI OBCIĄŻENIAMI. 266
TABELA 28.ZESTAWIENIE KOLEJNYCH WARTOŚCI OBROTU MODUŁÓW WZGLĘDEM PODŁOŻA PRZY OBCIĄŻENIU MAKSYMALNYM POZIOMYM NA WYSOKĄ STRUKTURĘ O MAŁYM MOMENCIE BEZWŁADNOŚCI. 268
TABELA 29. WYNIKI POMIARÓW UGIĘĆ DLA STRUKTURY UNIWERSALNEJ ORAZ RESPONSYWNEJ W POSZCZEGÓLNYCH PRZYPADKACH OBCIĄŻENIOWYCH. 275
TABELA 30. ZESTAWIENIE PROPORCJI UGIĘĆ STRUKTURY STATYCZNEJ DO RESPONSYWNEJ. ZESTAWIENIE JEST KOMPLEMENTARNE DO TABELA 28. 275
TABELA 31. ZESTAWIENIE WYNIKÓW UGIĘĆ DLA 6 PRZYPADKÓW OBCIĄŻENIOWYCH GEOMETRII W 3 WERSJACH GEOMETRII MODELU. KOLEJNE WIERSZE REPREZENTUJĄ CORAZ BARDZIEJ EFEKTYWNE STRUKTURY SPOŚRÓD KTÓRYCH NAJEFEKTYWNIEJSZE SĄ MODELE RESPONSYWNE. WYNIKI UZASADNIAJĄ DALSZE BADANIA RESPONSYWNOŚCI TOPOLOGICZNEJ. 297

16. Bibliografia

[1] B. R. Fuller and R. B. Fuller, *Utopia or oblivion: the prospects for humanity*. 1969.

[2] D. William Begg and X. Liu, “On simultaneous optimization of smart structures - Part II: Algorithms and examples,” *Comput Methods Appl Mech Eng*, vol. 184, no. 1, 2000, doi: 10.1016/S0045-7825(99)00317-5.

[3] J. Eves, “Methods for designing the next generation of aircraft architectures using topology optimisation,” *Mechanical Engineering*, no. September, 2010.

[4] Q. Zhou, W. Shen, J. Wang, Y. Y. Zhou, and Y. M. Xie, “Ameba: A new topology optimization tool for architectural design,” *Proceedings of IASS Annual Symposia*, no. November, 2018.

[5] A. Ballantyne, “Archigram: Architecture without Architecture,” *Journal of Architectural Education*, vol. 59, no. 3, 2006, doi: 10.1111/j.1531-314x.2006.00038.x.

[6] V. Menchetelli, “A Walking City by Archigram Group: on the Utopian Dimension of Drawing,” *Disegno*, vol. 2021, no. 9, 2021, doi: 10.26375/disegno.9.2021.4.

[7] H. Y. Chu, “The Evolution of the Fuller Geodesic Dome: From Black Mountain to Drop City,” *Design and Culture*, vol. 10, no. 2, 2018, doi: 10.1080/17547075.2018.1466228.

[8] E. A. Robinson and N. Wiener, “Cybernetics, or Control and Communication in the Animal and the Machine,” *Technometrics*, vol. 5, no. 1, 1963, doi: 10.2307/1266498.

[9] F. Maden, E. Aktaş, and K. Korkmaz, “A novel transformable structural mechanism for doubly ruled hypar surfaces,” *Journal of Mechanical Design*, vol. 137, no. 3, 2015, doi: 10.1115/1.4029231.

[10] F. Maden, K. Korkmaz, and Y. Akgün, “A review of planar scissor structural mechanisms: Geometric principles and design methods,” 2011. doi: 10.1080/00038628.2011.590054.

[11] S. Mathews, “The Fun Palace: Cedric Price’s experiment in architecture and technology,” *Technoetic Arts*, vol. 3, no. 2, 2005, doi: 10.1386/tear.3.2.73/1.

[12] Y. Hou, “CAN ARCHITECTURE BE CYBERNETIC MACHINE: From Cedric Price’s Fun Palace to the Pompidou Centre,” in *Proceedings of the International Conference on Computer-Aided Architectural Design Research in Asia*, 2023. doi: 10.52842/conf.caadria.2023.2.501.

[13] M. Aragüez, “Building Calculated Uncertainty: Cedric Price’s Interaction Centre,” *arq: Architectural Research Quarterly*, vol. 25, no. 2, 2021, doi: 10.1017/S1359135521000233.

[14] M. Meagher, “Responsive architecture and the problem of obsolescence,” *Archnet-IJAR: International Journal of Architectural Research*, vol. 8, no. 3, 2014, doi: 10.26687/archnet-ijar.v8i3.498.

[15] D. Bluestone, “Review: How Buildings Learn: What Happens after They’re Built by Stewart Brand,” *Journal of the Society of Architectural Historians*, vol. 54, no. 2, 1995, doi: 10.2307/990971.

[16] A. Elmokadem, M. Ekram, A. Waseef, and B. Nashaat, “Kinetic Architecture: Concepts, History and Applications,” *International Journal of Science and Research (IJSR)* , vol. 7, no. 4, 2018.

[17] H. Dicks, “The Philosophy of Biomimicry,” *Philos Technol*, vol. 29, no. 3, 2016, doi: 10.1007/s13347-015-0210-2.

[18] R. L. Ripley and B. Bhushan, “Bioarchitecture: Bioinspired art and architecture-a perspective,” 2016. doi: 10.1098/rsta.2016.0192.

[19] Z. William and C. Roger, *Kinetic Architecture*. VanNostrandReinholdCompany, 1970.

[20] N. Negroponte, *The architecture machine: toward a more human environment / Nicholas Negroponte*. 1970.

[21] N. Negroponte, *The Architecture Machine: Toward a More Human Environment*. 1973.

[22] N. Negroponte, *Soft Architecture Machines*. 1976. doi: 10.7551/mitpress/6317.001.0001.

[23] I. Hargittai, A. C. Edmondson, and L. S. Sieden, “A Fuller Explanation: The Synergetic Geometry of R. Buckminster Fuller,” *Leonardo*, vol. 24, no. 1, 1991, doi: 10.2307/1575493.

[24] M. Lom and O. Pribyl, “Smart city model based on systems theory,” *Int J Inf Manage*, vol. 56, 2021, doi: 10.1016/j.ijinfomgt.2020.102092.

[25] M. W. Steenson, “Microworld and mesoscale,” 2015. doi: 10.1145/2786024.

[26] M.I.T., “CyberneticZOO.com.”

[27] K. Shariati, A. S. Ling, S. Fuchs, B. Dillenburger, W. Liu, and M. Ma, “Hylozoic by Design: Converging Material and Biological Complexities for Cell-Driven Living Materials with 4D Behaviors,” 2022. doi: 10.1002/adfm.202108057.

[28] P. Beesley and R. Armstrong, “Soil and protoplasm: The Hylozoic Ground project,” 2011. doi: 10.1002/ad.1215.

[29] A. C. García-Luna Romero and J. A. Flores Leal, “Responsive Architecture: New paradigms of urban relations,” *SHS Web of Conferences*, vol. 139, 2022, doi: 10.1051/shsconf/202213901005.

[30] P. Beesley, S. Hirosue, and J. Ruxton, “Toward responsive architectures,” in *Responsive Architectures: Subtle Technologies*, 2006.

[31] J. H. Lee, M. J. Ostwald, and A. M. J. Kim, “Characterizing smart environments as interactive and collective platforms: A review of the key behaviors of responsive architecture,” 2021. doi: 10.3390/s21103417.

[32] D. Rodriguez, “Transformative Architecture Through Kinetic Mechanisms,” 2022.

[33] K. Shea and I. Smith, “Intelligent structures: A new direction in structural control,” 1998. doi: 10.1007/bfb0030465.

[34] W. M. Kroner, “An intelligent and responsive architecture,” *Autom Constr*, vol. 6, no. 5–6, 1997, doi: 10.1016/S0926-5805(97)00017-4.

[35] C. Ayyildiz *et al.*, “Structure health monitoring using wireless sensor networks on structural elements,” *Ad Hoc Networks*, vol. 82, 2019, doi: 10.1016/j.adhoc.2018.06.011.

[36] R. Measures, and S. Abrate, “Structural Monitoring with Fiber Optic Technology,” *Appl Mech Rev*, vol. 55, no. 1, 2002, doi: 10.1115/1.1445327.

[37] H. Malik and W. Zatar, “Agent based routing approach to support structural health monitoring-informed, intelligent transportation system,” *J Ambient Intell Humaniz Comput*, vol. 11, no. 3, 2020, doi: 10.1007/s12652-019-01202-8.

[38] Y. Chen *et al.*, “Dynamic Characteristics of TAIPEI 101 Skyscraper from Rotational and Translation Seismometers,” *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 113, no. 2, 2023, doi: 10.1785/0120220147.

[39] Q. S. Li, L.-H. Zhi, A. Y. Tuan, C.-S. Kao, S.-C. Su, and C.-F. Wu, “Dynamic Behavior of Taipei 101 Tower: Field Measurement and Numerical Analysis,” *Journal of Structural Engineering*, vol. 137, no. 1, 2011, doi: 10.1061/(asce)st.1943-541x.0000264.

[40] T. d’Estree Sterk, “Responsive Architecture: User-Centered Interactions within the Hybridized Model of Control,” *Proceedings Of The Game Set And Match II, On Computer Games, Advanced Geometries, and Digital Technologies, Netherlands: Episode Publishers*, 2006.

[41] K. Korkmaz and C. Arkon., “An analytical study of the design potentials in kinetic architecture,” 2004.

[42] “Application of Adaptive Structures Concepts to Civil Structures,” in *Intelligent Structures - 2*, 2020. doi: 10.1201/9781482286762-15.

[43] M. del M. Corral and L. Todisco, “Structural design of responsive under-deck cable-stayed footbridges,” *Structures*, vol. 41, 2022, doi: 10.1016/j.istruc.2022.05.077.

[44] K. Shea, E. Fest, and I. F. C. Smith, “Developing intelligent tensegrity structures with stochastic search,” *Advanced Engineering Informatics*, vol. 16, no. 1, 2002, doi: 10.1016/S1474-0346(02)00003-4.

[45] S. Korkmaz, “A review of active structural control: Challenges for engineering informatics,” 2011. doi: 10.1016/j.compstruc.2011.07.010.

[46] T. T. Soong and B. F. Spencer, “Active, semi-active and hybrid control of structures,” *Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering*, vol. 33, no. 3, 2000, doi: 10.5459/bnzsee.33.3.387-402.

[47] “Kinetic Facades the new Paradigm Shift in Architecture toward an Environmental Design Performance,” *Journal of Arts, Literature, Humanities and Social Sciences*, vol. 43, 2019, doi: 10.33193/jalhss.43.29.

[48] Y. O. Elkhayat, “INTERACTIVE MOVEMENT IN KINETIC ARCHITECTURE,” *JES. Journal of Engineering Sciences*, vol. 42, no. 3, 2014, doi: 10.21608/jesaun.2014.115027.

[49] N. A. Megahed, “Understanding kinetic architecture: typology, classification, and design strategy,” *Architectural Engineering and Design Management*, vol. 13, no. 2, 2017, doi: 10.1080/17452007.2016.1203676.

[50] M. Fox and M. Kemp, “Interactive Architecture: Adaptive World,” *Architectural Design*, no. Novak, 2009.

[51] M. del M. Corral, L. Todisco, and H. Corres, “Preliminary Study on the Design of Structures with a Responsive External Post-tensioning System,” *Structural Engineering International*, vol. 31, no. 3, 2021, doi: 10.1080/10168664.2020.1787806.

[52] R. Hann, “Blurred Architecture: Duration and performance in the work of Diller Scofidio + Renfro,” *Perform Res*, vol. 17, no. 5, 2012, doi: 10.1080/13528165.2012.728434.

[53] S. Neuhaeuser, M. Weickgenannt, C. Witte, W. Haase, O. Sawodny, and W. Sobek, “Stuttgart smartshell - A full scale prototype of an adaptive shell structure,” *Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures*, vol. 54, no. 178, 2013.

[54] B. Adam and I. F. C. Smith, “Active tensegrity: A control framework for an adaptive civil-engineering structure,” *Comput Struct*, vol. 86, no. 23–24, 2008, doi: 10.1016/j.compstruc.2008.05.006.

[55] J. T. P. Yao, “CONCEPT OF STRUCTURAL CONTROL.,” *ASCE J Struct Div*, vol. 98, no. ST7, 1972, doi: 10.1061/jsdeag.0003280.

[56] G. W. Housner *et al.*, “Structural Control: Past, Present, and Future,” *J Eng Mech*, vol. 123, no. 9, 1997, doi: 10.1061/(asce)0733-9399(1997)123:9(897).

[57] T. E. Saaed, G. Nikolakopoulos, J. E. Jonasson, and H. Hedlund, “A state-of-the-art review of structural control systems,” 2015. doi: 10.1177/1077546313478294.

[58] Richard Buckminster Fuller, “Tensile-integrity Structures,” 3063521, Nov. 13, 1962

[59] E. Fest, K. Shea, B. Domer, and I. F. C. Smith, “Adjustable Tensegrity Structures,” *Journal of Structural Engineering*, vol. 129, no. 4, 2003, doi: 10.1061/(asce)0733-9445(2003)129:4(515).

[60] S. Neuhauser, “Untersuchungen zur Homogenisierung von Spannungsfeldern bei adaptiven Schalentragwerken mittels Auflagerverschiebung,” Universität Stuttgart, Stuttgart, 2014.

[61] M. Weickgenannt, S. Neuhaeuser, B. Henke, W. Sobek, and O. Sawodny, “Optimal sensor placement for state estimation of a thin double-curved shell structure,” *Mechatronics*, vol. 23, no. 3, 2013, doi: 10.1016/j.mechatronics.2013.01.009.

[62] D. M. A. Huiskes, A. Keulen, Q. L. Yu, and H. J. H. Brouwers, “Design and performance evaluation of ultra-lightweight geopolymer concrete,” *Mater Des*, vol. 89, 2016, doi: 10.1016/j.matdes.2015.09.167.

[63] R. Jirasek, T. Schauer, and A. Bleicher, “Linear parameter-varying output-feedback for active vibration control of an elastic kinetic roof structure with experimental validation,” *Eng Struct*, vol. 307, 2024, doi: 10.1016/j.engstruct.2024.117887.

[64] A. P. Reksowardojo, G. Senatore, A. Srivastava, C. Carroll, and I. F. C. Smith, “Design and testing of a low-energy and -carbon prototype structure that adapts to loading through shape morphing,” *Int J Solids Struct*, vol. 252, 2022, doi: 10.1016/j.ijsolstr.2022.111629.

[65] F. Virgili, G. Senatore, and L. Blandini, “BENCHMARK OF OPTIMIZATION STRATEGIES FOR ACTUATOR PLACEMENT IN ADAPTIVE STRUCTURES,” 2023. doi: 10.7712/150123.9824.450888.

[66] G. Senatore, P. Duffour, and P. Winslow, “Exploring the application domain of adaptive structures,” *Eng Struct*, vol. 167, 2018, doi: 10.1016/j.engstruct.2018.03.057.

[67] A. P. Reksowardojo, G. Senatore, and I. F. C. Smith, “Large and reversible shape changes as a strategy for structural adaptation,” *Proceedings of the IASS Annual Symposium*, 2017.

[68] A. P. Reksowardojo, G. Senatore, A. Srivastava, I. F. C. Smith, H. Unterreiner, and C. Carroll, “Design and control of a prototype structure that adapts to loading through large shape changes,” in *IFAC-PapersOnLine*, 2020. doi: 10.1016/j.ifacol.2020.12.1596.

[69] Y. Wang and G. Senatore, “Minimum energy adaptive structures – All-In-One problem formulation,” *Comput Struct*, vol. 236, 2020, doi: 10.1016/j.compstruc.2020.106266.

[70] G. Senatore, P. Duffour, and P. Winslow, “Synthesis of minimum energy adaptive structures,” *Structural and Multidisciplinary Optimization*, vol. 60, no. 3, 2019, doi: 10.1007/s00158-019-02224-8.

[71] G. Senatore, P. Duffour, P. Winslow, and C. Wise, “Shape control and whole-life energy assessment of an ‘infinitely stiff’ prototype adaptive structure,” *Smart Mater Struct*, vol. 27, no. 1, 2018, doi: 10.1088/1361-665X/aa8cb8.

[72] A. Trautwein, T. Prokosch, and M. Bischoff, “A CASE STUDY ON TAILORING STIFFNESS FOR THE DESIGN OF ADAPTIVE RIB-STIFFENED SLABS,” 2023. doi: 10.7712/150123.9821.444802.

[73] A. P. Reksowardojo, G. Senatore, M. Bischoff, and L. Blandini, “Design and Control Benchmark of Rib-Stiffened Concrete Slabs Equipped with an Adaptive Tensioning System,” *Journal of Structural Engineering*, vol. 150, no. 1, 2024, doi: 10.1061/jsendh.steng-12320.

[74] A. Trautwein, T. Prokosch, G. Senatore, L. Blandini, and M. Bischoff, “Analytical and numerical case studies on tailoring stiffness for the design of structures with displacement control,” *Front Built Environ*, vol. 9, 2023, doi: 10.3389/fbuil.2023.1135117.

[75] L. Blandini *et al.*, “D1244: Design and Construction of the First Adaptive High-Rise Experimental Building,” *Front Built Environ*, vol. 8, 2022, doi: 10.3389/fbuil.2022.814911.

[76] M. M. Singh and P. Geyer, “Information requirements for multi-level-of-development BIM using sensitivity analysis for energy performance,” *Advanced Engineering Informatics*, vol. 43, 2020, doi: 10.1016/j.aei.2019.101026.

[77] R. 305/2011 EU, “EN 1991-1-1: Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-1 : General rules and rules for buildings,” *British Standards Institution*, vol. 1, no. 2004, 1992.

[78] Eurocode - BS EN and W. Schwind, “BS EN 1991-1-1-1: Eurocode 1 - Actions on structures - Part 1-1: General actions - Densities, self-weight, imposed loads for buildings,” *Bauingenieur*, vol. 86, no. JULY-AUGUST, 2011.

[79] A. Zeller *et al.*, “Bridge State and Average Train Axle Mass Estimation for Adaptive Railway Bridges,” *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 28, no. 4, 2023, doi: 10.1109/TMECH.2023.3277317.

[80] R. J. T. Van Bommel, A. P. H. W. Habraken, and P. Teuffel, “Adaptive Arch: Active Stress Minimization in a Thin Arch Structure,” in *Procedia Engineering*, 2016. doi: 10.1016/j.proeng.2016.08.028.

[81] W. Sobek, “Essay: The Future of sustainable architecture: Ressources, recyclability and ultra-lightweight,” *A + U-Architecture and Urbanism*, no. 524, 2014.

[82] F. Schlegl *et al.*, “Integration of LCA in the planning phases of adaptive buildings,” *Sustainability (Switzerland)*, vol. 11, no. 16, 2019, doi: 10.3390/su11164299.

[83] A. P. Reksowardojo, G. Senatore, and I. F. C. Smith, “Experimental testing of a small-scale truss beam that adapts to loads through large shape changes,” *Front Built Environ*, vol. 5, 2019, doi: 10.3389/fbuil.2019.00093.

[84] Y. Shen, H. Cheng, P. Yang, and Y. Luo, “A static control algorithm for adaptive beam string structures based on minimal displacement,” *Math Probl Eng*, vol. 2013, 2013, doi: 10.1155/2013/713768.

[85] F. Geiger, J. Gade, M. von Scheven, and M. Bischoff, “Optimal design of adaptive structures vs. optimal adaption of structural design,” in *IFAC-PapersOnLine*, 2020. doi: 10.1016/j.ifacol.2020.12.1604.

[86] S. Steffen, S. Weidner, L. Blandini, and W. Sobek, “Using Influence Matrices as a Design and Analysis Tool for Adaptive Truss and Beam Structures,” *Front Built Environ*, vol. 6, 2020, doi: 10.3389/fbuil.2020.00083.

[87] G. Senatore, P. Duffour, and P. Winslow, “Energy and Cost Assessment of Adaptive Structures: Case Studies,” *Journal of Structural Engineering*, vol. 144, no. 8, 2018, doi: 10.1061/(asce)st.1943-541x.0002075.

[88] A. Saleh and H. Adeli, “Robust Parallel Algorithms for Solution of Riccati Equation,” *J Aerosp Eng*, vol. 10, no. 3, 1997, doi: 10.1061/(asce)0893-1321(1997)10:3(126).

[89] A. P. Reksowardojo, G. Senatore, and I. F. C. Smith, “Actuator layout optimization for adaptive structures performing large shape changes,” in *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 2018. doi: 10.1007/978-3-319-91638-5_6.

[90] Y. Wang, X. Xu, and Y. Luo, “Minimal mass design of active tensegrity structures,” *Eng Struct*, vol. 234, 2021, doi: 10.1016/j.engstruct.2021.111965.

[91] J. Holnicki-Szulc, J. Motylewski, and P. Kołakowski, “Introduction to Smart Technologies,” 2008. doi: 10.1002/9780470758595.ch1.

[92] D. Efinger, A. Ostertag, M. Dazer, D. Borschewski, S. Albrecht, and B. Bertsche, “Reliability as a Key Driver for a Sustainable Design of Adaptive Load-Bearing Structures,” *Sustainability (Switzerland)*, vol. 14, no. 2, 2022, doi: 10.3390/su14020895.

[93] G. Senatore and A. P. Reksowardojo, “Force and Shape Control Strategies for Minimum Energy Adaptive Structures,” *Front Built Environ*, vol. 6, 2020, doi: 10.3389/fbuil.2020.00105.

[94] R. Sachse and M. Bischoff, “A variational formulation for motion design of adaptive compliant structures,” *Int J Numer Methods Eng*, vol. 122, no. 4, 2021, doi: 10.1002/nme.6570.

[95] R. Sachse, F. Geiger, M. von Scheven, and M. Bischoff, “Motion Design with Efficient Actuator Placement for Adaptive Structures that Perform Large Deformations,” *Front Built Environ*, vol. 7, 2021, doi: 10.3389/fbuil.2021.545962.

[96] J. L. Wagner *et al.*, “Optimal Static Load Compensation With Fault Tolerance in Nonlinear Adaptive Structures Under Input and State Constraints,” *Front Built Environ*, vol. 6, 2020, doi: 10.3389/fbuil.2020.00093.

[97] Z. Žagar and D. Delić, “Intelligent Computer Integrated Structures,” *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, vol. 8, no. 1, 1993, doi: 10.1111/j.1467-8667.1993.tb00192.x.

[98] B. F. Spencer and M. K. Sain, “Controlling Buildings: A New Frontier in Feedback,” *IEEE Control Syst*, vol. 17, no. 6, 1997, doi: 10.1109/37.642972.

[99] A. Warsewa *et al.*, “Self-tuning state estimation for adaptive truss structures using strain gauges and camera-based position measurements,” *Mech Syst Signal Process*, vol. 143, 2020, doi: 10.1016/j.ymssp.2020.106822.

[100] Y. Blikharskyy, N. Kopiika, R. Khmil, J. Selejdak, and Z. Blikharskyy, “Review of Development and Application of Digital Image Correlation Method for Study of Stress–Strain State of RC Structures,” 2022. doi: 10.3390/app121910157.

[101] M. A. Sutton and F. Hild, “Recent Advances and Perspectives in Digital Image Correlation,” *Exp Mech*, vol. 55, no. 1, 2015, doi: 10.1007/s11340-015-9991-6.

[102] A. Danisi, A. Masi, R. Losito, M. Martino, and G. Spiezia, “Study of magnetic interference on an LVDT: FEM modeling and experimental measurements,” *J Sens*, vol. 2011, 2011, doi: 10.1155/2011/529454.

[103] S. T. Wu, S. C. Mo, and B. S. Wu, “An LVDT-based self-actuating displacement transducer,” *Sens Actuators A Phys*, vol. 141, no. 2, 2008, doi: 10.1016/j.sna.2007.10.027.

[104] H. Zhang, J. Lu, P. Gong, and N. Li, “Mechanical properties and shape-control abilities of a cable dome under asymmetrical loads,” *J Constr Steel Res*, vol. 208, 2023, doi: 10.1016/j.jcsr.2023.108021.

[105] M. Heidingsfeld, P. Rapp, M. Bohm, and O. Sawodny, “Gramian-based actuator placement with spillover reduction for active damping of adaptive structures,” in *IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, AIM*, 2017. doi: 10.1109/AIM.2017.8014133.

[106] T. d’Estrée Sterk, “Using Actuated Tensegrity Structures to Produce a Responsive Architecture,” in *Proceedings of the 23th Annual Conference of the Association for Computer-Aided Design in Architecture (ACADIA)*, 2022. doi: 10.52842/conf.acadia.2003.085.

[107] S. Kmet, V. Urban, M. Tomko, and R. Soltys, “Analysis of an adaptive tensegrity module,” in *IASS Symposium 2019 - 60th Anniversary Symposium of the International Association for Shell and Spatial Structures; Structural Membranes 2019 - 9th International Conference on Textile Composites and Inflatable Structures, FORM and FORCE*, 2019.

[108] A. P. Reksowardojo and G. Senatore, “A proof of equivalence of two force methods for active structural control,” *Mech Res Commun*, vol. 103, 2020, doi: 10.1016/j.mechrescom.2019.103465.

[109] G. Senatore and Y. Wang, “Topology Optimization of Adaptive Structures: New Limits of Material Economy,” *Comput Methods Appl Mech Eng*, vol. 422, 2024, doi: 10.1016/j.cma.2023.116710.

[110] A. Holstov, G. Farmer, and B. Bridgens, “Sustainable materialisation of responsive architecture,” *Sustainability (Switzerland)*, vol. 9, no. 3, 2017, doi: 10.3390/su9030435.

[111] K. S. Park and H. M. Koh, “Preference-based optimum design of an integrated structural control system using genetic algorithms,” *Advances in Engineering Software*, vol. 35, no. 2, 2004, doi: 10.1016/j.advengsoft.2003.10.004.

[112] M. C. Phocas, “Interdisciplinary Research-based Design: the Case of a kinetic form-active Tensile Membrane,” *Journal of Architectural Engineering Technology*, vol. 01, no. 02, 2012, doi: 10.4172/2168-9717.1000104.

[113] F. A. dos Santos and C. Cismaşiu, “Adaptive underslung beam using shape-memory alloys for frequency-tuning,” *J Intell Mater Syst Struct*, vol. 28, no. 10, 2017, doi: 10.1177/1045389X16667558.

[114] A. Bleicher, M. Schlaich, Y. Fujino, and T. Schauer, “Model-based design and experimental validation of active vibration control for a stress ribbon bridge using pneumatic muscle actuators,” *Eng Struct*, vol. 33, no. 8, 2011, doi: 10.1016/j.engstruct.2011.02.035.

[115] M. Abdel-Rohman and H. H. Leipholz, “Active Control of Tall Buildings,” *Journal of Structural Engineering*, vol. 109, no. 3, 1983, doi: 10.1061/(asce)0733-9445(1983)109:3(628).

[116] M. H. El Ouni and N. Ben Kahla, “Active tendon control of a Geiger dome,” *JVC/Journal of Vibration and Control*, vol. 20, no. 2, 2014, doi: 10.1177/1077546312458944.

[117] R. Stanway, “Vibration Control of Active Structures — An Introduction,” *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering*, vol. 218, no. 3, 2004, doi: 10.1177/095965180421800308.

[118] T. T. Soong and G. P. Cimellaro, “Future directions in structural control,” *Struct Control Health Monit*, vol. 16, no. 1, 2009, doi: 10.1002/stc.291.

[119] D. Zappetti, S. Mintchev, J. Shintake, and D. Floreano, “Bio-inspired Tensegrity Soft Modular Robots,” in *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 2017. doi: 10.1007/978-3-319-63537-8_42.

[120] B. W. Wah and T. Wang, “Constrained simulated annealing with applications in nonlinear continuous constrained global optimization,” in *Proceedings of the International Conference on Tools with Artificial Intelligence*, 1999. doi: 10.1109/tai.1999.809827.

[121] A. Meyboom, G. Johnson, and J. Wojtowicz, “Architectronics: Towards a responsive environment,” in *International Journal of Architectural Computing*, 2011. doi: 10.1260/1478-0771.9.1.77.

[122] K. M. Al-Obaidi, M. Azzam Ismail, H. Hussein, and A. M. Abdul Rahman, “Biomimetic building skins: An adaptive approach,” 2017. doi: 10.1016/j.rser.2017.05.028.

[123] A. Menges and S. Reichert, “Performative wood: Physically programming the responsive architecture of the HygroScope and HygroSkin projects,” *Architectural Design*, vol. 85, no. 5, 2015, doi: 10.1002/ad.1956.

[124] C. Kelleter, T. Burghardt, H. Binz, L. Blandini, and W. Sobek, “Adaptive Concrete Beams Equipped With Integrated Fluidic Actuators,” *Front Built Environ*, vol. 6, 2020, doi: 10.3389/fbuil.2020.00091.

[125] A. P. Reksowardojo and G. Senatore, “Design of ultra-lightweight and energy-efficient civil structures through shape morphing,” *Comput Struct*, vol. 289, 2023, doi: 10.1016/j.compstruc.2023.107149.

[126] A. Gienger, A. Ostertag, M. Böhm, B. Bertsche, O. Sawodny, and C. Tarín, “Data-based Distributed Fault Diagnosis for Adaptive Structures using Convolutional Neural Networks,” *Unmanned Systems*, vol. 8, no. 3, 2020, doi: 10.1142/S2301385020500156.

[127] R. T. Skelton and C. Sultan, “<title>Controllable tensegrity: a new class of smart structures</title>,” in *Smart Structures and Materials 1997: Mathematics and Control in Smart Structures*, 1997. doi: 10.1117/12.276535.

[128] L. Kabošová, E. Kormaníková, S. Kmeť, and D. Katunský, “Shape-changing tensegrity-membrane building skin,” *MATEC Web of Conferences*, vol. 310, 2020, doi: 10.1051/matecconf/202031000046.

[129] Z. Y. İlerisoy and M. Pekdemir Başeğmez, “Conceptual Research of Movement in Kinetic Architecture,” *Gazi University Journal of Science* , vol. 31, no. 2, 2018.

[130] S. Joshi, “Linear Variable Differential Transducer (LVDT) & Its Applications in Civil Engineering,” *International Journal of Transportation Engineering and Technology*, vol. 3, no. 4, 2017, doi: 10.11648/j.ijtet.20170304.13.

[131] M. A. Fox and B. P. Yeh, “Intelligent Kinetic Systems in Architecture,” in *Managing Interactions in Smart Environments*, 2000. doi: 10.1007/978-1-4471-0743-9_9.

[132] T. D. E. Sterk, “Building upon Negroponte: a hybridized model of control suitable for responsive architecture,” *Autom Constr*, vol. 14, no. 2, pp. 225–232, Mar. 2005, doi: 10.1016/J.AUTCON.2004.07.003.

[133] A. E. Del Grosso and P. Basso, “Adaptive building skin structures,” *Smart Mater Struct*, vol. 19, no. 12, 2010, doi: 10.1088/0964-1726/19/12/124011.

[134] N. Bel Hadj Ali, L. Rhode-Barbarigos, A. A. Pascual Albi, and I. F. C. Smith, “Design optimization and dynamic analysis of a tensegrity-based footbridge,” *Eng Struct*, vol. 32, no. 11, 2010, doi: 10.1016/j.engstruct.2010.08.009.

[135] C. M. Tam and C. F. Fang, “Comparative cost analysis of using high-performance concrete in tall building construction by artificial neural networks,” *ACI Struct J*, vol. 96, no. 6, 1999, doi: 10.14359/767.

[136] D. Mavrokapnidis, C. C. Mitropoulou, and N. D. Lagaros, “Environmental assessment of cost optimized structural systems in tall buildings,” *Journal of Building Engineering*, vol. 24, 2019, doi: 10.1016/j.jobe.2019.100730.

[137] L. F. Campanile, “Initial thoughts on weight penalty effects in shape-adaptable systems,” 2005. doi: 10.1177/1045389X05046692.

[138] M. Bohm, J. Wagner, S. Steffen, W. Sobek, and O. Sawodny, “Homogenizability of element utilization in adaptive structures,” in *IEEE International Conference on Automation Science and Engineering*, 2019. doi: 10.1109/COASE.2019.8843066.

[139] S. Jankowski and W. Bober, “Modeling the responsive structures under external forces using an evolutionary algorithm,” *BULLETIN OF THE POLISH ACADEMY OF SCIENCES TECHNICAL SCIENCES*, 2025.

[140] J. Gade, F. Geiger, R. Kemmler, and M. Bischoff, “A form-finding method for adaptive truss structures subject to multiple static load cases,” 2024. doi: 10.1177/09560599231212707.

[141] S. Yuan and B. Yang, “The fixed nodal position method for form finding of high-precision lightweight truss structures,” *Int J Solids Struct*, vol. 161, 2019, doi: 10.1016/j.ijsolstr.2018.11.011.

[142] A. Ostertag, T. N. Toader, B. Bertsche, and W. Sobek, “System-safety in the application of adaptive load-bearing structures,” in *Proceedings - Annual Reliability and Maintainability Symposium*, 2019. doi: 10.1109/RAMS.2019.8769000.

[143] R. Graefe, “Frei Otto - Architecture and civil engineering,” *Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures*, vol. 59, no. 1, 2018, doi: 10.20898/j.iass.2018.195.906.

[144] M. R. Barnes, “Form finding and analysis of tension structures by dynamic relaxation,” *International Journal of Space Structures*, vol. 14, no. 2, 1999, doi: 10.1260/0266351991494722.

[145] H. Assimi, A. Jamali, and N. Nariman-zadeh, “Sizing and topology optimization of truss structures using genetic programming,” *Swarm Evol Comput*, vol. 37, 2017, doi: 10.1016/j.swevo.2017.05.009.

[146] J. J. Joo, B. Sanders, and G. Washington, “Energy based efficiency of adaptive structure systems,” *Smart Mater Struct*, vol. 15, no. 1, 2006, doi: 10.1088/0964-1726/15/1/046.

[147] Lucanto Domenico and Nava Consuelo, “The prototypologycal design of the green responsive system. Method and tools to improve circularity and physical performances

of the liminal space in the Mediterranean urban areas," *Renew. Energy Environ. Sustain.*, vol. 9, p. 8, 2024, doi: 10.1051/rees/2024002.

[148] Q. Tushar, M. A. Bhuiyan, G. Zhang, and T. Maqsood, "An integrated approach of BIM-enabled LCA and energy simulation: The optimized solution towards sustainable development," *J Clean Prod*, vol. 289, 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.125622.

[149] O. Rodriguez-Hernandez, O. A. Jaramillo, J. A. Andaverde, and J. A. del Río, "Analysis about sampling, uncertainties and selection of a reliable probabilistic model of wind speed data used on resource assessment," *Renew Energy*, vol. 50, 2013, doi: 10.1016/j.renene.2012.06.004.

[150] J. Chilton, "Obituary: Mamoru Kawaguchi (1932–2019)," *International Journal of Space Structures*, vol. 35, no. 1–2, 2020, doi: 10.1177/0956059920909924.

[151] J. Y. Chi and R. M. O. Pauletti, "An outline of the evolution of pneumatic structures," *Paper presented at the II Simposio Latinoameric ano de Tensoestructuras*, 2005.

[152] A. P. Reksowardojo, G. Senatore, M. Bischoff, and L. Blandini, "Design and control of high-speed railway bridges equipped with an under-deck adaptive tensioning system," *J Sound Vib*, vol. 579, 2024, doi: 10.1016/j.jsv.2024.118362.

[153] S. Neuhäuser, "Untersuchungen zur Homogenisierung von Spannungsfeldern bei adaptiven Schalentragwerken mittels Auflagerverschiebung," Universität Stuttgart, Stuttgart, 2014.

[154] H. Bösiger, "The building of Isler shells," *Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures*, vol. 52, no. 169, 2011.

[155] D. Geiger, "1970- Expo U.S. Pavilion - ASCE."

[156] R. Dörrie *et al.*, "Automated force-flow-oriented reinforcement integration for Shotcrete 3D Printing," *Autom Constr*, vol. 155, 2023, doi: 10.1016/j.autcon.2023.105075.

[157] J. Tomlow, "Designing and constructing the Olympic roof (Munich 1972)," *International Journal of Space Structures*, vol. 31, no. 1, 2016, doi: 10.1177/0266351116642078.

[158] B. Kromoser and P. Huber, "Pneumatic Formwork Systems in Structural Engineering," *Advances in Materials Science and Engineering*, vol. 2016, 2016, doi: 10.1155/2016/4724036.

[159] S. Dix, C. Schuler, and S. Kolling, "Digital full-field photoelasticity of tempered architectural glass: A review," 2022. doi: 10.1016/j.optlaseng.2022.106998.

[160] F. Rather and M. Alam, "Seismic Response Control of Structures with Stiffness Irregularities through Optimally Placed Active Tendons using Multiobjective Genetic Algorithm," *ASPS Conference Proceedings*, vol. 1, no. 1, 2022, doi: 10.38208/acp.v1.631.

[161] E. Nazarimofrad and S. M. Zahrai, "Seismic control of irregular multistory buildings using active tendons considering soil–structure interaction effect," *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 89, 2016, doi: 10.1016/j.soildyn.2016.07.005.

[162] S. M. Nigdeli, "Active Tendons for Seismic Control of Buildings," *World Acad Sci Eng Technol*, 2010.

[163] F. Bossens, "Active tendon control of cable-stayed bridges: A large-scale demonstration," *Earthq Eng Struct Dyn*, vol. 30, no. 7, 2001, doi: 10.1002/eqe.40.

[164] V. Ondra and B. Titurus, "Theoretical and experimental modal analysis of a beam-tendon system," *Mech Syst Signal Process*, vol. 132, 2019, doi: 10.1016/j.ymssp.2019.06.016.

[165] J. N. Yang and F. Giannopoulos, “ACTIVE TENDON CONTROL OF STRUCTURES,” *ASCE J Eng Mech Div*, vol. 104, no. 3, 1978, doi: 10.1061/jmcea3.0002361.

[166] X. Tellier, C. Douthe, L. Hauswirth, and O. Baverel, “Surfaces with planar curvature lines: Discretization, generation and application to the rationalization of curved architectural envelopes,” *Autom Constr*, vol. 106, 2019, doi: 10.1016/j.autcon.2019.102880.

[167] S. C. Kim and S. H. Kim, “A precision linear actuator using piezoelectrically driven friction force,” *Mechatronics*, vol. 11, no. 8, 2001, doi: 10.1016/S0957-4158(00)00060-X.

[168] S. S. Khedmatgozar Dolati, N. Caluk, A. Mehrabi, and S. S. Khedmatgozar Dolati, “Non-destructive testing applications for steel bridges,” 2021. doi: 10.3390/app11209757.

[169] G. ’Wang Q. ’Bier H. ’Teuffel P. ’Senatore, “The use of variable stiffness joints in adaptive structures,” in *Proceedings of IASS Annual Symposia*, 2017, pp. 1–10.

[170] A. Fotiadou, “Responsive architecture and software: A prototype simulation software for responsive constructions,” in *eWork and eBusiness in Architecture, Engineering and Construction - Proceedings of the European Conference on Product and Process Modelling 2012, ECPPM 2012*, 2012.

[171] J. Chilton, *Space Grid Structures*. 2007. doi: 10.4324/9780080498188.

[172] M. Sonmez, “Performance Comparison of Metaheuristic Algorithms for the Optimal Design of Space Trusses,” *Arab J Sci Eng*, vol. 43, no. 10, 2018, doi: 10.1007/s13369-018-3080-y.

[173] B. Si, F. Liu, and Y. Li, “Metamodel-Based Hyperparameter Optimization of Optimization Algorithms in Building Energy Optimization,” *Buildings*, vol. 13, no. 1, 2023, doi: 10.3390/buildings13010167.

[174] K. Y. Kok, H. H. Lau, T. D. Phan, and Ti. C. H. Ting, “Design optimisation for cold-formed steel residential roof truss using genetic algorithm,” *World Journal of Engineering*, vol. 15, no. 5, 2018, doi: 10.1108/WJE-10-2017-0322.

[175] Y. M. Xie, “Generalized topology optimization for architectural design,” *Architectural Intelligence*, vol. 1, no. 1, 2022, doi: 10.1007/s44223-022-00003-y.

[176] A. G. Weldeyesus, J. Gondzio, L. He, M. Gilbert, P. Shepherd, and A. Tyas, “Truss geometry and topology optimization with global stability constraints,” *Structural and Multidisciplinary Optimization*, vol. 62, no. 4, 2020, doi: 10.1007/s00158-020-02634-z.

[177] K. Sadowski, “Optymalizacja siatek prętowych metodą analogii do ładunków elektrycznych,” Politechnika Warszawska, Warszawa, 2004.

[178] M. Pelczarski, “Strumienie sił w teorii Wacława Zalewskiego jako narzędzie projektanta w kształtowaniu architektury konstrukcji. Podstawowe zasady, metody dydaktyczne, przykłady realizacji.,” *Architectus*, vol. 4, no. 40, pp. 93–104, 2014.

[179] E. ’Zalewski W. ’Allen, *Form and forces: designing efficient, expressive structures*. John Wiley & Sons, 2009.

[180] M. Rippmann, A. Liew, T. Van Mele, and P. Block, “Design, fabrication and testing of discrete 3D sand-printed floor prototypes,” *Mater Today Commun*, vol. 15, 2018, doi: 10.1016/j.mtcomm.2018.03.005.

[181] A. Liew, “Constrained Force Density Method optimisation for compression-only shell structures,” *Structures*, vol. 28, 2020, doi: 10.1016/j.istruc.2020.09.078.

[182] F. Xiao, H. Sun, Y. Mao, and G. S. Chen, “Damage identification of large-scale space truss structures based on stiffness separation method,” *Structures*, vol. 53, 2023, doi: 10.1016/j.istruc.2023.04.027.

[183] C. Lázaro, “Mamoru Kawaguchi: Master of motion and lightness of structures,” *International Journal of Space Structures*, vol. 35, no. 1–2, 2020, doi: 10.1177/0956059920931316.

[184] C. Liu, S. Yu, and M. Yim, “Motion Planning for Variable Topology Truss Modular Robot,” in *Robotics: Science and Systems*, 2020. doi: 10.15607/RSS.2020.XVI.052.

[185] D. W. Bao, X. Yan, R. Snooks, and Y. M. Xie, “Design and construction of an innovative pavilion using topological optimization and robotic fabrication,” in *IASS Symposium 2019 - 60th Anniversary Symposium of the International Association for Shell and Spatial Structures; Structural Membranes 2019 - 9th International Conference on Textile Composites and Inflatable Structures, FORM and FORCE*, 2019.

[186] N. Petrovic, V. Marjanovic, N. Kostic, N. Marjanovic, and M. V. Dragoi, “Means and effects of constraining the number of used cross-sections in truss sizing optimization,” *Transactions of Famena*, vol. 44, no. 3, 2020, doi: 10.21278/TOF.44303.

[187] S. A. L. De Andrade, P. C. G. D. S. Vellasco, J. G. S. De Silva, L. R. O. De Lima, and A. V. D’Este, “Tubular space trusses with simple and reinforced end-flattened nodes-an overview and experiments,” *J Constr Steel Res*, vol. 61, no. 8, 2005, doi: 10.1016/j.jcsr.2005.02.001.

[188] X. Yang, Y. Bai, and F. Ding, “Structural performance of a large-scale space frame assembled using pultruded GFRP composites,” *Compos Struct*, vol. 133, 2015, doi: 10.1016/j.compstruct.2015.07.120.

[189] C. Chen, H. Fang, J. Han, and Y. Qi, “Structural performance evaluation of pultruded GFRP composite space truss: Experimental study and numerical simulation,” *Case Studies in Construction Materials*, vol. 17, 2022, doi: 10.1016/j.cscm.2022.e01551.

[190] K. Miura, H. Furuya, and K. Suzuki, “Variable geometry truss and its application to deployable truss and space crane arm,” *Acta Astronaut*, vol. 12, no. 7–8, 1985, doi: 10.1016/0094-5765(85)90131-6.

[191] B. A. Boutin, A. K. Misra, and V. J. Modi, “Dynamics and control of variable-geometry truss structures,” *Acta Astronaut*, vol. 45, no. 12, 1999, doi: 10.1016/S0094-5765(99)00125-3.

[192] G. G. Tejani, V. J. Savsani, V. K. Patel, and P. V. Savsani, “Size, shape, and topology optimization of planar and space trusses using mutation-based improved metaheuristics,” *J Comput Des Eng*, vol. 5, no. 2, 2018, doi: 10.1016/j.jcde.2017.10.001.

[193] A. Spinos, D. Carroll, T. Kientz, and M. Yim, “Topological reconfiguration planning for a variable topology truss,” *J Mech Robot*, vol. 13, no. 4, 2021, doi: 10.1115/1.4050530.

[194] H. Taghaddos, U. Hermann, and A. B. Abbasi, “Automated Crane Planning and Optimization for modular construction,” *Autom Constr*, vol. 95, 2018, doi: 10.1016/j.autcon.2018.07.009.

[195] C. Yu, K. Crane, and S. Coros, “Computational design of telescoping structures,” in *ACM Transactions on Graphics*, 2017. doi: 10.1145/3072959.3073673.

[196] A. Spinos, D. Carroll, T. Kientz, and M. Yim, “Variable topology truss: Design and analysis,” in *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2017. doi: 10.1109/IROS.2017.8206098.

[197] M. Alanani and A. Elshaer, “Performance-based layout optimization framework of tall buildings subjected to dynamic wind load,” *Eng Struct*, vol. 336, Aug. 2025.

[198] X. Chen, H. Jiang, T. Xuan, L. Huang, and L. Liu, “Designing deployable 3D scissor structures with ball-and-socket joints,” *Comput Animat Virtual Worlds*, vol. 30, no. 1, 2019, doi: 10.1002/cav.1848.

[199] W. Sobek, “Ultra-lightweight construction,” *International Journal of Space Structures*, vol. 31, no. 1, 2016, doi: 10.1177/0266351116643246.

[200] J. Mohd Jani, M. Leary, A. Subic, and M. A. Gibson, “A review of shape memory alloy research, applications and opportunities,” 2014. doi: 10.1016/j.matdes.2013.11.084.

17. Załączniki

17.1 Załączniki fizyczne

A.1 Album formuł modeli badawczych przygotowanych w oprogramowaniu Rhinoceros Grasshopper.

17.2 Załączniki w formie cyfrowej

Rozdział/kod załącznika	Nazwa	Rodzaj pliku
4		
4.A	Rozdział 4 - badania parametrów symulacji	xlsx (arkusz kalkulacyjny Excel)
4.B	dynamiczne relaksacje - membrana z dynamiką sił pionowych	gh (model programu Grasshopper)
4.C	dynamiczne relaksacje - membrana z dynamiką sił poziomych	gh (model programu Grasshopper)
4.D	dynamiczne relaksacje - membrana z dynamiką pionowych sił	jpg (element albumu)
4.E	dynamiczne relaksacje - membrana z dynamiką poziomych sił	jpg (element albumu)
5		
5.A	Mocowanie powłoki	dwg (model programu Autodesk Autocad)
5.B	Pełny model powłoki z wizualizacją elastooptyczną	iam (model programu Autodesk Inventor Professional)
5.C	Alternatywna podpora	iam (model programu Autodesk Inventor Professional)
5.D.1	model podpory obrotowej w 1 płaszczyźnie	ipt (zbiór części modelu Autodesk Inventor Professional)
5.D.2	model podpory obrotowej w 2 płaszczyznach	ipt (zbiór części modelu Autodesk Inventor Professional)
5.E	Rozdział 5 - badania unifikacji przypadków obciążeniowych	xlsx (arkusz kalkulacyjny Excel)
5.F	Rozdział 5 - badania wpływu liczby iteracji na efektywność wyników	xlsx (arkusz kalkulacyjny Excel)
5.G	model wyginanej powłoki	gh (model programu Grasshopper)
5.H	sterowanie podporą	gh (model programu Grasshopper)
5.I	sterowanie podporą powłoki	jpg (element albumu)
5.J	zmiana geometrii ruchem podpór powłoki	jpg (element albumu)
6		
6.A	modyfikator systemowy	iam (model programu Autodesk Inventor Professional)

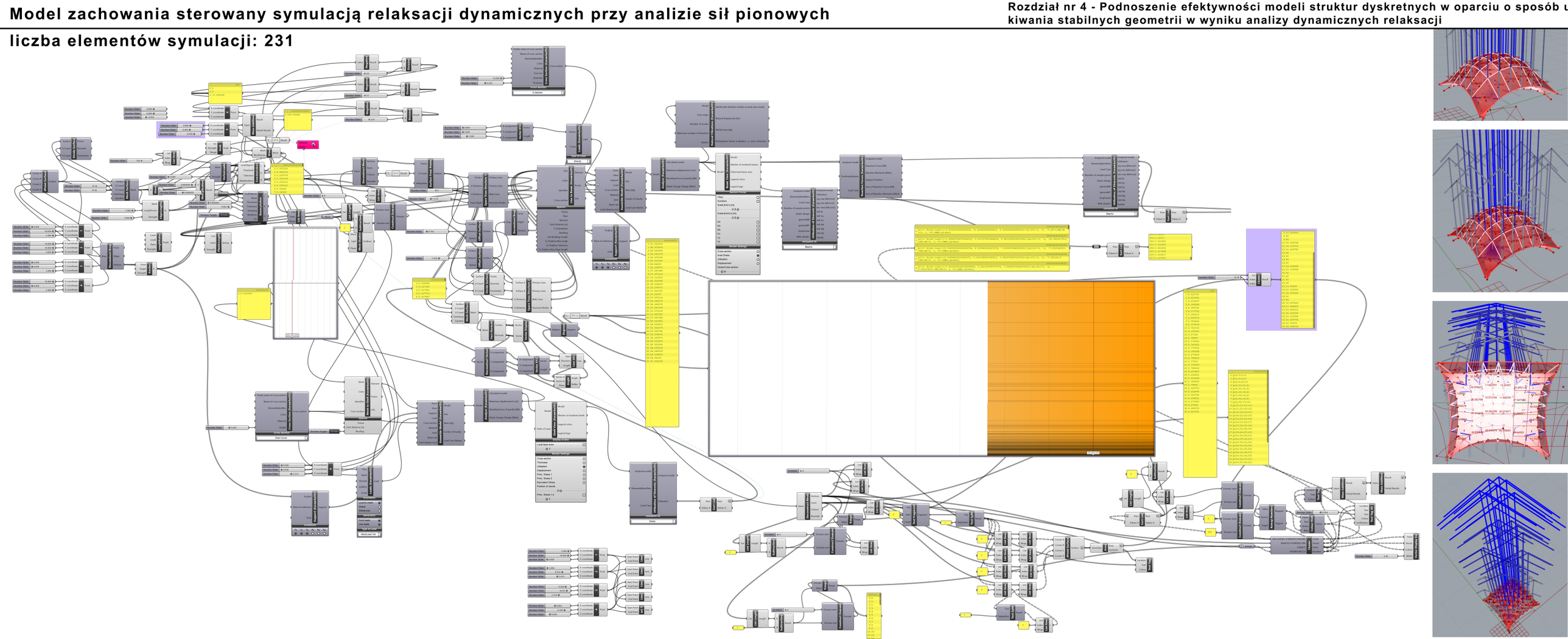
6.B	Badania doboru lokalizacji modyfikatorów z użyciem algorytmów ewolucyjnych	xlsx (arkusz kalkulacyjny Excel)
6.C	Pierwsze badania koncepcyjne pojedynczego modyfikatora	xlsx (arkusz kalkulacyjny Excel)
6.D	Rozdział 6 - badania struktury sterowanej dynamicznymi relaksacjami	xlsx (arkusz kalkulacyjny Excel)
6.E	podstawa modyfikatora	ipt (zbiór części modelu Autodesk Inventor Professional)
6.F	Losowość prętów stężających	gh (model programu Grasshopper)
6.G	Prosty modyfikator powłokowy	gh (model programu Grasshopper)
6.H	losowość prętów stężających	jpg (element albumu)
6.I	model powłoki z pojedynczym modyfikatorem	jpg (element albumu)
6.J	prosty modyfikator	iam (model programu Autodesk Inventor Professional)
7		
7.A	Badania efektywności modyfikatorów w strukturach o swobodnej geometrii	xlsx (arkusz kalkulacyjny Excel)
7.B	Badania efektywności modyfikatorów w strukturach o sztywnej topologii	xlsx (arkusz kalkulacyjny Excel)
7.C	Badania efektywności modyfikatorów w strukturach ramowych	xlsx (arkusz kalkulacyjny Excel)
7.D	Badanie wpływu wielkości modyfikatorów na skuteczność kontroli geometrii	xlsx (arkusz kalkulacyjny Excel)
7.E	alternatywa modyfikatorów ramowych powłoka	gh (model programu Grasshopper)
7.F	modyfikatory konstrukcji ramowej ortogonalnej	gh (model programu Grasshopper)
7.G	model modyfikatora ramowego	jpg (element albumu)
7.H	modyfikator ramowy struktury o swobodnej geometrii	jpg (element albumu)
8		
8.A	Zestawienie wyników badania preakcji	xlsx (arkusz kalkulacyjny Excel)
8.B	Preakcja-agregacja punktów	gh (model programu Grasshopper)
8.C	Preakcja-metoda strumieni sił	gh (model programu Grasshopper)
8.D	Preakcja-pogrubienie kratownicy	gh (model programu Grasshopper)
8.E	Preakcja-symulacja membraną	gh (model programu Grasshopper)
8.F	sub-moves	gh (model programu Grasshopper)
8.G	Preakcje - agregacja punktów	jpg (element albumu)
8.H	Preakcje - metoda strumieni sił	jpg (element albumu)
	Preakcje - pogrubienie kratownicy	jpg (element albumu)

8.I	Preakcje - symulacja membraną	jpg (element albumu)
8.J	Sub-moves	jpg (element albumu)
9		
9.A	węzeł centryczny	iam (model programu Autodesk Inventor Professional)
9.B	węzeł bryłowy	iam (model programu Autodesk Inventor Professional)
9.C	model ramienia ekspandującego	iam (model programu Autodesk Inventor Professional)
9.D	układ modułu ekspandującego	iam (model programu Autodesk Inventor Professional)
9.E.1	model pręta teleskopowanego	iam (model programu Autodesk Inventor Professional)
9.E.2	model pręta teleskopowanego	ipt (zbiór części modelu Autodesk Inventor Professional)
9.F.1	węzeł pierścieniowy	iam (model programu Autodesk Inventor Professional)
9.F.2	węzeł pierścieniowy	ipt (zbiór części modelu Autodesk Inventor Professional)
10		
10.A	elementy topologii	iam (model programu Autodesk Inventor Professional)
10.B	elementy topologii	ipt (zbiór części modelu Autodesk Inventor Professional)
10.C	test results for topological responsiveness	xlsx (arkusz kalkulacyjny Excel)
10.D	model struktury wysokiej z koncepcyjnym modułem responsywnym topologicznie -927	gh (model programu Grasshopper)
10.E	prosta hala	gh (model programu Grasshopper)
10.F	responsywność topologiczna - badania sił pionowych	gh (model programu Grasshopper)
10.G	model topologicznej responsywności	dwg (model programu Autodesk Autocad)
10.H	badania siłl poziomych w strukturze nieregularnej	jpg (element albumu)
10.I	model responsywny topologicznie z dominującymi obciążeniami pionowymi	jpg (element albumu)
10.J	model responsywny topologicznie w układzie poziomych elementów	jpg (element albumu)

10.K	model responsywny topologicznie z dominującymi obciążeniami poziomymi	jpg (element albumu)
11		
11.A	badanie pojedynczego modułu podmienionego	gh (model programu Grasshopper)
11.B	Topologia obrotowa	iam (model programu Autodesk Inventor Professional)

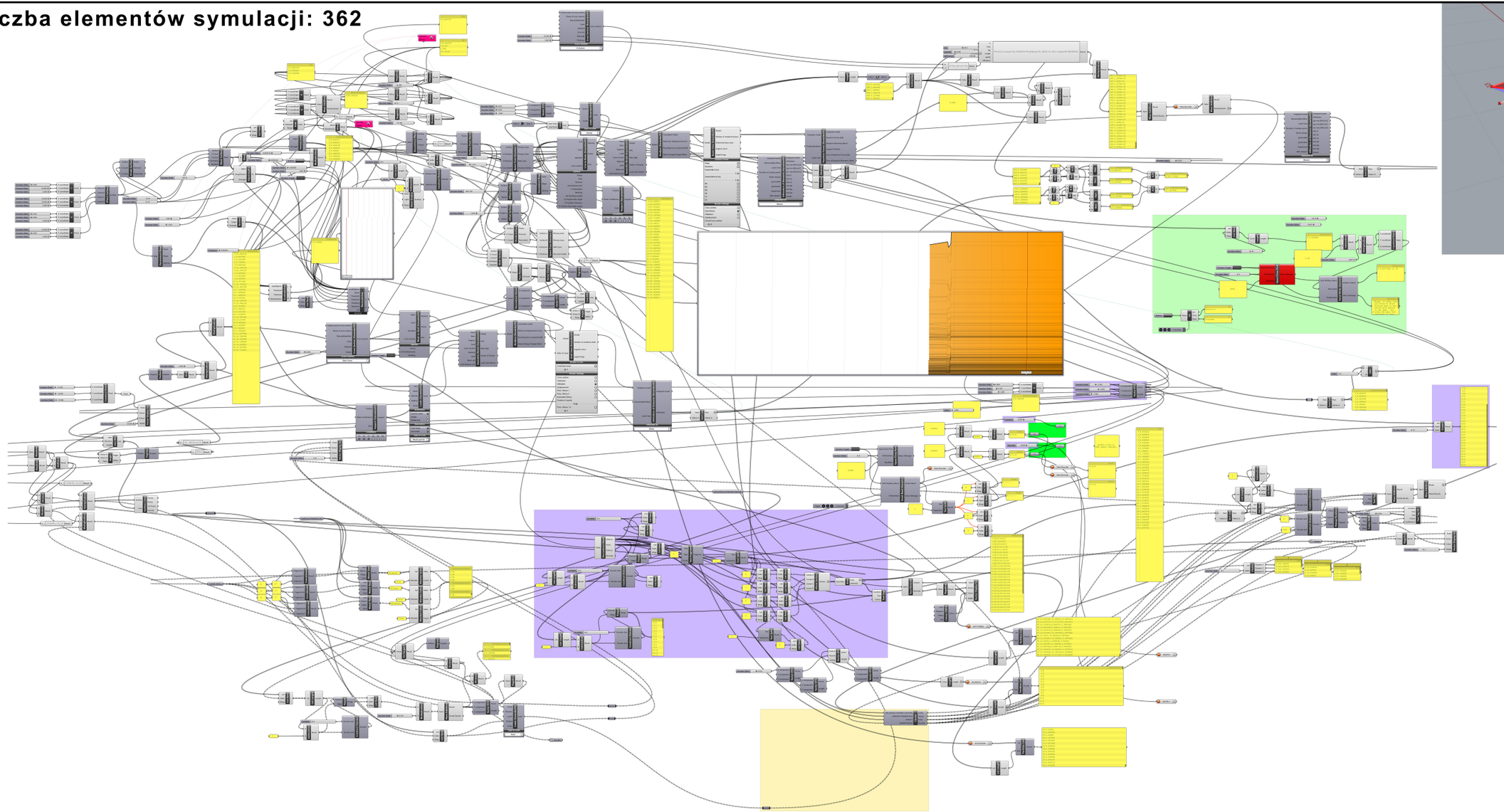
Model zachowania sterowany symulacją relaksacji dynamicznych przy analizie sił pionowych

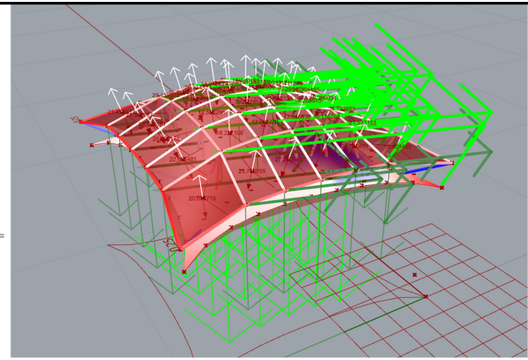
liczba elementów symulacji: 231

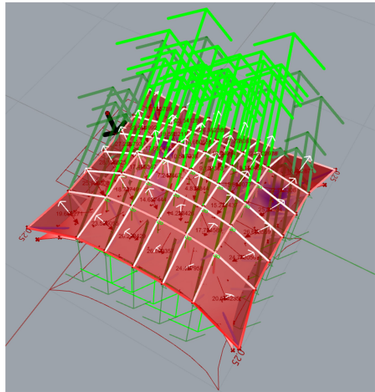


Model zachowania sterowany symulacją relaksacji dynamicznych przy analizie sił poziomych

liczba elementów symulacji: 362

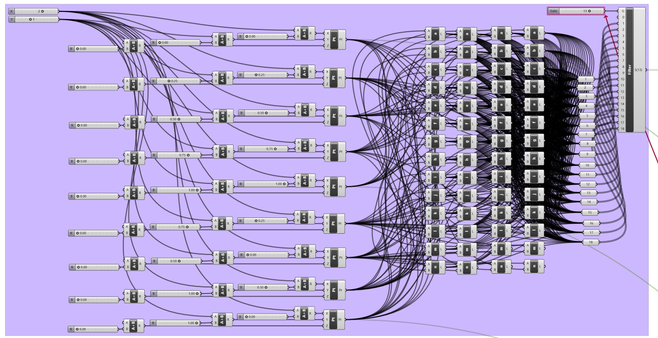


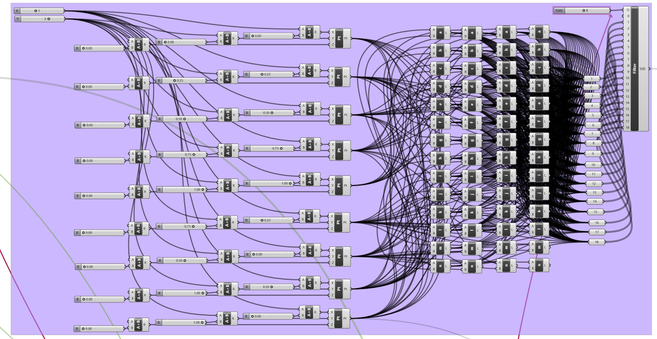


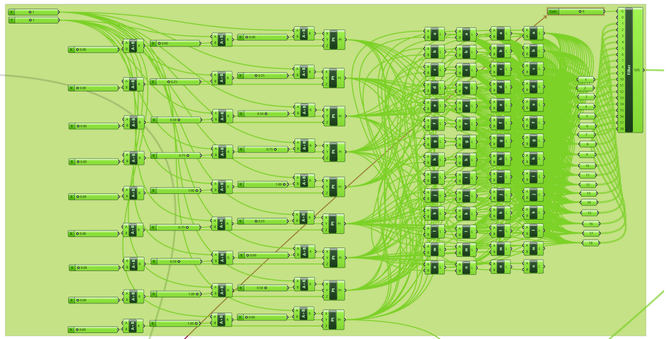


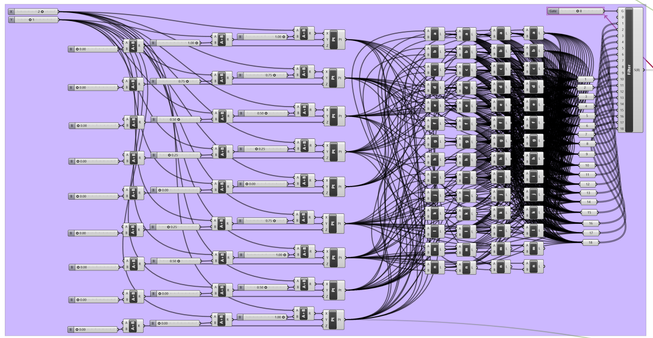
Moduł responsywny topologicznie o charakterze rozkładania obrotowego

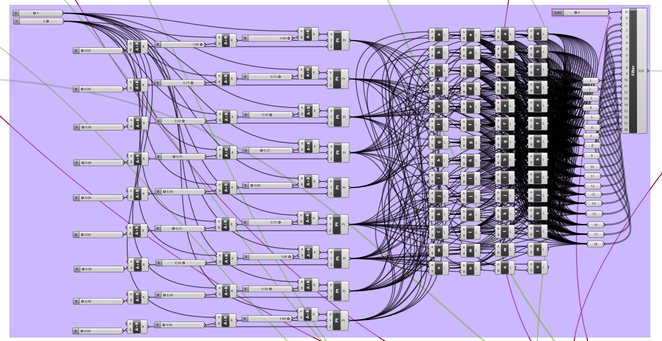
liczba elementów symulacji: 1173

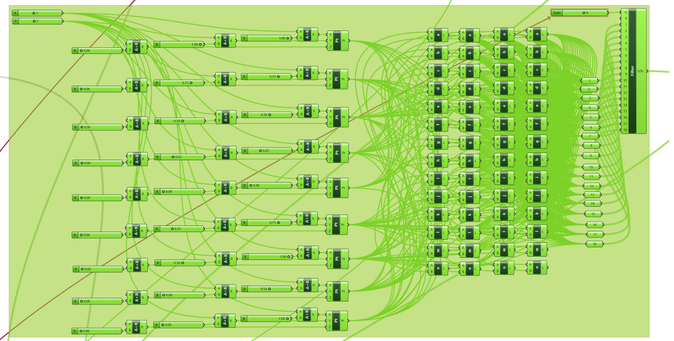


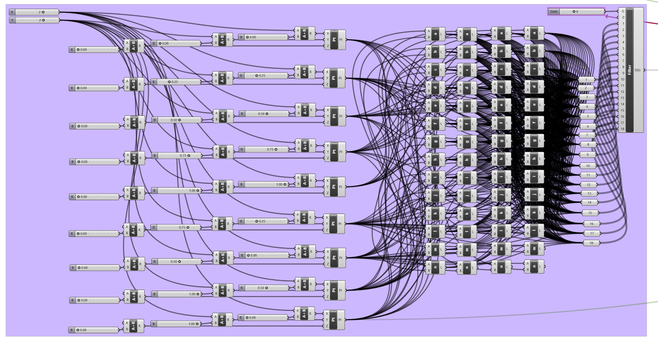


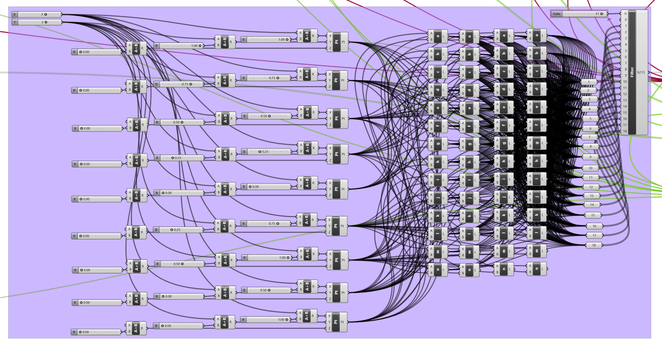


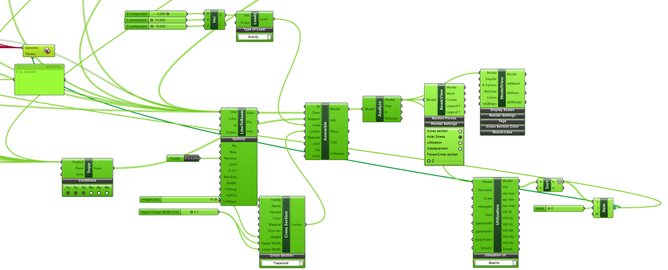


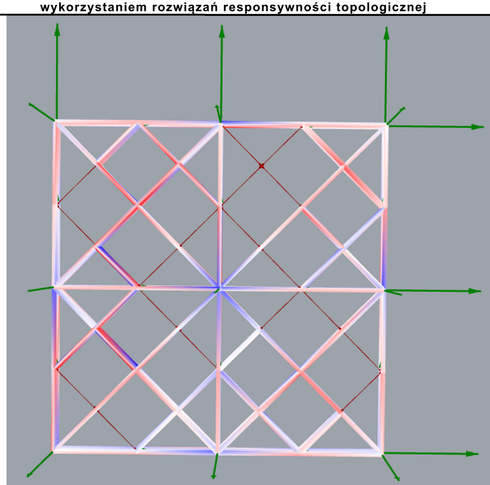


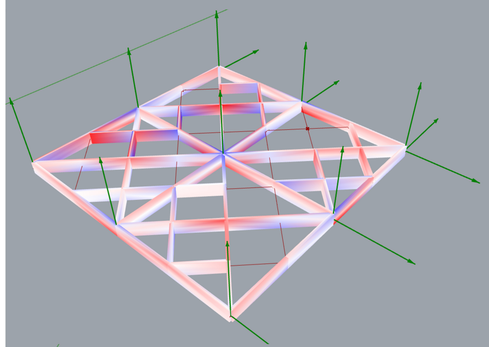


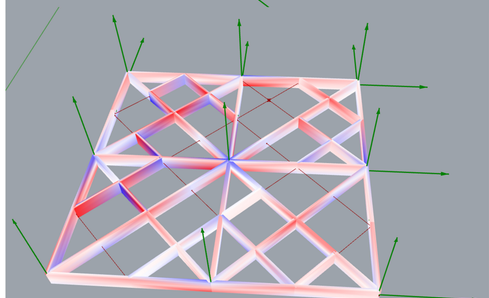






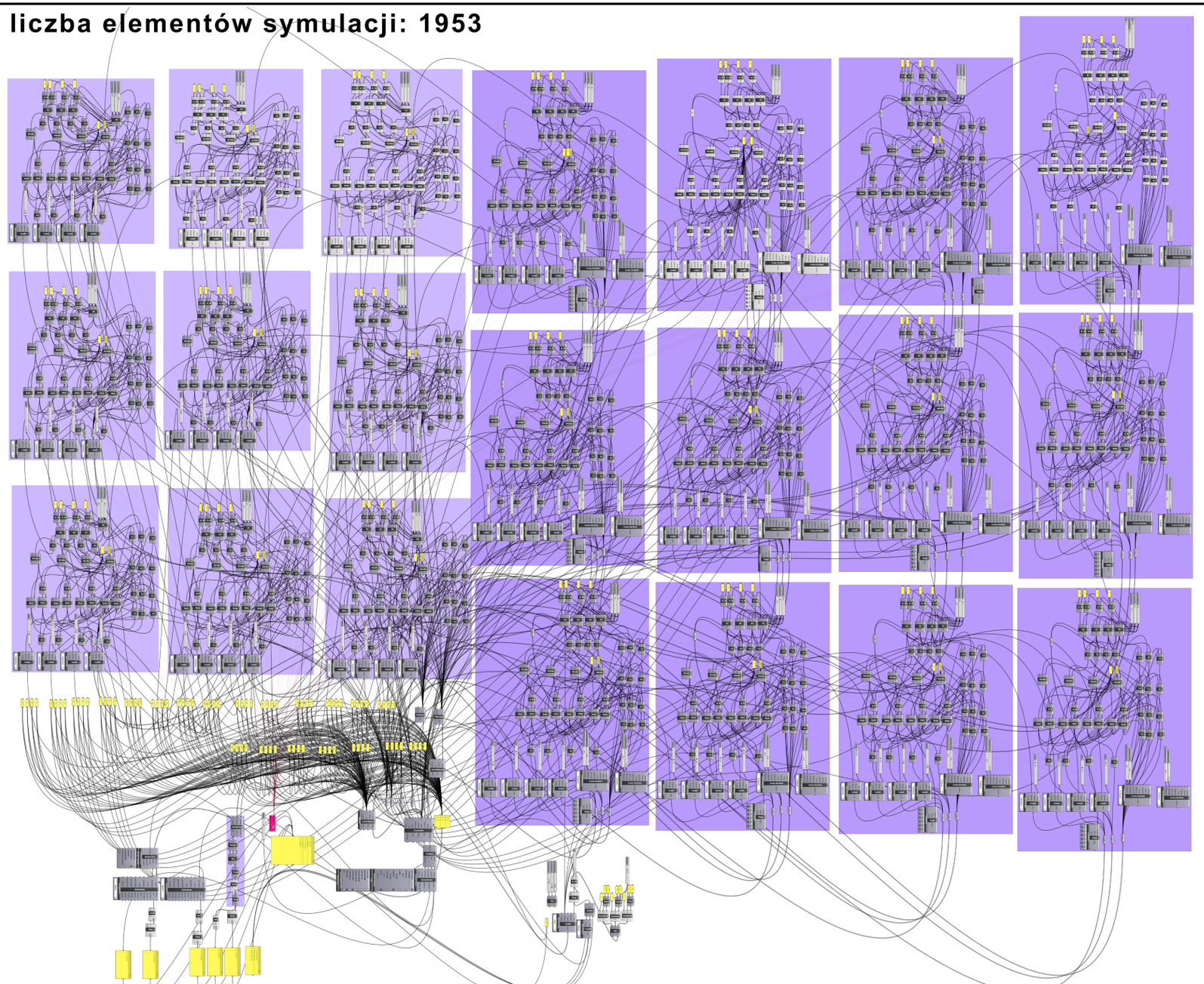


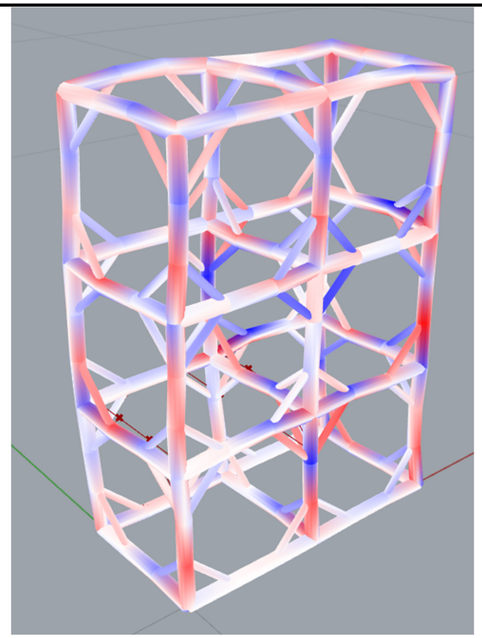


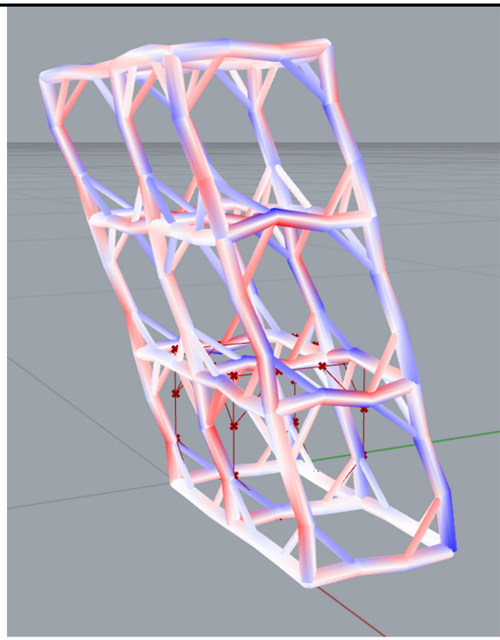


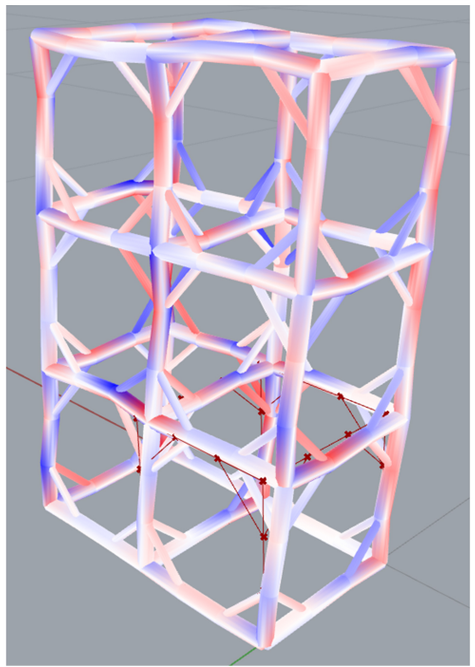
Model sterowania modyfikatorami struktury ramowej ortogonalnej

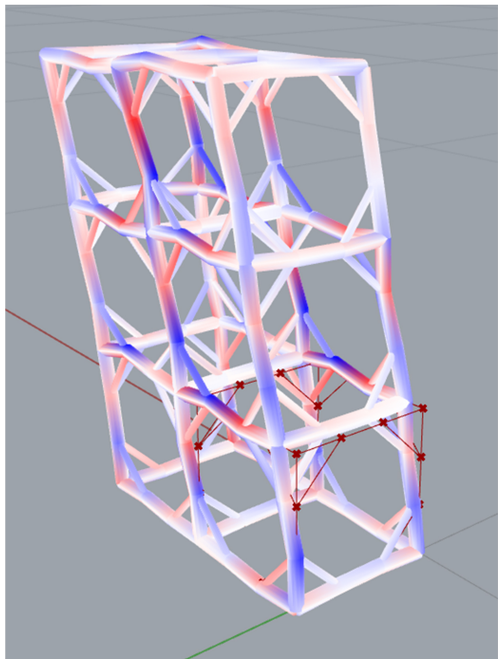
liczba elementów symulacji: 1953





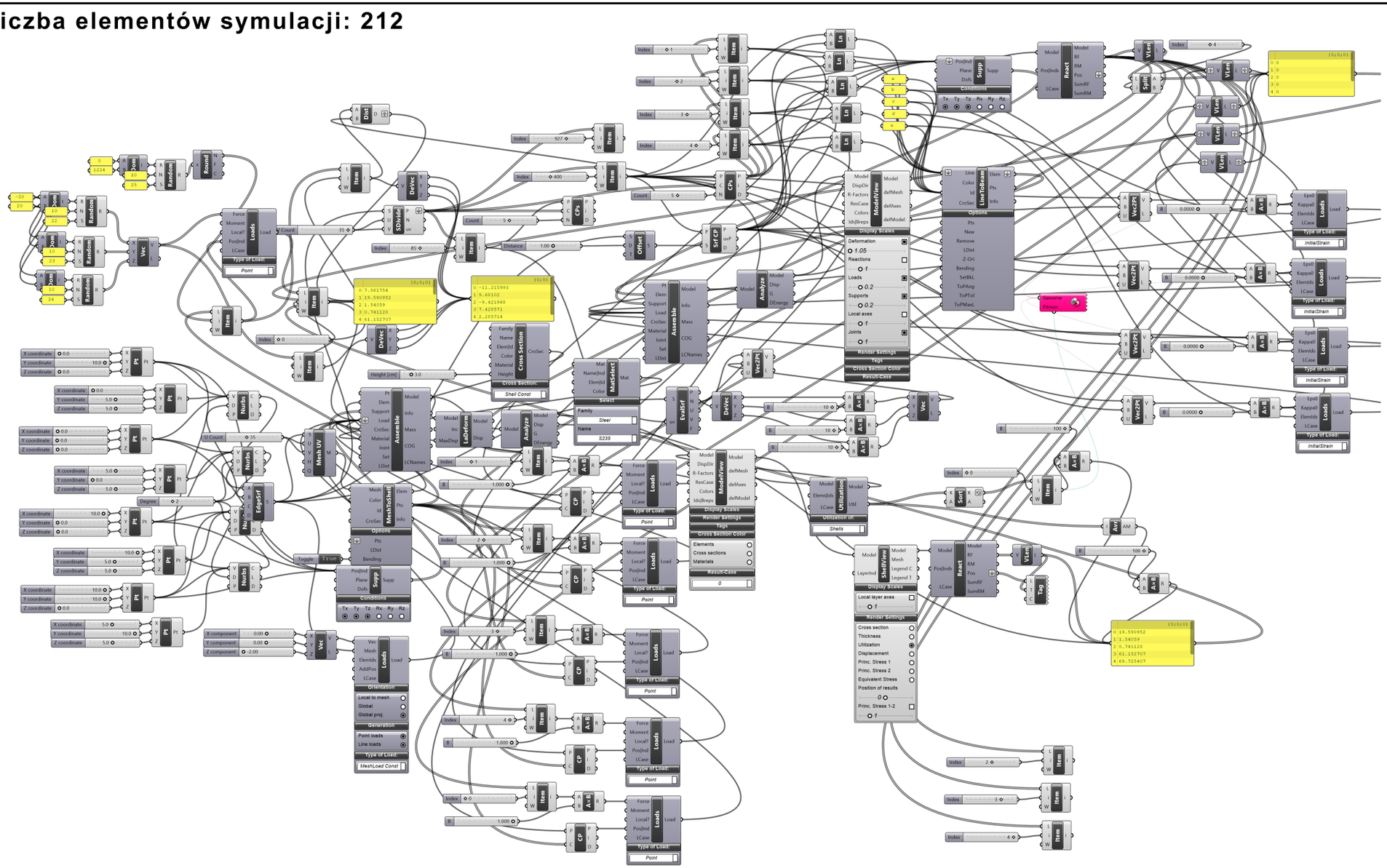


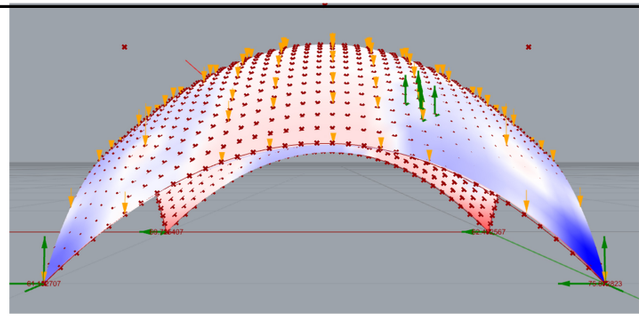


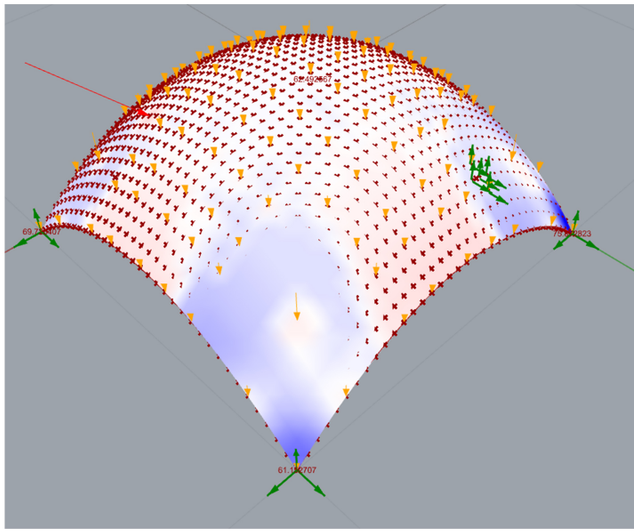


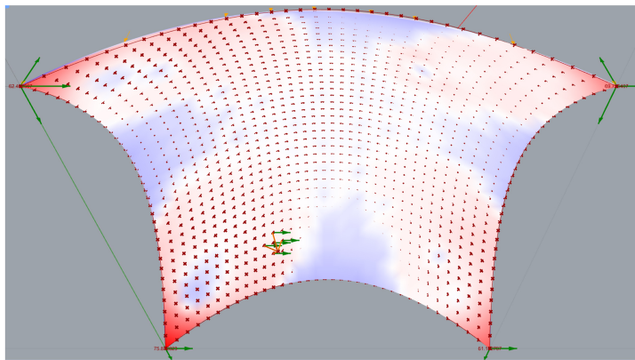
Model powłoki z pojedynczym modyfikatorem

liczba elementów symulacji: 212



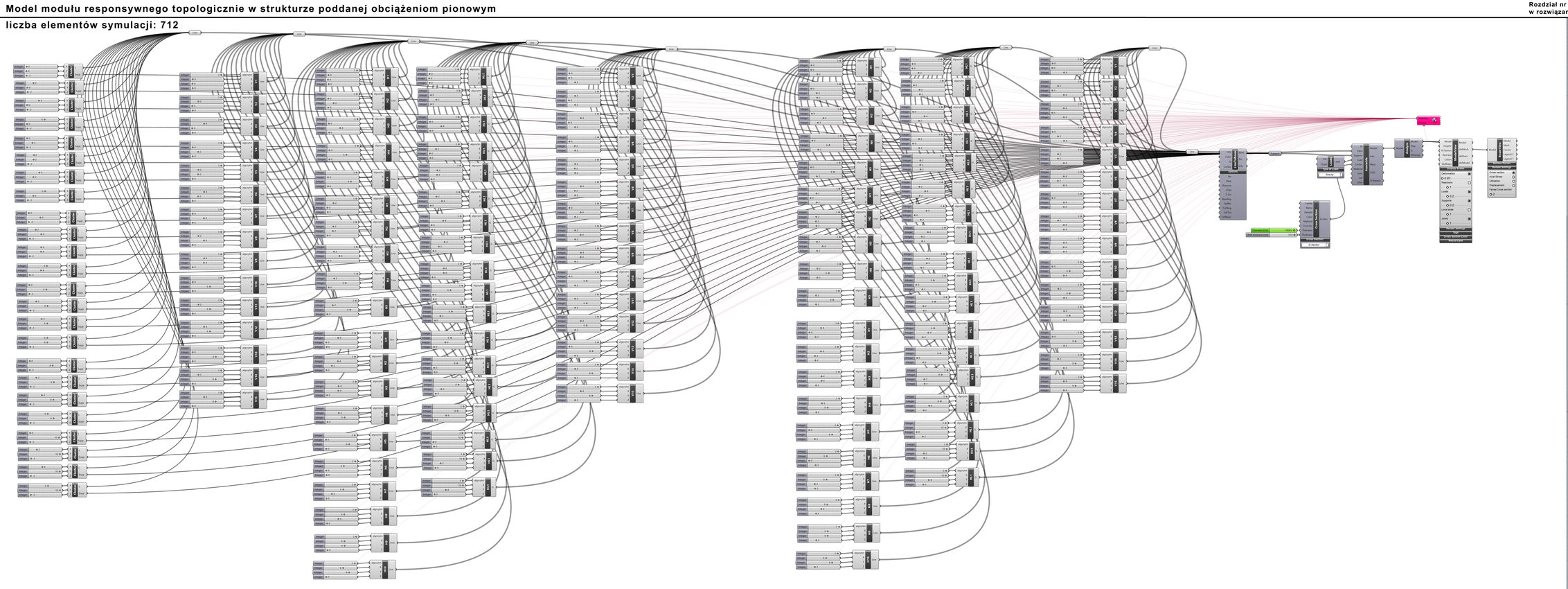


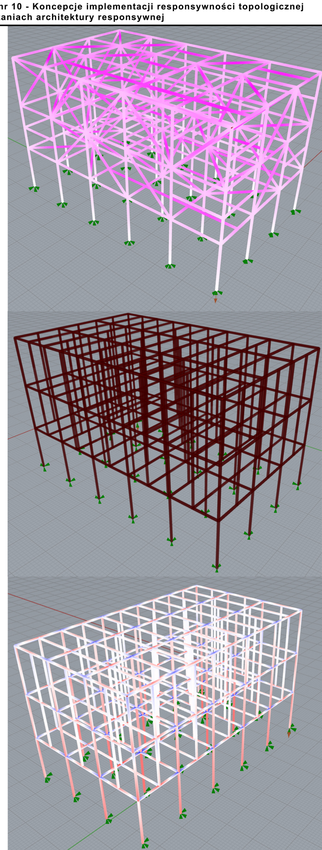




Model modułu responsywnego topologicznie w strukturze poddanej obciążeniom pionowym

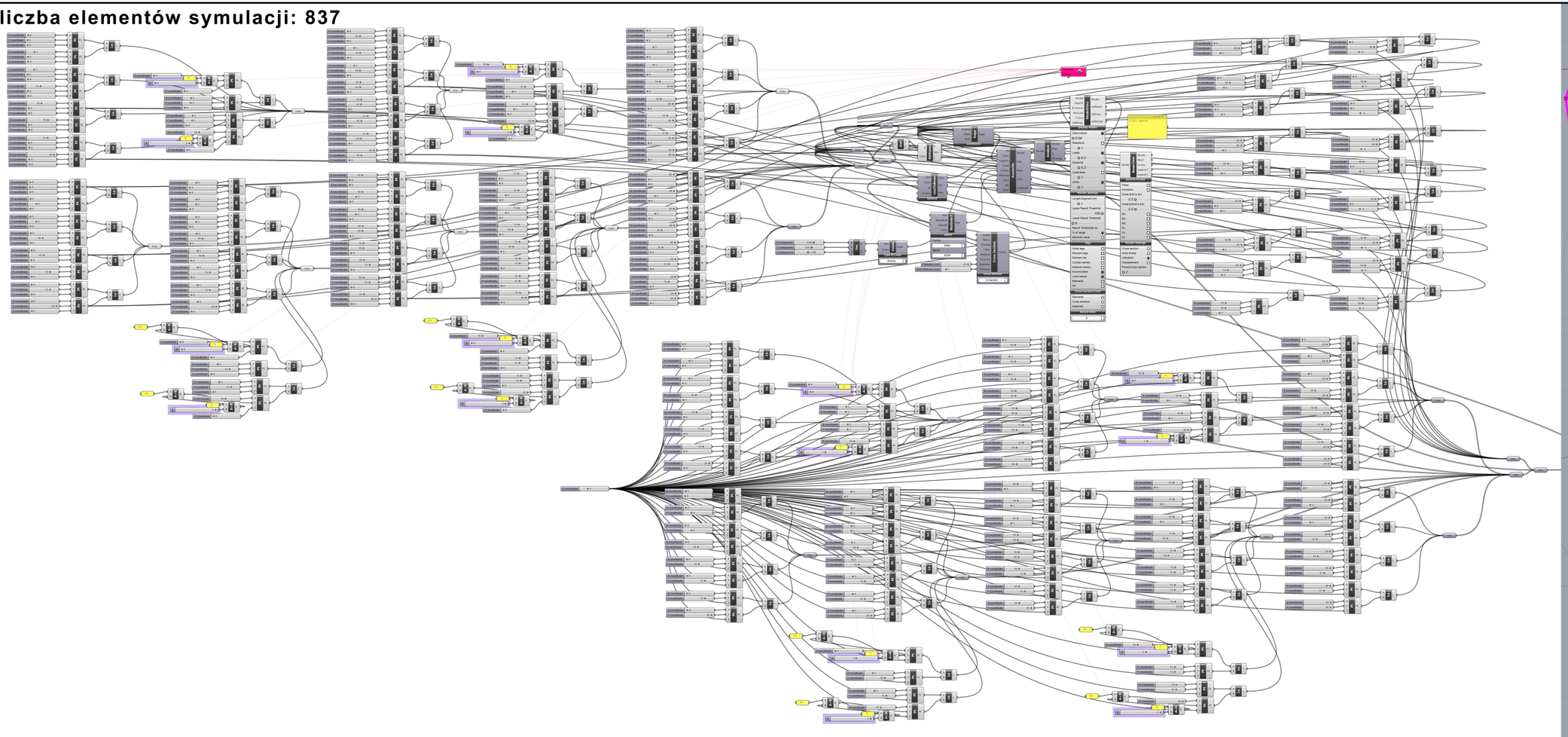
liczba elementów symulacji: 712

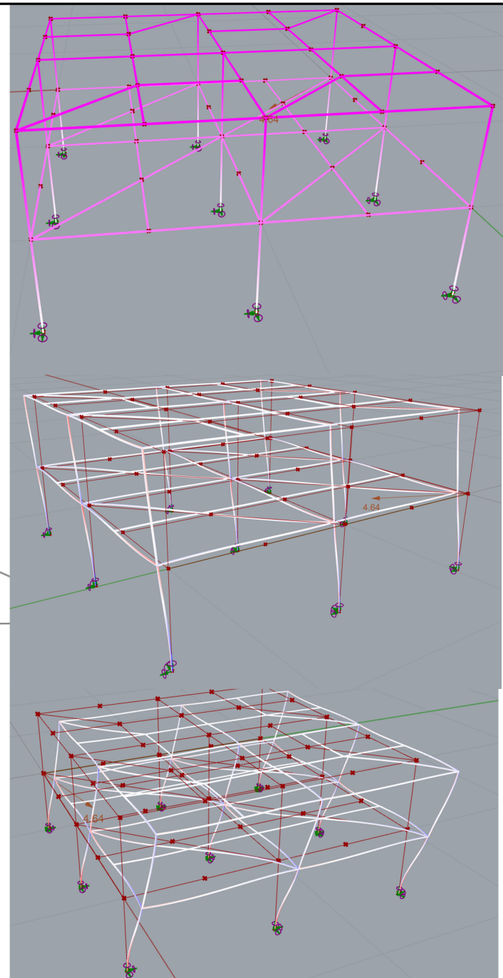




Model sterowania responsywnością topologiczną dla struktury podlegającej obciążeniom pionowym

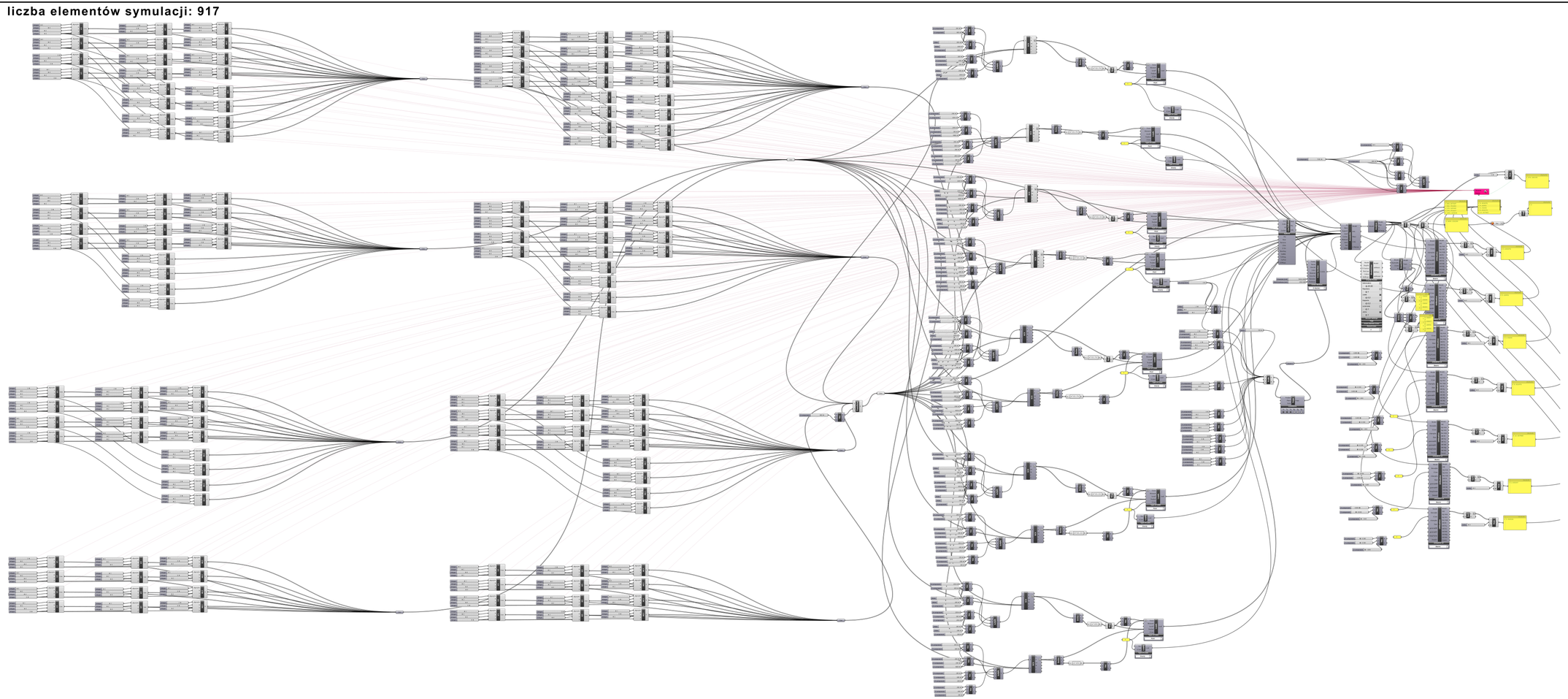
liczba elementów symulacji: 837

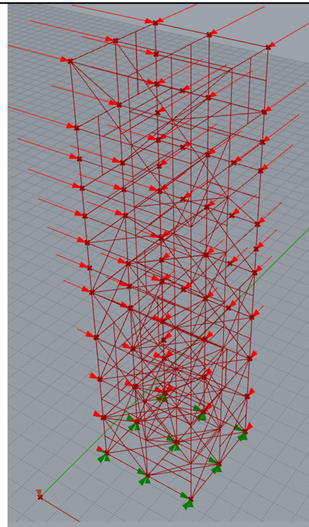


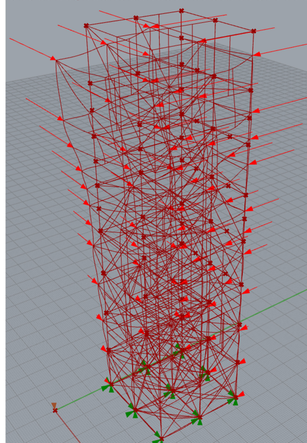


Model modułu responsywnego topologicznie w strukturze poddanej obciążeniom pionowym

liczba elementów symulacji: 917

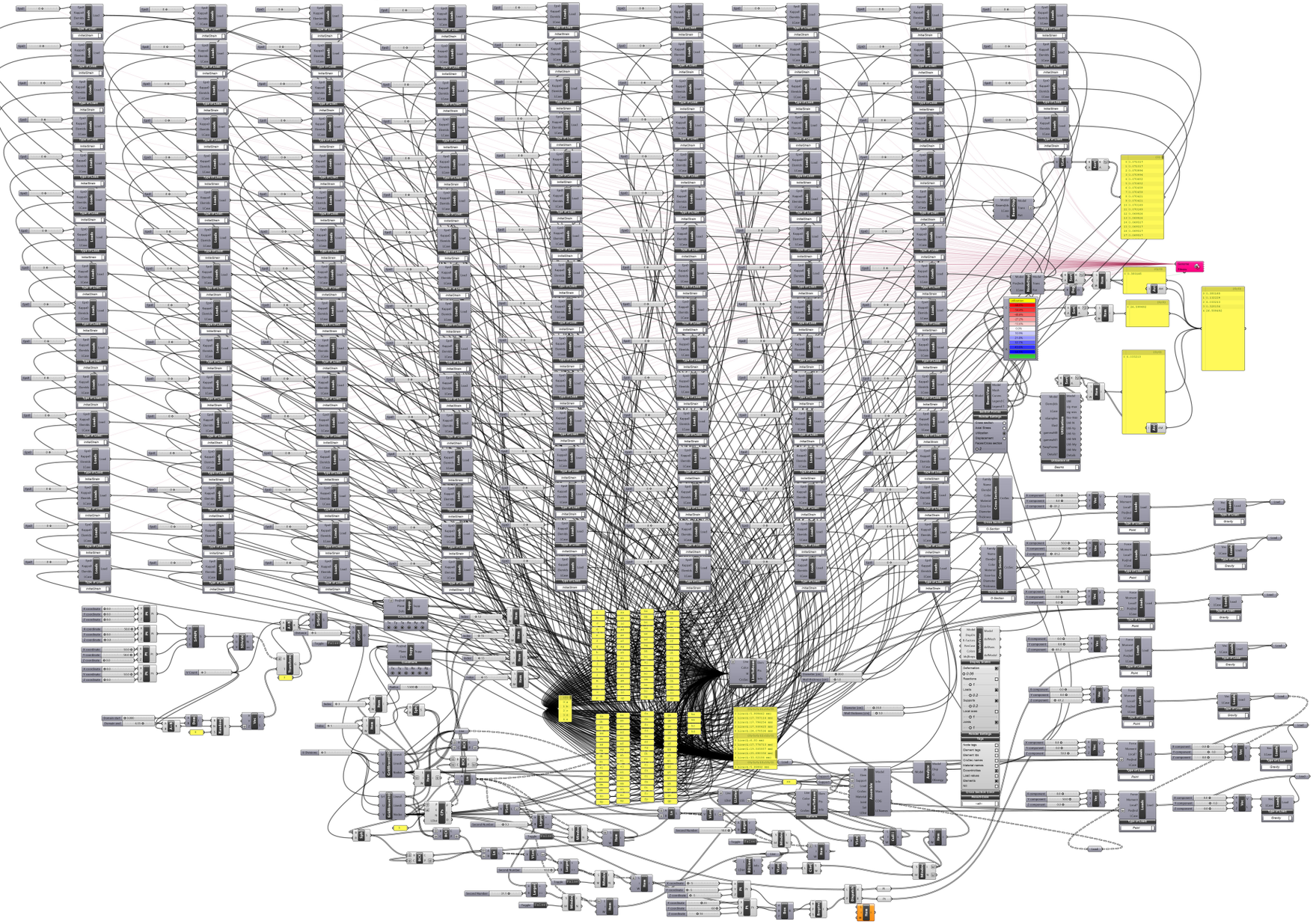


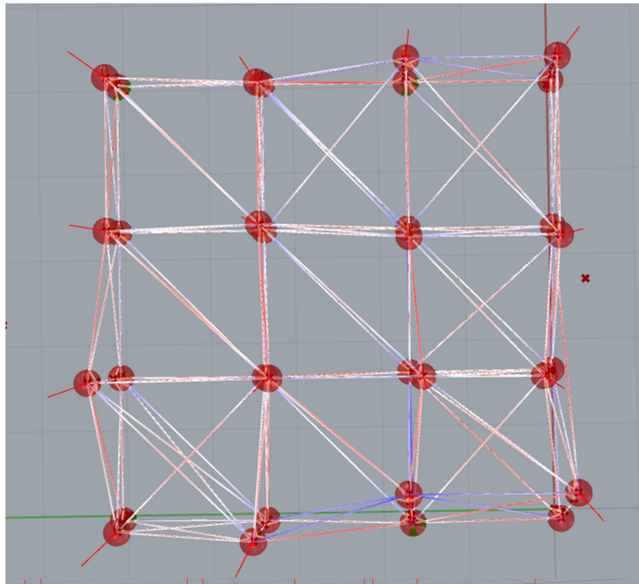


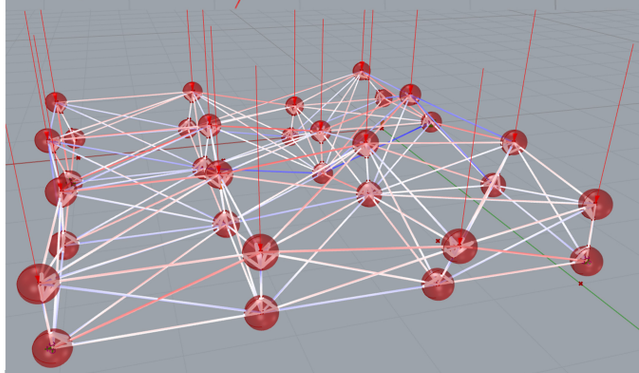


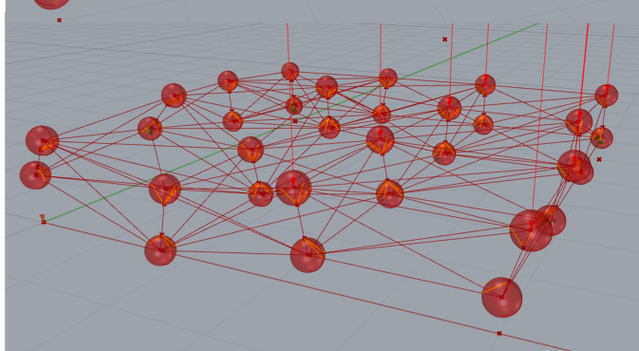
Model sterowania modyfikatorami struktury ramowej o swobodnej geometrii

liczba elementów symulacji: 603



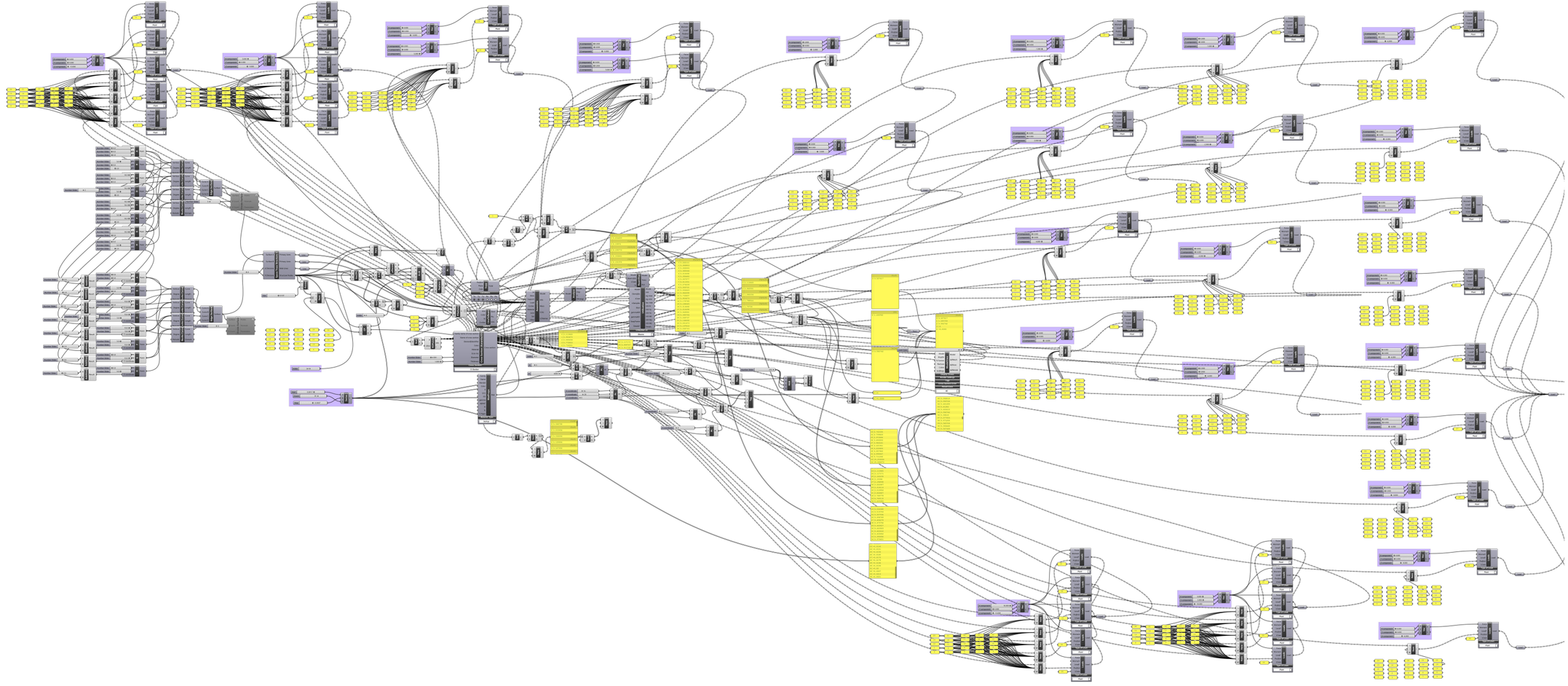


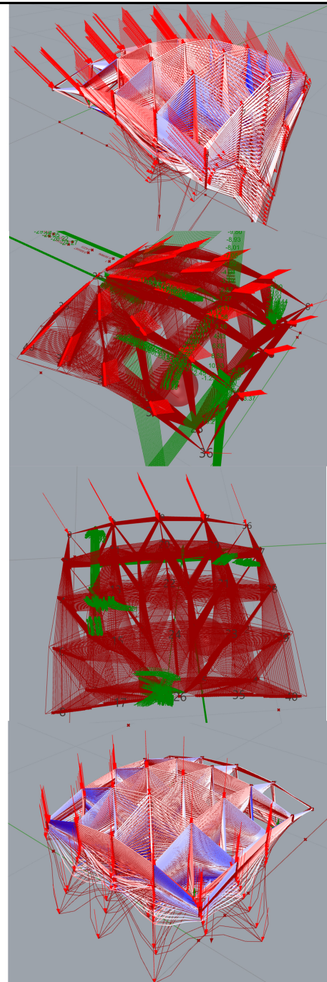




Model preakcji pogrubiania kratowicy

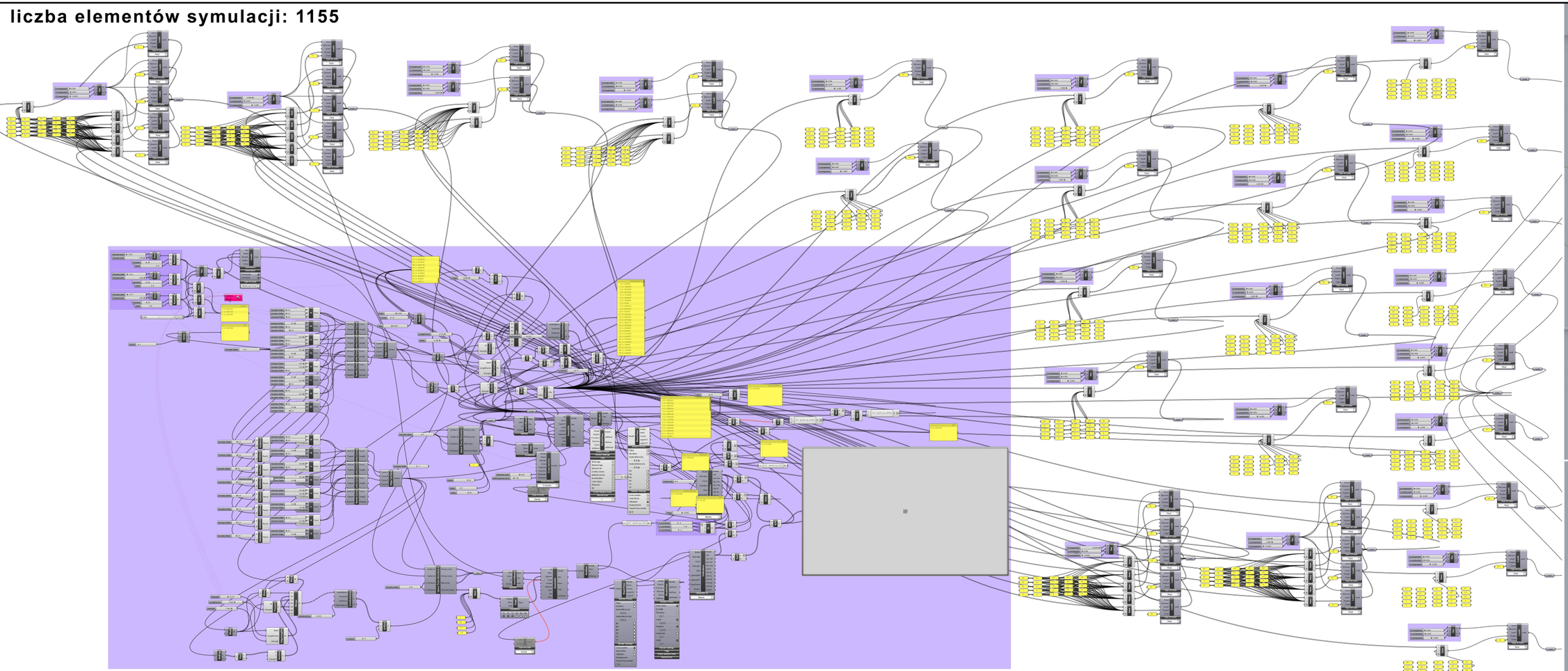
liczba elementów symulacji: 1157

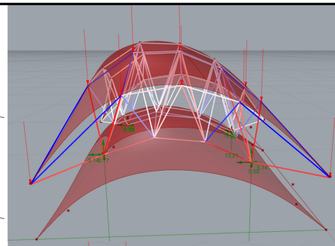


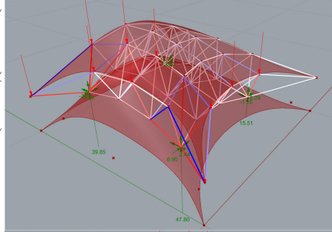


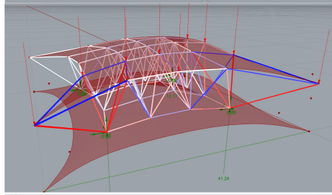
Model preakcji sterowany symulacją dynamicznych relaksacji

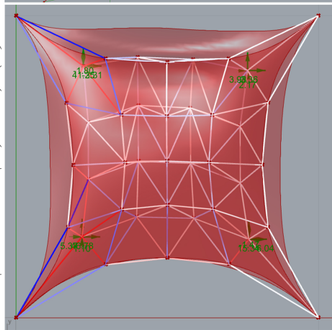
liczba elementów symulacji: 1155





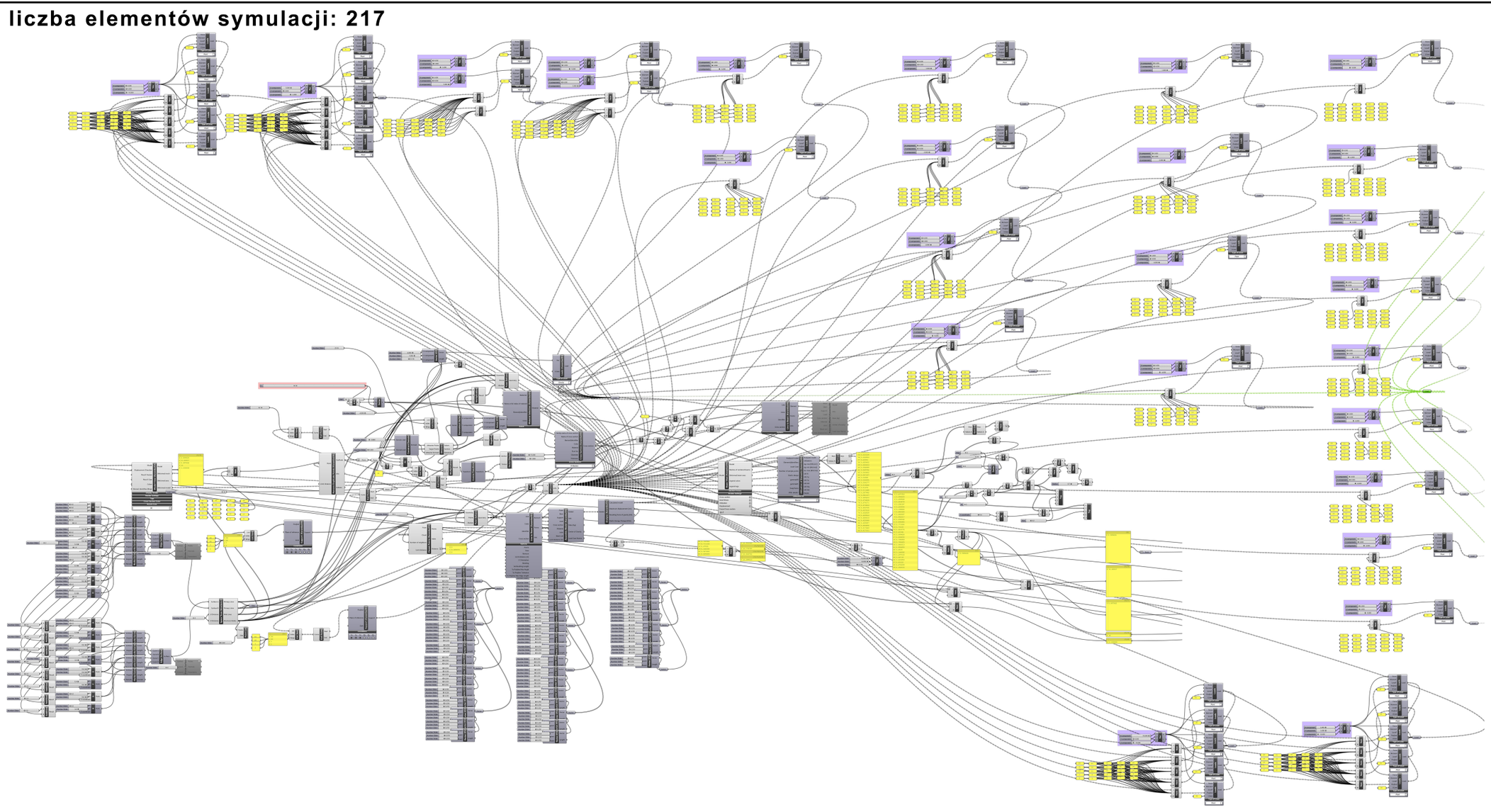


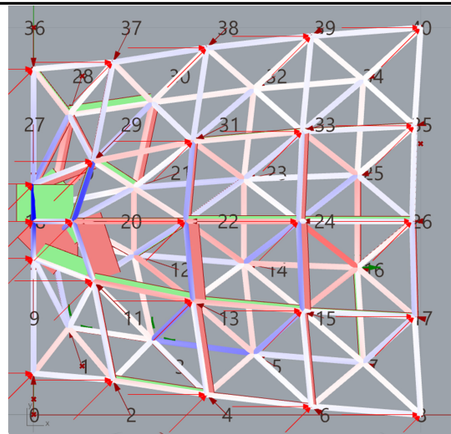


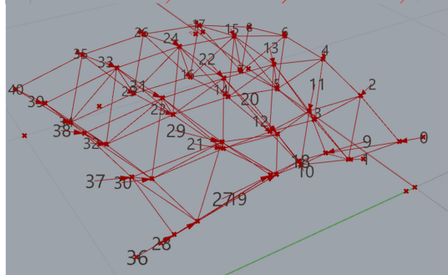


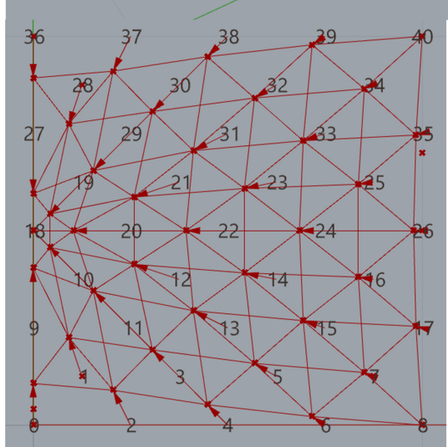
Model preakcji agregacji węzłów

liczba elementów symulacji: 217



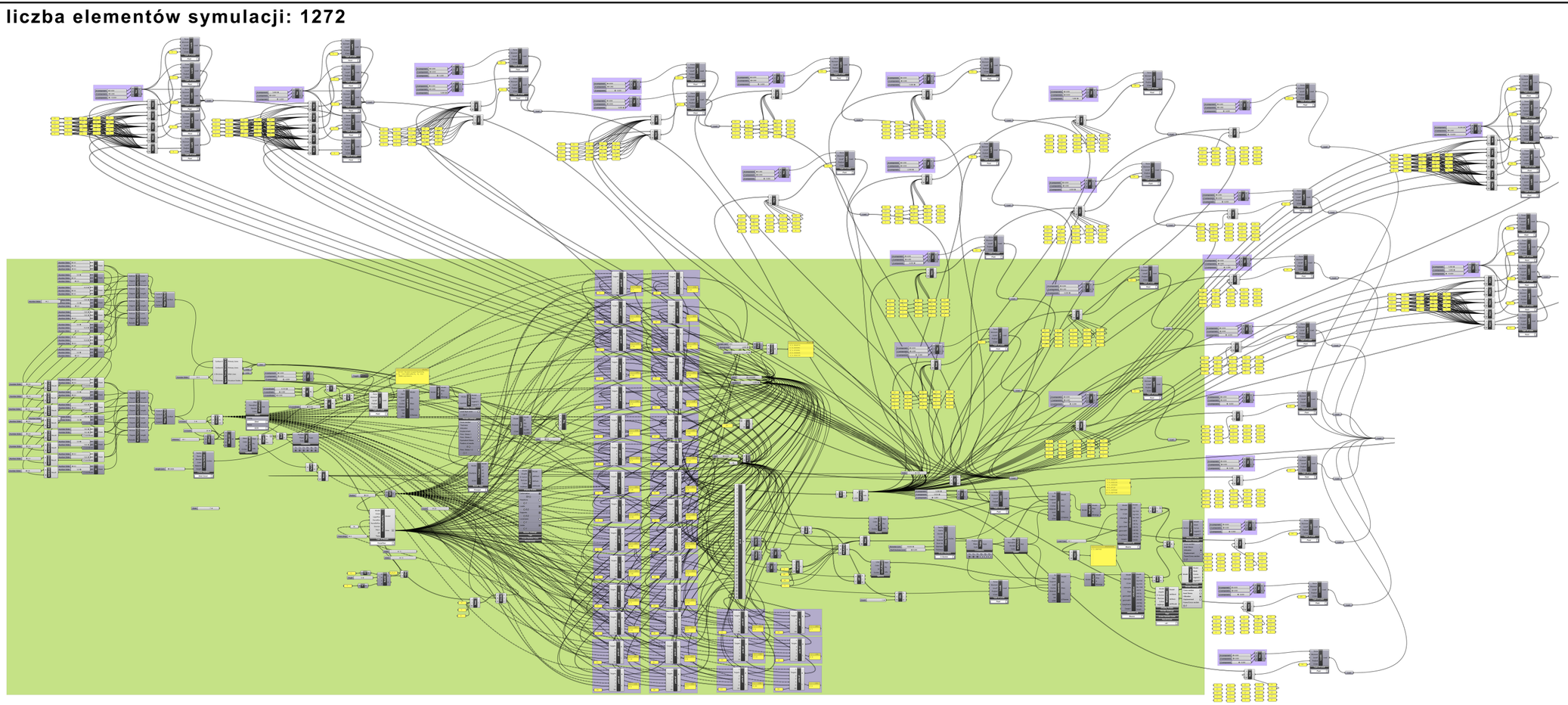


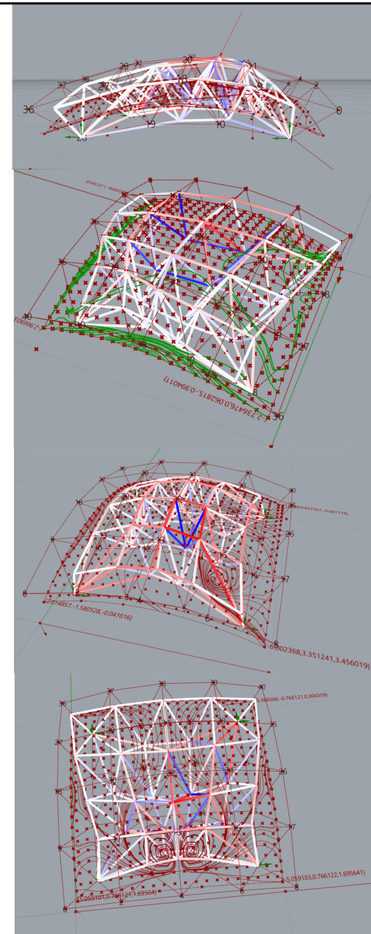




Model preakcji deformacji na podstawie teorii strumieni sił

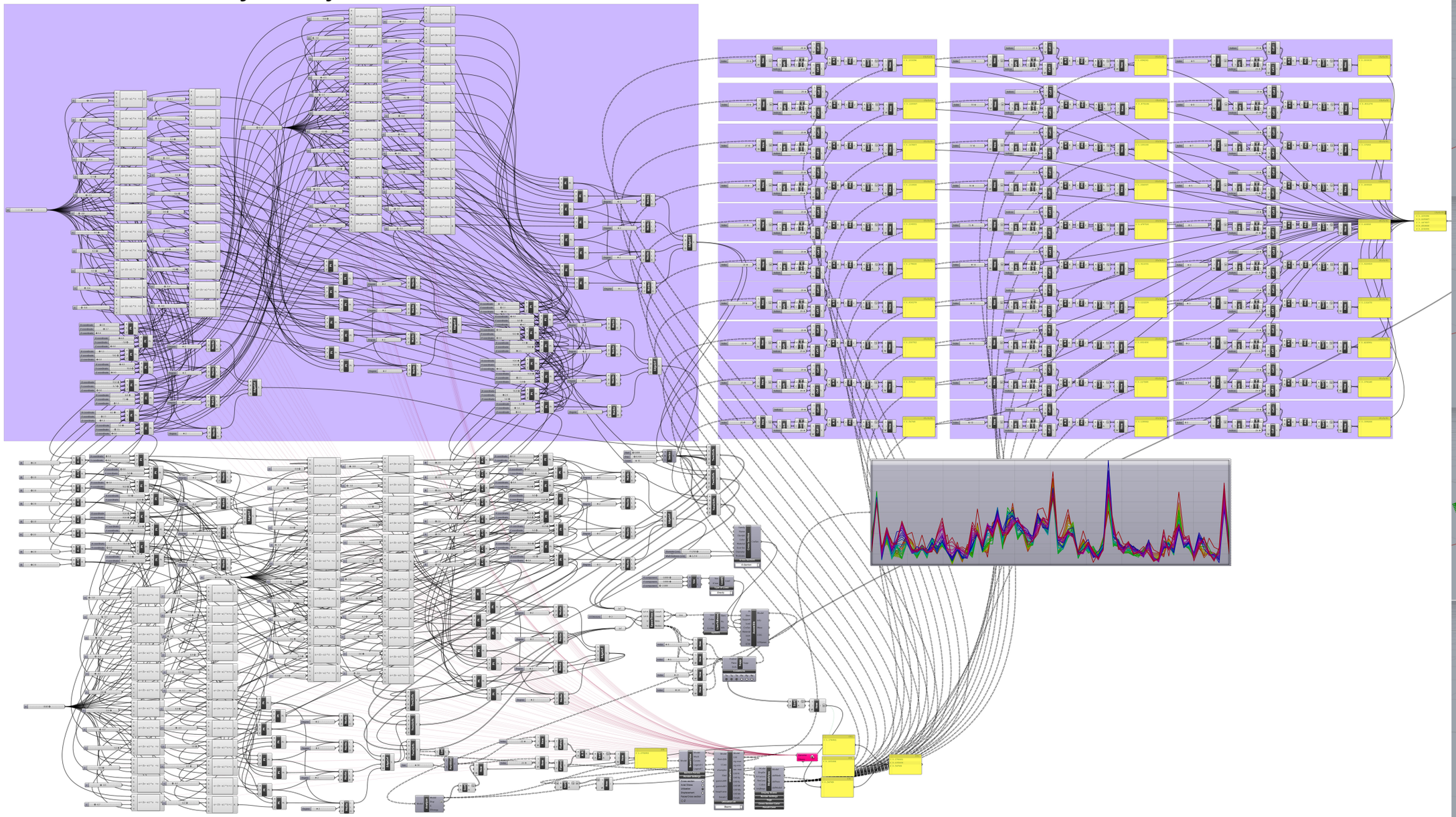
liczba elementów symulacji: 1272

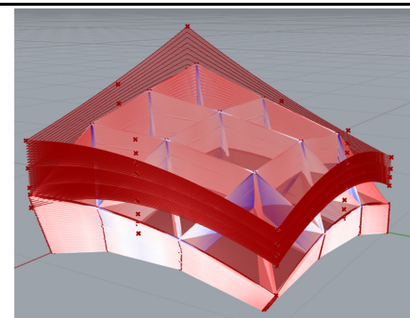


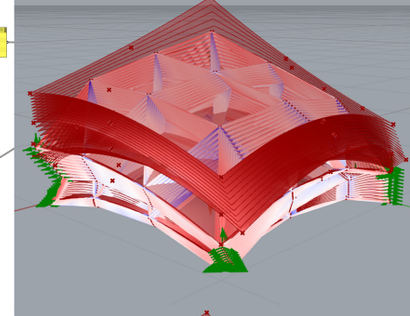


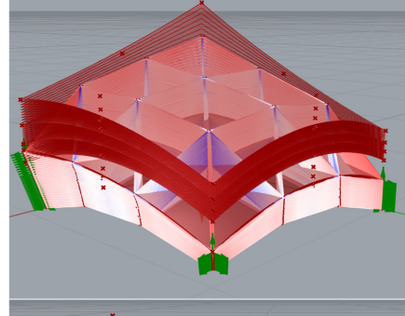
Model preakcji pogrubiania kratowicy

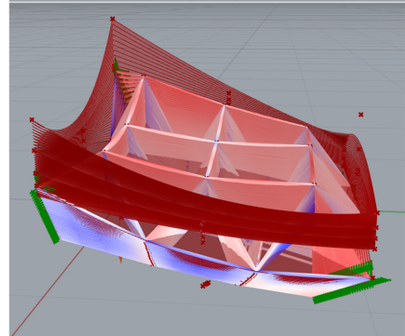
liczba elementów symulacji: 959



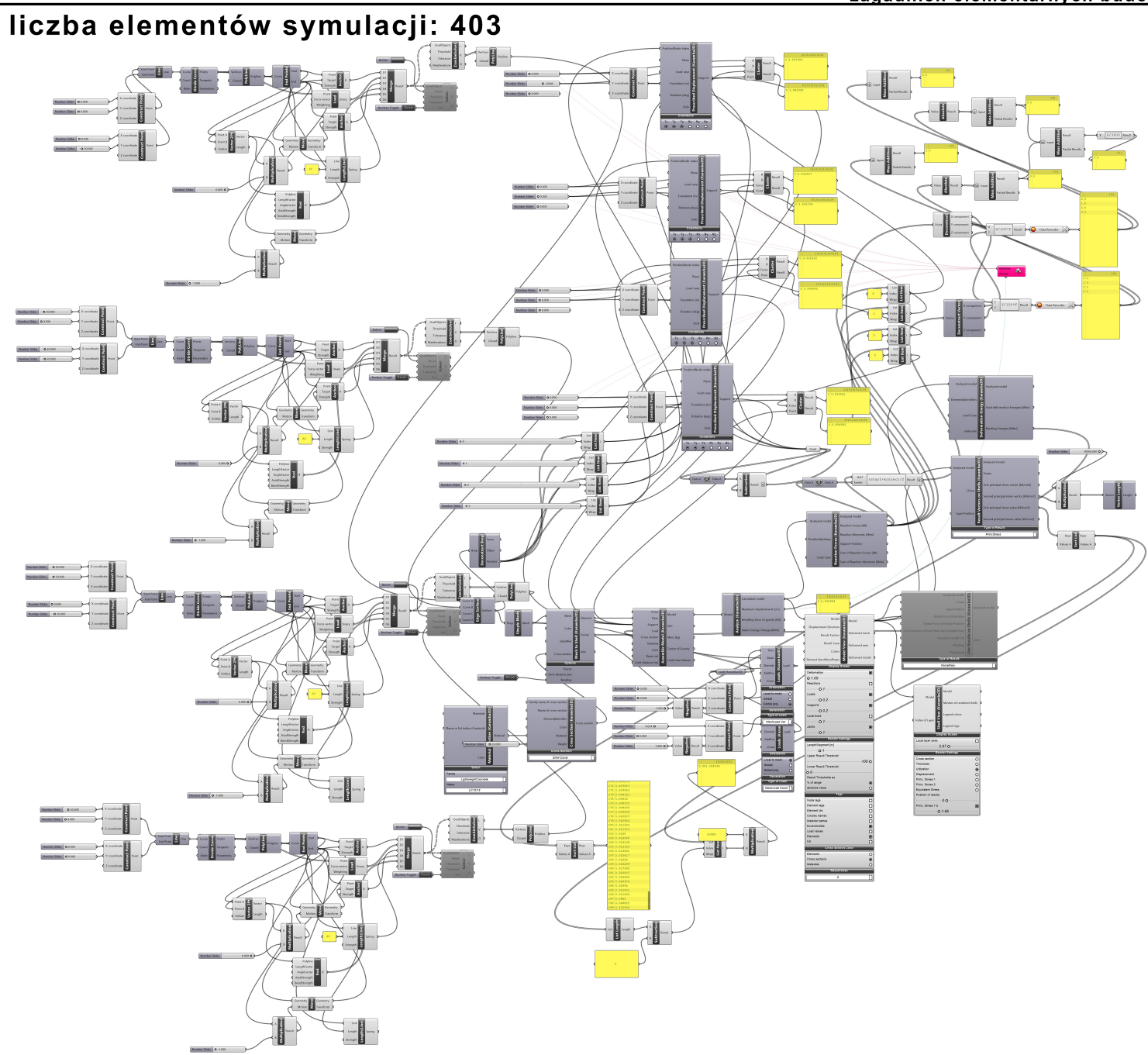


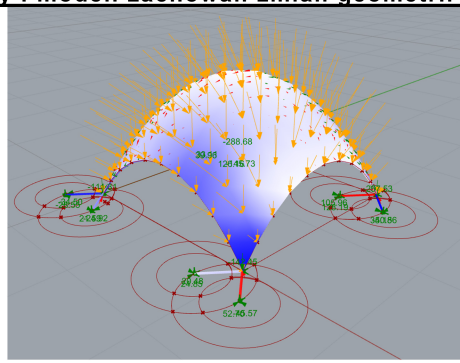


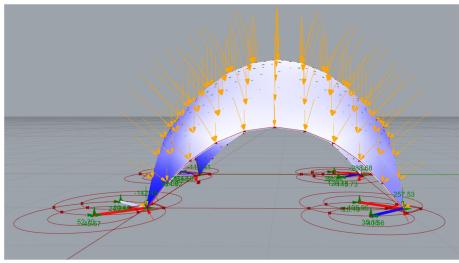


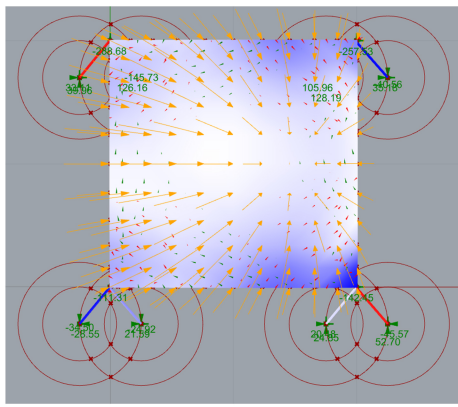


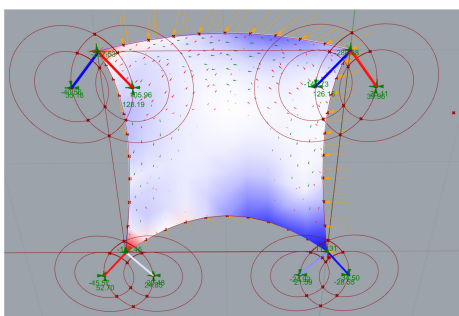
liczba elementów symulacji: 403





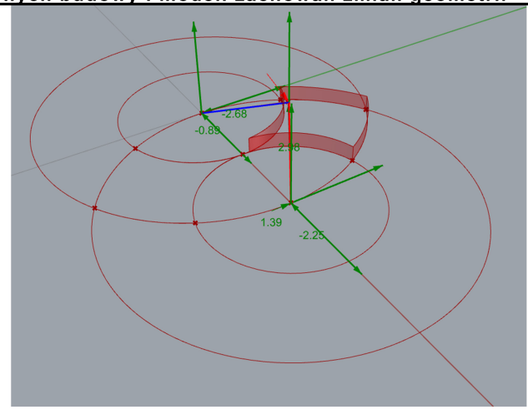


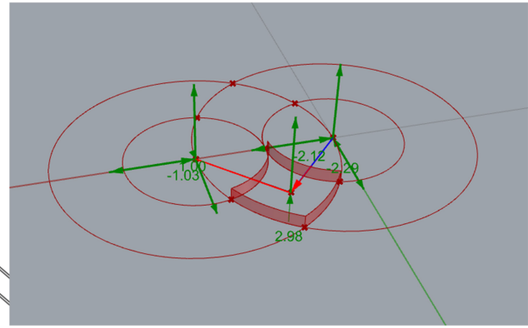


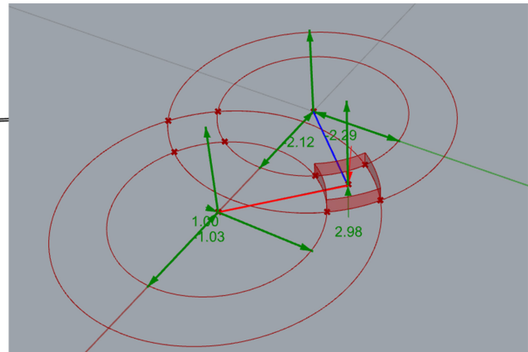


Model sterowania podporą powłoki

liczba elementów symulacji: 91

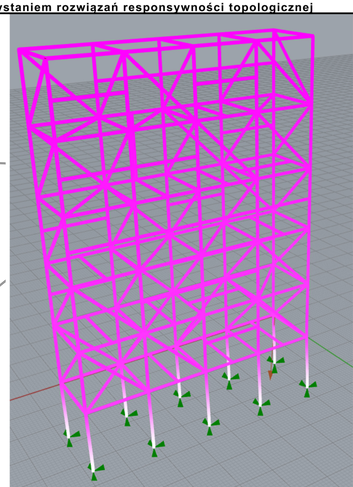


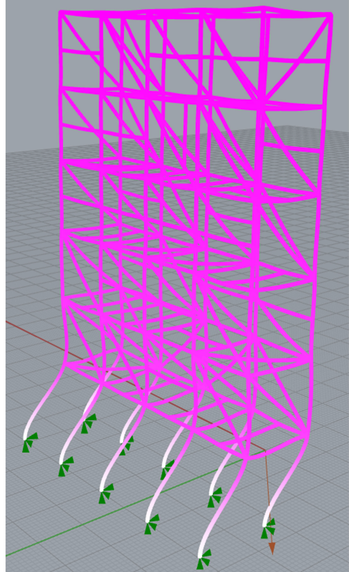




Model modułu responsywnego topologicznie w strukturze poddanej obciążeniom poziomym

liczba elementów symulacji: 615





Model doboru i sterowania prętami stężającymi

liczba elementów symulacji: 318

