

Na prawach rękopisu

Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego
Politechniki Wrocławskiej

Raport serii PRE nr 1/2025

Praca doktorska

**WSPÓLZALEŻNOŚĆ PRZEKROCZENIA
KOSZTU I TERMINU REALIZACJI
W ZRÓŻNICOWANYCH
PRZEDSIĘWZIĘCIACH BUDOWLANYCH**

mgr inż. Tomasz Stachoń

Słowa kluczowe:

budownictwo

przekroczenie kosztu

przekroczenie terminu

współzależność

Promotor: *dr hab. inż. Jarosław Konior, prof. uczelni*

Promotor pomocniczy: *dr hab. inż. Mariusz Szóstak, prof. uczelni*

Wrocław, luty 2025

Autor:

mgr inż. Tomasz Stachoń



.....

Politechnika Wrocławska
Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego
Katedra Budownictwa Ogólnego
Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław
tel. 71 320 23 45 tel./fax. 71 320 36 45

Raport został złożony w Redakcji Wydawnictw Wydziału Budownictwa Lądowego i Wodnego Politechniki Wrocławskiej 28.02.2025 r.

Lista odbiorców:

Recenzenci	3 egz.
Promotor	1 egz.
Promotor pomocniczy	1 egz.
Autor	1 egz.
Archiwum W-2	<u>1 egz.</u>
	Razem: 7 egz.

*Składam serdeczne podziękowania
dr hab. inż. Jarosławowi Koniorowi, prof. PWR
oraz dr hab. inż. Mariuszowi Szóstakowi, prof. PWR
za opiekę merytoryczną, cenne rady i wskazówki
udzielone w trakcie pisania rozprawy doktorskiej.*

*Dziękuję również wszystkim osobom, które
w jakikolwiek sposób przyczyniły się
do podniesienia jakości niniejszej pracy.*

*Niniejszą pracę doktorską dedykuję żonie Dagmarze
oraz dzieciom: Wiktorii, Antoninie i Leonowi.*

Spis treści

ROZDZIAŁ I.....	8
1.1. Wstęp	8
1.2. Tematyka pracy	12
1.3. Obszar badań	13
1.4. Cele pracy	14
1.5. Systematyka pojęć stosowanych w pracy	14
1.6. Współzależność zmiennych	16
1.6.1. Wprowadzenie	16
1.6.2. Współzależność przekroczenia kosztu i przekroczenia terminu.....	18
1.7. Metodyka badań.....	19
1.7.1. Procedura badawcza	19
ROZDZIAŁ II	23
2.1. Wstęp	23
2.2. Dorobek publikacyjny Zespołu Badawczego	23
2.3. Kluczowe pojęcia w literaturze przedmiotu.....	26
2.3.1. Przekroczenie kosztowe	26
2.3.2. Przekroczenie czasowe	27
2.3.3. Współzależność zmiennych.....	28
2.3.4. Krzywa S	30
2.3.5. Metoda Wartości Wypracowanej.....	31
2.4. Metody i narzędzia w literaturze krzywej S i EVM	32
2.5. Podsumowanie przeglądu literatury.....	34
ROZDZIAŁ III.....	35
3.1. Wprowadzenie do Metody Wartości Wypracowanej	35
3.2. Metoda EVM w literaturze przedmiotu	36
3.3. Podstawowe założenia metody EVM	36
3.4. Analiza odchyleń kosztu i terminu	37
3.5. Szacowanie ostatecznego kosztu i terminu zakończenia inwestycji	38
3.6. Praktyczne zastosowanie metody EVM.....	39
3.7. Ograniczenia metody EVM.....	40
3.8. Podsumowanie metody EVM.....	41
ROZDZIAŁ IV	43

4.1. Wprowadzenie	43
4.2. Opis próby badawczej.....	45
4.2.1. Struktura próby badawczej	45
4.2.2. Profil próby badawczej.....	47
4.3. Metodyka przetwarzania danych	48
4.3.1. Etap I – gromadzenie danych.....	49
4.3.2. Etap II – standaryzacja danych	50
4.3.3. Etap III – opracowanie danych	51
4.3.4. Etap IV – przetworzenie danych.....	53
4.3.5. Etap V – walidacja danych	55
4.4. Podsumowanie.....	56
ROZDZIAŁ V.....	57
5.1. Wprowadzenie	57
5.2. Przebieg funkcji krzywej S w zróżnicowanych przedsięwzięciach budowlanych	57
5.2.1. Przebieg krzywej S skumulowanego kosztu planowanego	57
5.2.2. Przebiegi krzywej S skumulowanego kosztu rzeczywistego.....	60
5.2.3. Wnioski z obserwacji przebiegu funkcji krzywej S	64
5.3. Pole krzywych S dla zróżnicowanych przedsięwzięć budowlanych	64
5.3.1. Zakres pola krzywych S w poszczególnych grupach przedsięwzięć budowlanych	65
5.3.2. Wnioski z analizy zakresów pól krzywych S	67
5.4. Wskaźnik wykonania kosztu i terminu w zróżnicowanych przedsięwzięciach budowlanych.....	68
5.4.1. Obserwacje wskaźnika wykonania kosztu w zróżnicowanych przedsięwzięć budowlanych	68
5.4.2. Obserwacje wskaźnika wykonania harmonogramu w zróżnicowanych przedsięwzięciach budowlanych	71
5.4.3. Wnioski obserwacji zmienności wskaźników wykonania kosztu i terminu.....	74
5.5. Podsumowanie analiz przebiegu zmienności kosztu i terminu w zróżnicowanych przedsięwzięć budowlanych.....	74
ROZDZIAŁ VI	76
6.1. Wstęp do badania współzależności pomiędzy przekroczeniem kosztu i przekroczeniem terminu w przedsięwzięciach budowlanych	76
6.2. Przegląd literatury dotyczący współzależności pomiędzy dwiema zmiennymi.....	77
6.3. Badanie współzależności pomiędzy przekroczeniem kosztu a przekroczeniem terminu w przedsięwzięciach budowlanych.....	79

6.3.1. Badanie korelacji przekroczenia kosztu i przekroczenia terminu z zastosowaniem korelacyjnego wykresu rozrzutu	79
6.3.2. Badanie korelacji przekroczenia kosztu i przekroczenia terminu z zastosowaniem współczynnika korelacji Pearsona	83
6.3.3. Badanie korelacji przekroczenia kosztu i przekroczenia terminu z zastosowaniem współczynnika korelacji Spearmana	88
6.4. Podsumowanie analiz korelacji przekroczenia kosztu i przekroczenia terminu	93
6.4.1. Ogólne podsumowanie badania korelacji.....	93
6.4.2. Podsumowanie badania korelacji w odniesieniu do tezy nr 1	94
ROZDZIAŁ VII.....	95
7.1. Wstęp do badania współzależności przekroczenia kosztu i terminu jako prawdopodobieństwa warunkowego.....	95
7.2. Przegląd literatury związanej z analizą prawdopodobieństwa warunkowego	96
7.2.1. Korelacja kosztu z czasem.....	96
7.2.2. Prawdopodobieństwo warunkowe z analizą ryzyka	96
7.2.3. Model sieciowy Bayesa.....	97
7.2.4. Praktyczne zastosowanie metod probabilistycznych	98
7.3. Badanie przekroczenie kosztu i terminu jako zdarzeń warunkowych.....	99
7.3.1. Prawdopodobieństwo przekroczenia kosztu pod warunkiem przekroczenia terminu	100
7.3.2. Podsumowanie badania prawdopodobieństwa przekroczenia kosztu pod warunkiem przekroczenia terminu w zróżnicowanych przedsięwzięciach budowlanych	111
7.3.3. Prawdopodobieństwo przekroczenia terminu inwestycji pod warunkiem przekroczenia jej kosztu.....	112
7.3.4. Podsumowanie badania prawdopodobieństwa warunkowego przekroczenia terminu pod warunkiem przekroczenia kosztu w różnorodnych przedsięwzięciach budowlanych	121
7.4. Podsumowanie badania współzależności przekroczenia kosztu i przekroczenia terminu jako zdarzeń występujących z prawdopodobieństwem warunkowym.	122
ROZDZIAŁ VIII	126
8.1. Wstęp do badania współzależności przekroczenia kosztu i terminu w zróżnicowanych przedsięwzięciach budowlanych metodą EVM	126
8.2. Przegląd literatury w zakresie szacowania kosztu i terminu inwestycji budowlanych	127
8.2.1. Szacowanie ostatecznego kosztu i terminu przedsięwzięć budowlanych różnymi metodami.....	127

8.2.2. Szacowanie ostatecznego kosztu i terminu zakończenia przedsięwzięć budowlanych z wykorzystaniem metody EVM	129
8.3. Szacowanie ostatecznego kosztu i terminu zakończenia przedsięwzięć budowlanych	130
8.3.1. Wyznaczanie szacowanego kosztu przedsięwzięcia EAC	131
8.3.2. Wyznaczanie szacowanego czasu trwania przedsięwzięcia ETTC	136
8.3.3. Szacowany ostateczny koszt i termin zakończenia przedsięwzięć budowlanych a współzależność przekroczenia kosztu i terminu w zróżnicowanych przedsięwzięciach budowlanych	142
8.4. Podsumowanie badania szacowania ostatecznego kosztu i terminu zakończenia przedsięwzięcia.....	146
ROZDZIAŁ IX.....	148
9.1. Wstęp do badania odchylenia kosztu przedsięwzięcia budowlanego w kontekście rezerwy budżetowej	148
9.2. Przegląd literatury w obszarze dopuszczalnych odchyleń kosztu w przedsięwzięciach budowlanych.....	149
9.3. Badania przekroczeń planowanego kosztu inwestycji z wykorzystaniem wykresów pudełkowych.....	150
9.3.1. Analiza przekroczeń kosztu w poszczególnych grupach inwestycji.....	152
9.3.2. Analiza relacji kosztu planowanego i kosztu rzeczywistego w kontekście rezerwy budżetowej	156
9.4. Podsumowanie badania zmienności wartości wskaźnika CPI z wykorzystaniem wykresów pudełkowych.....	158
ROZDZIAŁ X.....	161
10.1. Zakres badawczy pracy	161
10.2. Osiągnięte cele pracy	163
10.3. Udowodnione tezy pracy.....	164
10.4. Podsumowanie końcowe	165
10.5. Kierunek dalszych badań	166
Bibliografia	167
Spis tabel i rysunków.....	182
11.1. Spis tabel	182
11.2. Spis rysunków.....	184
Streszczenie	189
Abstract.....	190

ROZDZIAŁ I

Wprowadzenie

1.1. Wstęp

Koszt i czas są powszechnie uznawane za dwa najważniejsze parametry oceny postępu przedsięwzięć budowlanych. Wspólnie tworzą parę mierników, które umożliwiają analizę wydajności, efektywności i zgodności realizacji przedsięwzięcia z założonymi celami inwestycyjnymi. Pomiar tych parametrów nie tylko pozwala śledzić postęp prac, ale także umożliwia wczesne wykrywanie odstępstw od planu, takich jak przekroczenia budżetu czy opóźnienia w harmonogramie, które mogą zagrażać powodzeniu przedsięwzięcia budowlanego.

W kontekście robót budowlanych koszt jest odzwierciedleniem nakładów finansowych na zasoby, takie jak materiały, sprzęt czy robocizna, które są niezbędne do realizacji określonych zadań. Z kolei czas określa terminy, w których te zadania powinny zostać wykonane, zgodnie z harmonogramem ustalonym w planie przedsięwzięcia. Pojęcie czasu jest tożsame z terminem realizacji. Wydaje się więc, że oba te parametry są ze sobą powiązane, a zmiana jednego z nich powinna wpływać na zmianę drugiego parametru.

A jak przedstawia się ta współzależność jeżeli obie te zmienne zdefiniuje się jako cechy o podstawowym znaczeniu w zarządzaniu przedsięwzięciami budowlanymi, których 70% kończy się przekroczeniem kosztu i terminu realizacji? [PMI¹]:

- zmiennej „koszt” niech odpowiada cecha „przekroczenie kosztu realizacji”
- zmiennej „termin” niech odpowiada cecha „przekroczenie terminu realizacji”

Intuicyjnie i doświadczalnie zwykło się uważać, że „im budujemy dłużej tym wykonujemy drożej”, tzn. jeśli przekraczamy termin realizacji to uzyskujemy gorszy wynik finansowy (rosną kary za zwłokę, koszty stałe budowy, obciążenia podatkowe i pracownicze, itd.). Takie przeświadczenie, będące efektem edukacji a następnie praktyki zawodowej, jest również kreowane w środowisku związanym z zarządzaniem przedsięwzięciami. Powyższe stwierdzenie jest tak powszechne, że można je traktować jako swoistą tezę. Znajduje ono również swoje odzwierciedlenie w literaturze naukowej i branżowej.

O silnej współzależności pomiędzy opóźnieniem i przekroczeniem kosztu piszą autorzy (Anysz & Buczkowski, 2019). W artykułach (Le-Hoai i in., 2008) i (Seddeeq i in., 2019) badacze upatrują jako przyczynę opóźnień w przedsięwzięciach przekroczenie ich kosztu i

¹ PMI – *Project Management Institute* – międzynarodowa organizacja non-profit, zrzeszająca ekspertów i entuzjastów zarządzania projektami.

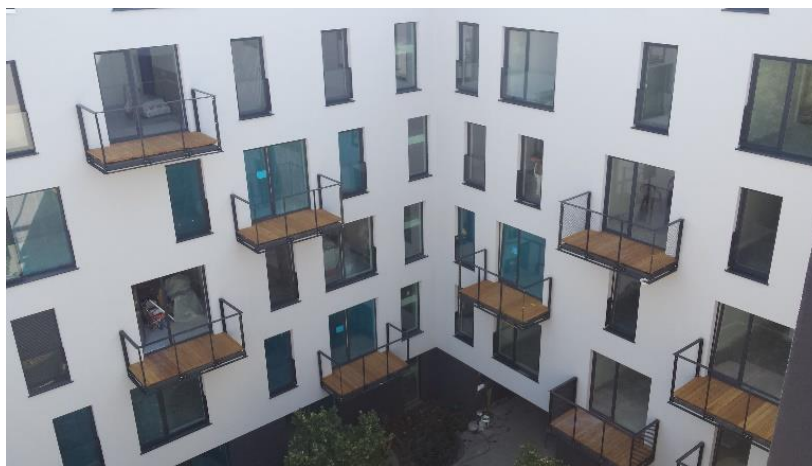
odwrotnie. Traktują tym samym przekroczenie terminu i przekroczenie kosztu jako silnie powiązane.

Potwierdzeniem słuszności poszukiwania odpowiedzi na pytanie czy przedsięwzięcia budowlane o dłuższym terminie realizacji zawsze charakteryzują się większym odchyleniem kosztu niż krótkie zadania inwestycyjne jest artykuł (Belay & Torp, 2017), w którym autorzy udowadniają, że wydłużenie czasu trwania przedsięwzięć nie zawsze skutkuje większym odchyleniem kosztu. Jest to jedna z nielicznych publikacji w której wyraźnie poddano w wątpliwość ścisłej współzależności kosztu i terminu realizacji inwestycji budowlanych.

Wątpliwości pojawiają się również na skutek przeprowadzonych analiz przebiegu kilkudziesięciu przedsięwzięć budowlanych, opisanych w rozdziale IV: Próba Badawcza. Wykazały one możliwość wystąpienia trzech scenariuszy współzależności kosztu wykonania i czasu realizacji, których przykłady przedstawiono w tabelach 1.1. – 1.3.:

Tabela 1.1. Parametry przedsięwzięcia opisanego w scenariuszu 1;

Scenariusz 1: nieprzekroczenie kosztu i przekroczenie terminu			
Nazwa inwestycji:	Inwestycja deweloperska MASTERM – SOKOŁA		
Okres realizacji:	2017 – 2018		
Czas planowany:	13 miesięcy	Czas rzeczywisty:	16 miesięcy
Koszt planowany:	17 002 557,00 zł	Koszt rzeczywisty:	17 002 557,00 zł



Rysunek 1.1. Zdjęcie realizacji przedstawionej w scenariuszu 1.

Tabela 1.2. Parametry przedsięwzięcia opisanego w scenariuszu 2;

Scenariusz 2: przekroczenie kosztu i nieprzekroczenie terminu			
Nazwa inwestycji:	Inwestycja deweloperska NOVAFORM – NOWE OLENDRY		
Okres realizacji:	2019 – 2020		
Termin planowany:	18 miesięcy	Termin realizacji:	18 miesięcy
Koszt planowany:	20 267 522,78 zł	Koszt rzeczywisty:	21 111 078,31 zł



Rysunek 1.2. Zdjęcie realizacji przedstawionej w scenariuszu 2.

Tabela 1.3. Parametry przedsięwzięcia opisanego w scenariuszu 3;

Scenariusz 3: przekroczenie kosztu i przekroczenie terminu			
Nazwa inwestycji:	Hotel FOUR POINTS BY SHERATON w Warszawie		
Okres realizacji:	2017 – 2019		
Termin planowany:	22 miesiące	Termin realizacji:	33 miesiące
Koszt planowany:	42 313 695,00 zł	Koszt rzeczywisty:	58 646 384,15 zł



Rysunek 1.3. Zdjęcie realizacji przedstawionej w scenariuszu 3.

Ale czy naprawdę „długa budowa to droga budowa”? Czy koszt robót budowlanych jest w pełni zależny od terminu ich wykonania? Czy niedotrzymanie terminu realizacji jest zawsze uzależnione od wzrostu kosztu prac budowlanych?

Powyższe pytania powstały w wyniku rozważań autora niniejszej dysertacji w dwóch aktualnych kierunkach:

- a. wykonawstwa budowlanego, którego przykłady opisano w rozdziale VI w punkcie 6.2 pracy;
- b. badań własnych w realizacji różnorodnych przedsięwzięć budowlanych, które to badania były prowadzone przez Zespół Inżynierii Przedsięwzięć Budowlanych w Katedrze Budownictwa Ogólnego Wydziału Budownictwa Lądowego i Wodnego Politechniki Wrocławskiej od roku 2006 pod kierunkiem dr hab. inż. Jarosława Koniora, prof. uczelni (Zespół Badawczy). Efektem tych badań jest cykl 11 publikacji, które powstały w latach 2020 – 2024, w których przedstawiono wyniki badań kilkudziesięciu przedsięwzięć realizowanych w różnych grupach typologicznych. Podejmują one tematykę związaną z odchyleniami kosztu i czasu, opracowaniem krzywych najlepszego dopasowania i analizą przebiegu krzywych kosztowych. Cykl ten został szczegółowo omówiony w ramach przeglądu literatury w rozdziale II niniejszej pracy;

Poszukiwania odpowiedzi na te pytania podążały w kierunku sprawdzenia czy istnieje związek przekroczenia kosztu z niedotrzymaniem terminu w różnorodnych zadaniach inwestycyjnych (i odwrotnie). Tak sformułowany cel badawczy i obserwacje badawcze wskazane w punktach a. i b. oraz przytoczone powyżej stwierdzenie uprawniły autora pracy doktorskiej do postawienia głównej tezy rozprawy:

Przekroczenia kosztu i terminu realizacji nie są cechami całkowicie współzależnymi i wykazują dużą zmienność w czasie realizacji różnorodnych typologicznie przedsięwzięć budowlanych.

Literatura tak sformułowanego problemu badawczego (np. Zhao, 2023 i Kanehira i in., 2021) nie wskazuje jednoznacznych narzędzi do określania współzależności powiązanych zmiennych lub ich cech. Naturalnym badaniem występowania związku zmiennych i siły ich powiązania są statystyczne współczynniki korelacyjne (Ngwenya i in., 2019, Naji i in., 2021)], które nie w pełni odpowiadają na pytanie czy istnieje współzależność przekroczenia kosztu i terminu realizacji przedsięwzięć budowlanych, tym bardziej, że może być ona zmienna w czasie realizacji przedsięwzięcia.

Zatem współzależność przekroczenia kosztu i terminu realizacji w zróżnicowanych przedsięwzięciach budowlanych wyrażono kilkoma praktycznymi metodami pomiaru, które wskazują 3 szczegółowe tezy rozprawy:

1. ***Przekroczenie kosztu i przekroczenie terminu realizacji przedsięwzięć budowlanych nie są cechami wzajemnie skorelowanymi.***
2. ***Prawdopodobieństwa warunkowe cech, określonych jako przekroczenie kosztu i terminu realizacji, nie są stale współzależne w czasie przebiegu przedsięwzięcia budowlanego.***
3. ***Linie trendów szacowanego przekroczenia kosztu realizacji i szacowanego przekroczenia terminu nie wykazują pełnej zbieżności.***

Efektem badawczym pracy doktorskiej jest opracowanie tablicy / macierzy danych liczbowych, których uwzględnienie spowoduje bardziej dokładne określenie planowanego kosztu realizacji czyli mniejsze odchylenie rzeczywiście poniesionych nakładów finansowych od zakładanych w wybranych grupach typologicznych. Tak określony efekt badawczy zaprezentowano w rozdziale IX pracy doktorskiej.

Podjęcie tematyki współzależności przekroczenia kosztu i terminu w przedsięwzięciach budowlanych jest niezwykle istotne z punktu widzenia ich zarządzania oraz optymalizacji procesów inwestycyjnych. Zrozumienie tych zależności pozwoli na lepsze zarządzanie przedsięwzięciami budowlanymi. W dłuższej perspektywie może prowadzić do zwiększenia efektywności realizacji przedsięwzięć, redukcji strat finansowych oraz poprawy planowania prac. Wyniki badań mogą dostarczyć cennych informacji zarówno menedżerom przedsięwzięć, jak i decydentom oraz inwestorom, pomagając im w podejmowaniu bardziej świadomych decyzji, dotyczących alokacji zasobów oraz planowania budżetów i harmonogramów inwestycyjnych.

1.2. Tematyka pracy

Obserwacja przebiegu wielu przedsięwzięć budowlanych, wywodzących się z różnych grup typologicznych produkcji budowlanej i poczyniona w wyniku pracy zawodowej autora wskazuje na istotny problem związany z zachowaniem terminowości robót. Zdaje się to potwierdzać również stwierdzenie formułowane przez PMI, że około 70% przedsięwzięć budowlanych kończy się przekroczeniem terminu i budżetu. Nieterminowość przekłada się więc na dodatkowe koszty jakie są z tego tytułu ponoszone. Intuicyjny jest zatem wniosek, że skoro przekroczony został planowany termin zakończenia przedsięwzięcia, to zapewne nastąpiło również przekroczenie zaplanowanego na jego realizację budżetu.

Podjęta w niniejszej dysertacji tematyka dotyczy zagadnień związanych ze współzależnością pomiędzy przekroczeniem kosztu i przekroczeniem terminu w obszarze przedsięwzięć budowlanych.

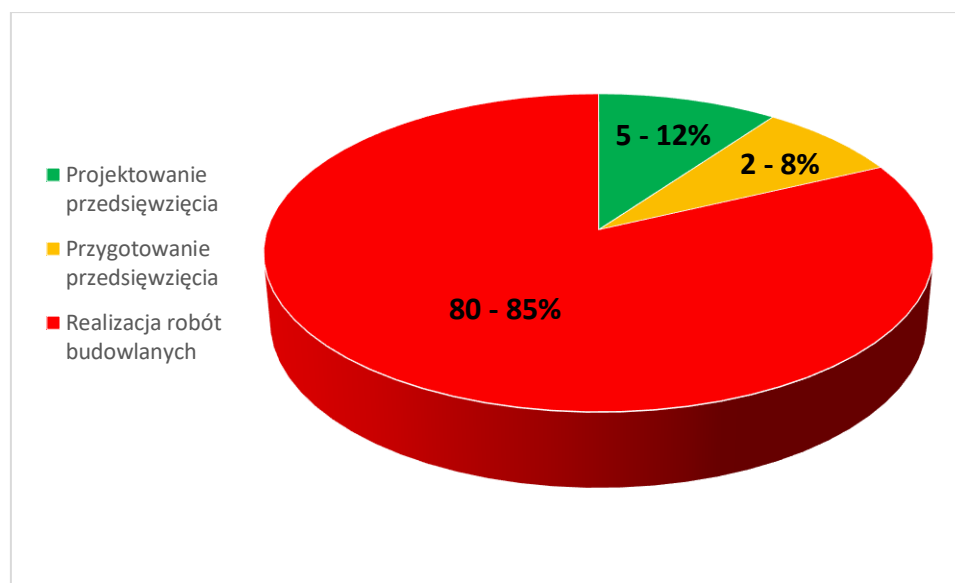
Badanie współzależności zostało przeprowadzone przy użyciu narzędzi statystycznych, takich jak wykorzystanie współczynnika korelacji Pearsona i współczynnika korelacji rang Spearmana. Dzięki temu możliwe było określenie charakteru powiązania pomiędzy tymi dwoma współczynnikami oraz zidentyfikowanie siły ich związku. Ponadto analiza prawdopodobieństw warunkowych określonych powyżej cech zmiennych realizacji pozwoliło na modelowanie trzech różnych scenariuszy odpowiadających przekroczeniu kosztu i terminu. Wykorzystanie Metody Wartości Wypracowanej (EVM) jako narzędzia do wyznaczenia ostatecznego kosztu i terminu zakończenia przedsięwzięcia budowlanego umożliwiło zbadanie wpływu przekroczeń obu cech na etapie realizacji przedsięwzięcia na jego zakończenie. Wszystko to miało na celu uzyskanie odpowiedzi na postawione w punkcie 1.1 pytania dotyczące współzależności pomiędzy przekroczeniem kosztu i przekroczeniem terminu oraz ustalenie charakteru ich powiązania.

Praca obejmuje badanie przypadków rzeczywistych przedsięwzięć budowlanych, zarówno tych o różnej skali, jak i różnym charakterze, co pozwoliło na uzyskanie pełniejszego obrazu współzależności w różnorodnych warunkach realizacyjnych. Z uwagi na posiadany różnorodny materiał badawczy wydzielono pięć grup obiektów: budynki mieszkalne (grupa M), budynki biurowe (grupa O), budynki hotelowe (grupa H), centra handlowe (grupa G) oraz centra logistyczne (grupa L). Materiał badawczy został pozyskany z tego samego obszaru

procesu inwestycyjnego, w jednolitym podejściu do pomiaru, z zachowaniem tych samych zasad i procedur, co pozwoliło na wyciągnięcie właściwych wniosków na temat występowania współzależności w różnych kontekstach realizacji przedsięwzięć budowlanych.

1.3. Obszar badań

Cykl procesu inwestycyjnego obejmuje zazwyczaj pięć etapów: etap koncepcyjny, tworzenie zasobów przedsięwzięcia, etap budowy, czas eksploatacji i rozbiórkę (Temikeev, 2024). Każdy z nich wiąże się z ponoszeniem kosztów na cele wynikające z aktualnych potrzeb. Najbardziej dynamicznym, a zarazem pochłaniającym największe nakłady finansowe, wynoszące nawet około 85% całkowitych kosztów inwestycji, jest okres związany z budową obiektu. Z uwagi na wspomnianą dynamikę tego procesu, realizacja przedsięwzięcia budowlanego jest w dużym stopniu obciążona ryzykiem wystąpienia nieprzewidzianych zdarzeń, które mogą mieć istotny i wielowymiarowy wpływ na tę fazę procesu inwestycyjnego. Zarówno prace koncepcyjne, projektowe i przygotowawcze, oraz późniejsza eksploatacja, ewentualne remonty czy rozbiórka nie pochłaniają tak dużych nakładów kosztowych i czasowych, przebiegając w sposób zdecydowanie bardziej przewidywalny. Z powyższych względów zawężono zakres niniejszej dysertacji na badaniu etapu realizacji budowy, gdzie współzależność przekroczenia kosztu i terminu ma zdecydowanie największy wpływ na przebieg całego procesu inwestycyjnego. (rys. 1.4.).



Rysunek 1.4. Obszar badań na tle cyklu życia obiektu budowlanego. Źródło: opracowanie własne

Dane wchodzące w skład próby badawczej wykorzystywanej do analiz w dalszej części pracy obejmują okres wznoszenia obiektów i pochodzą ze zrealizowanych i zakończonych przedsięwzięć budowlanych na terenie Polski. Posłużyły one do odtworzenia rzeczywistego przebiegu parametrów kosztu i czasu realizacji od momentu rozpoczęcia budowy do jej zakończenia.

1.4. Cele pracy

Analiza literatury przedmiotu oraz własne obserwacje poczynione na próbie badawczej w zakresie poniesionych nakładów kosztowych i czasowych w przebiegu procesu inwestycyjnego pozwoliły na nakreślenie głównego celu pracy:

ustalenie związku pomiędzy przekroczeniem kosztu wykonania a przekroczeniem terminu realizacji różnorodnych zadań inwestycyjnych.

Do osiągnięcia głównego celu rozprawy wyznaczono cele szczegółowe, pozwalające na wielowątkowe zbadanie obszaru przekroczenia kosztu i czasu:

- zbadanie współzależności przekroczenia kosztu i terminu poprzez wyznaczenie współczynników korelacji Pearsona i Spearmana;
- wyznaczenie prawdopodobieństw warunkowych przekroczenia kosztu i terminu, zdefiniowanych jako zdarzenia losowe, w kwartylach realizacji typologicznie dobranych przedsięwzięć budowlanych;
- określenie wpływu wartości prawdopodobieństwa warunkowego na współzależność cech;
- ustalenie dla jakich wartości przekroczeń kosztu, mierzonych w kwartylach czasu realizacji, szacowany koszt przedsięwzięcia budowlanego będzie tożsamy z kosztem rzeczywistym;
- określenie wielkości przekroczeń czasu, mierzonych w kwartylach czasu realizacji, przy których szacowany termin zakończenia przedsięwzięcia budowlanego będzie tożsamy z terminem rzeczywistym;
- wyznaczenie trendów przekroczeń szacowanego kosztu i terminu zakończenia inwestycji;
- wskazanie granicznej wielkości odchylenia rzeczywistego kosztu przedsięwzięcia budowlanego od jego kosztu planowanego, mierzonego w kwartylach czasu realizacji tego przedsięwzięcia, przy którym powstałe odchylenia będą tożsame z kosztem planowanym.

Aby zrealizować przedstawione cele szczegółowe, które mają wykazać słuszność tez przedstawionych w punkcie 1.1. niniejszej rozprawy, opracowano przedstawioną w kolejnych punktach niniejszej rozprawy metodykę badań.

1.5. Systematyka pojęć stosowanych w pracy

Prezentowana praca zawiera szereg pojęć których definicje przedstawiono poniżej w celu uporządkowania oraz właściwej interpretacji.

- Przedsięwzięcie budowlane – zespół czynności wykonywanych na płaszczyźnie wykonawczej, mający na celu zrealizowanie obiektu budowlanego;
- Zarządzanie przedsięwzięciem budowlanym – zespół czynności polegających na planowaniu, koordynacji i kontroli przedsięwzięcia budowlanego, mających na celu efektywne zrealizowanie obiektu, zgodnie z dokumentacją projektową, założonym budżetem inwestycyjnym i w określonym terminie realizacji;

- Termin – data wykonania robót budowlanych, rozumiany jako czas przeznaczony na realizację określonych zadań w harmonogramie realizacji obiektu budowlanego;
- Koszt – wyrażona w pieniądzu wartość nakładów finansowych przeznaczonych na realizację obiektu budowlanego;
- Przekroczenie terminu – przedział czasu pomiędzy zaplanowanym terminem zakończenia robót budowlanych a ich rzeczywistym, późniejszym, terminem zakończenia;
- Przekroczenie kosztu – różnica pomiędzy zaplanowanym kosztem przeznaczonym na realizację robót a kosztem rzeczywiście poniesionym, większym od zaplanowanego;
- Odchylenie terminu – przedział czasu pomiędzy zaplanowanym terminem zakończenia robót budowlanych a ich rzeczywistym terminem zakończenia,
- Odchylenie kosztu – różnica pomiędzy zaplanowanym kosztem przeznaczonym na realizację robót a kosztem rzeczywiście poniesionym;
- Metoda EVM – Earned Value Method – metoda kontroli kosztu i terminu w przebiegu przedsięwzięcia w oparciu o jego zaawansowanie rzeczowe;
- Planowana wartość (*planned value* - PV), określana również jako planowany koszt planowanej pracy (*budgeted cost of work scheduled* - BCWS), planowany w momencie rozpoczynania inwestycji koszt realizacji zadania zgodnie z harmonogramem;
- Wartość wypracowana (*earned value* - EV), określana jako planowany koszt rzeczywiście wykonanej pracy (*budgeted cost of work performer* - BCWP), miara faktycznego postępu prac, czyli koszt całego postępu uzyskanego w inwestycji, liczony do daty raportu i wyrażony w kategoriach planowanego kosztu; BCWP nazywane jest również wartością wypracowaną, gdyż obrazuje to, co osiągnięto, a nie, co zostało wydane;
- Rzeczywisty koszt (*actual cost* - AC), określany jako rzeczywisty koszt rzeczywiście wykonanej pracy (*actual cost of work performer* - ACWP), realny, faktycznie poniesiony koszt wykonanych prac;
- Odchylenie od harmonogramu (*schedule variance* - SV), dotychczasowe odchylenie od harmonogramu, lecz mierzone w jednostkach pieniężnych;
- Odchylenie kosztowe (*cost variance* - CV), dotychczasowe odchylenie kosztowe od planu, mierzone kwotą różnicy finansowej między faktycznym a budżetowym kosztem planowanych zadań;
- Wskaźnik wykonania harmonogramu (*schedule performance index* – SPI) – wyznaczany ze stosunku wartości BCWS/ACWP. Wartości SPI <1 informują o opóźnieniach w realizacji przedsięwzięcia;
- Wskaźnik wykonania kosztu (*cost performance index* – CPI) – wskaźnik wyznaczany ze stosunku BCWP/ACWP określający w jakiej części kosztu planowanego został poniesiony koszt rzeczywisty. Wartości CPI <1 wskazują przekroczenie kosztu przedsięwzięcia;

- EAC (*estimation at completion*) – przewidywany, szacowany koszt zakończenia wykonania obiektu budowlanego;
- ETTC (*estimated time at completion*) – przewidywany, szacowany czas zakończenia wykonania obiektu budowlanego, inaczej szacowany termin zakończenia realizacji ;

1.6. Współzależność zmiennych

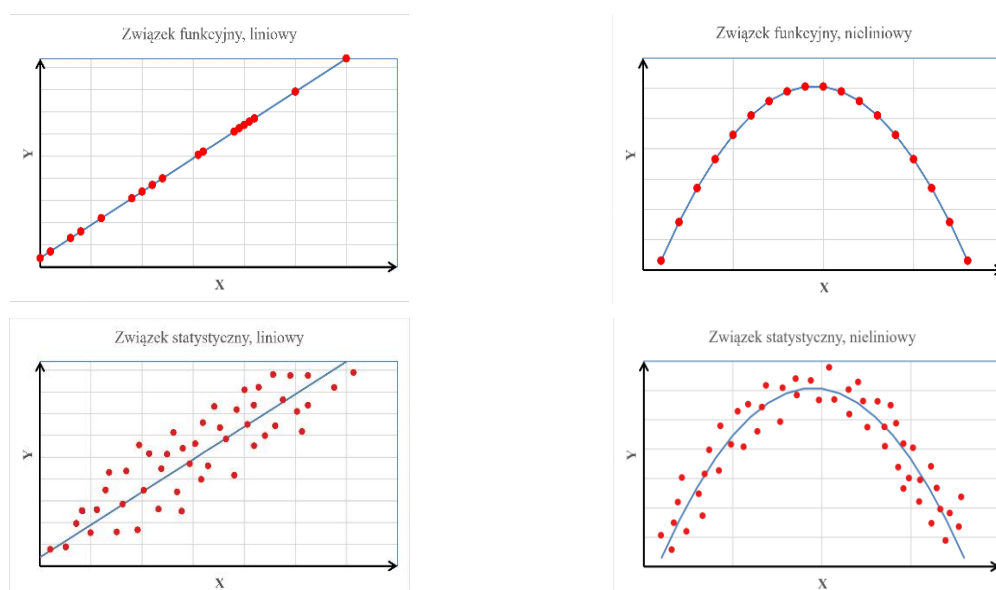
1.6.1. Wprowadzenie

Metody statystyczne badania współzależności dotyczyły analizy struktury zbiorowości i opierały się na obserwacjach tylko jednej cechy lub, jeżeli uwzględniało się w badaniach kilka cech, to każda z nich analizowana była oddzielnie. Do poznania zjawiska niezbędna była analiza zbiorowości z punktu widzenia kilku cech, pomiędzy którymi występowały, lub nie pewne zależności. Określenie postaci i siły zależności występujących pomiędzy cechami zbiorowości były przedmiotem analizy korelacji.

Celem analizy zależności pomiędzy danymi było stwierdzenie, czy zachodziły między nimi jakieś zależności, a także określenie ich siły (za pomocą współczynnika korelacji), postaci (dopasowanie funkcji reprezentującej zależność – aproksymacja) oraz kierunku.

W przypadku analizowanych danych przyjęto, że współzależność między zmiennymi mogła być funkcyjna lub korelacyjna (statystyczna).

Przykłady związków funkcyjnych i statystycznych przedstawiono na poniższym rysunku 1.5.:



Rysunek 1.5. Graficzna interpretacja liniowych i nieliniowych związków funkcyjnych i statystycznych.
Źródło: opracowanie własne na podstawie (Makać W. & Urbanek-Krzysztofiak D., 2020)

Zależność funkcyjna polegała na tym, że zmiana wartości jednej zmiennej powodowała ściśle określoną zmianę wartości drugiej zmiennej. W przypadku tej zależności każdej wartości zmiennej (x) odpowiadała jedna i tylko jedna wartość zmiennej (y). Zależność funkcyjna występowała dla każdego pojedynczego przedsięwzięcia budowlanego.

Aby stwierdzić, czy istnieje związek korelacyjny między badanymi zmiennymi zestawiono szeregi danych zawierające wartości cech dla badanej zbiorowości. W takiej sytuacji zbiorowość była badana ze względu na zmienną X i zmienną Y . Dysponując danymi

empirycznymi możliwe było przedstawienie zmiennych w układzie współrzędnych, w diagramie korelacyjnym (punktowym). W prostokątnym układzie współrzędnych na osi odciętych zaznaczono wartości cechy, którą określano jako zmienną niezależną, a na osi rzędnych wartości cechy określonej mianem zmiennej zależnej. Punkty, które odpowiadają poszczególnym wartościom cech z dwóch szeregów, tworzyły mniej lub bardziej wyraźny zakres występowania wartości, co dawało możliwość wstępnej oceny kierunku zależności, a także jej siły.

Zależności między cechami badano za pomocą opisu funkcji przy wykorzystaniu:

- funkcji liniowych, jeżeli występował związek liniowy;
- funkcji opisywanych przez wielomiany drugiego i wyższych stopni lub inne funkcje, np. wykładnicze, logarytmiczne, trygonometryczne, itp., jeżeli występowała zależność nieliniowa.

Statystyką, opisującą siłę liniowego związku pomiędzy dwiema zmiennymi był współczynnik korelacji, który przyjmował wartość z przedziału $<-1,+1>$. Wartość „-1” oznaczała występowanie pełnej korelacji (liniowej) ujemnej (punkty leżały dokładnie na prostej skierowanej ku dołowi), a wartość „+1” oznaczała pełną korelację (liniową) dodatnią (punkty leżały dokładnie na prostej skierowanej ku górze). Wartość „0” oznaczała brak korelacji liniowej.

Gdy związek badanych dwóch cech ilościowych miał charakter liniowy i cechy te były mierzalne, to najczęściej stosowaną miarą współzależności był współczynnik korelacji liniowej Pearsona. Współczynnik korelacji liniowej Pearsona był miarą siły związku liniowego między cechami. Interpretując konkretną wartość bezwzględną współczynnika przyjęto, że jeżeli wynosił on:

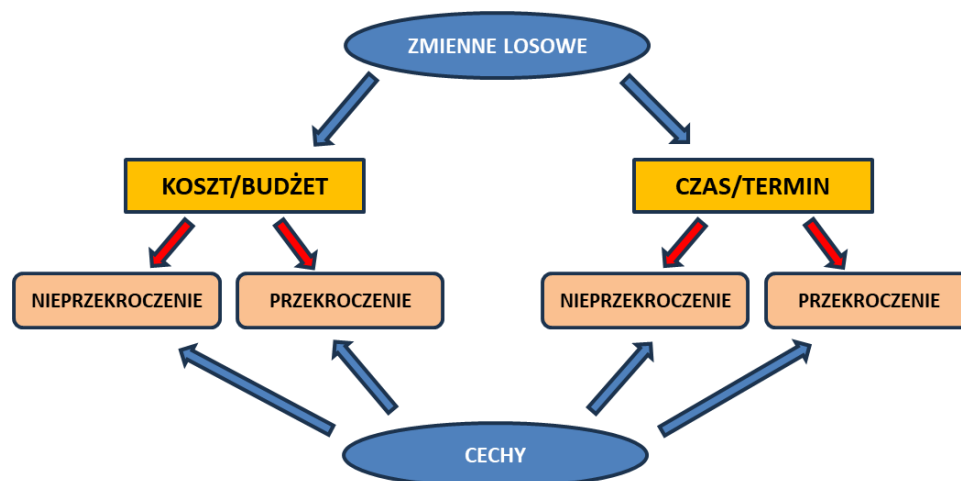
- od 0 do 0,2 – brak związku liniowego między badanymi cechami,
- od 0,2 do 0,4 – zależność niska,
- od 0,4 do 0,7 – zależność umiarkowana,
- od 0,7 do 0,9 – zależność znacząca
- powyżej 0,9 – zależność bardzo silna.

Do określenia występowania współzależności lub jej braku pomiędzy dwiema cechami (ilościowymi lub jakościowymi) zastosowano również badanie współczynnika korelacji rang Spearmana. Współczynnik korelacji rang Spearmana zależał wyłącznie od uporządkowania zaobserwowanych wartości. Mógł zatem być stosowany do dowolnych zmiennych, których wartości można uporządkować rosnąco. Jego interpretacja jest analogiczna do interpretacji wartości współczynnika Pearsona.

Współczynnik korelacji mierzył siłę i kierunek zależności między badanymi zmiennymi. Pozwalał ocenić, czy zmienne były ze sobą powiązane, a jeśli tak, to w jakim stopniu i kierunku.

1.6.2. Współzależność przekroczenia kosztu i przekroczenia terminu

Przekroczenie kosztu i przekroczenie terminu należy traktować jako dwie różne cechy zmiennych z uwagi na możliwe warianty zdarzeń, jakie mogą przyjmować. W prosty sposób wyjaśnia to przedstawiony poniżej diagram (rys. nr 1.6.)



Rysunek 1.6. Graficzna interpretacja zmiennych i zdarzeń w kontekście przekroczenia kosztu i terminu. Źródło: opracowanie własne

W kontekście kosztu przekroczenie należy rozumieć jako poniesienie większych wydatków finansowych niż pierwotnie zaplanowano na wykonanie określonych zadań. Przekroczenie terminu jest równoznaczne z wydłużeniem okresu wykonania robót względem zaplanowanego czasu na ich realizację.

Dane zawarte w opisanym w kolejnym rozdziale próbie badawczej pozwoliły na analizę przekroczeń występujących w określonych przedziałach czasowych (miesięcznych) w trakcie realizacji danego przedsięwzięcia oraz przekroczeń w ujęciu całościowym. Dzięki temu uzyskano kompleksowy obraz przebiegu przekroczeń pozwalający w sposób wielowątkowy przeprowadzić badania współzależności kosztu i terminu w zróżnicowanych przedsięwzięciach budowlanych.

W badanej współzależności cech zmiennych, określonych jako przekroczenie kosztu i przekroczenie terminu, przyjęto podejście deterministyczne. Wynika ono z kilku czynników:

- przyjęcie determinizmu zjawisk jest celowym uproszczeniem, które ma swoje uzasadnienie w aplikacyjności zaproponowanego rozwiązania. Modele deterministyczne są łatwiejsze w ich implementacji;
- prowadzone analizy opierają się na bazie danych pochodzących ze zrealizowanych przedsięwzięć budowlanych, w których określonej wartości jednej zmiennej odpowiada ściśle określona wartość drugiej zmiennej. Na tej podstawie można ustalić wielkość odchylenia i uwzględnić je w budżecie czy harmonogramie. Takie dane mogą być traktowane deterministycznie, ponieważ odzwierciedlają powtarzalne wzorce jako zdarzenia występujące z prawdopodobieństwem równym 1 (100%);
- w analizie odchylenia pewne czynniki mogą mieć charakter probabilistyczny (np. wielkość odchylenia), jednak znajomość wartości empirycznych, pochodzących z pozyskanej próby badawczej, może prowadzić do wystarczająco dokładnych wniosków;

- aplikacyjność wyników w formie deterministycznej nie jest skomplikowana i ma swoje uzasadnienie w odniesieniu do poszczególnych elementów procesu inwestycyjnego, które również mają deterministyczny charakter.

Modele deterministyczne mogą stanowić punkt wyjścia do bardziej zaawansowanych analiz probabilistycznych. Zasadne jest zatem kontynuowanie badań w tym zakresie wykorzystując narzędzia i modele probabilistyczne.

1.7. Metodyka badań

Monitoring przedsięwzięć budowlanych wiąże się z problemami występującymi na wielu różnych płaszczyznach, od tych związanych z technologią prowadzonych prac, poprzez formalno-prawne, które wynikają z przepisów prawa, a na ekonomicznych kończąc. Powiązanie tych wszystkich aspektów stanowi duże wyzwanie z uwagi na ich interdyscyplinarność. Aby powiązać ze sobą wykorzystywane w dalszej pracy metody badawcze usystematyzowano podstawowe terminy pojęcia w celu ich jednoznacznej interpretacji. Następnie opracowano procedurę badawczą, która pozwoliła uszeregować kolejne analizy w logiczny ciąg działań, umożliwiających osiągnięcie celów pracy.

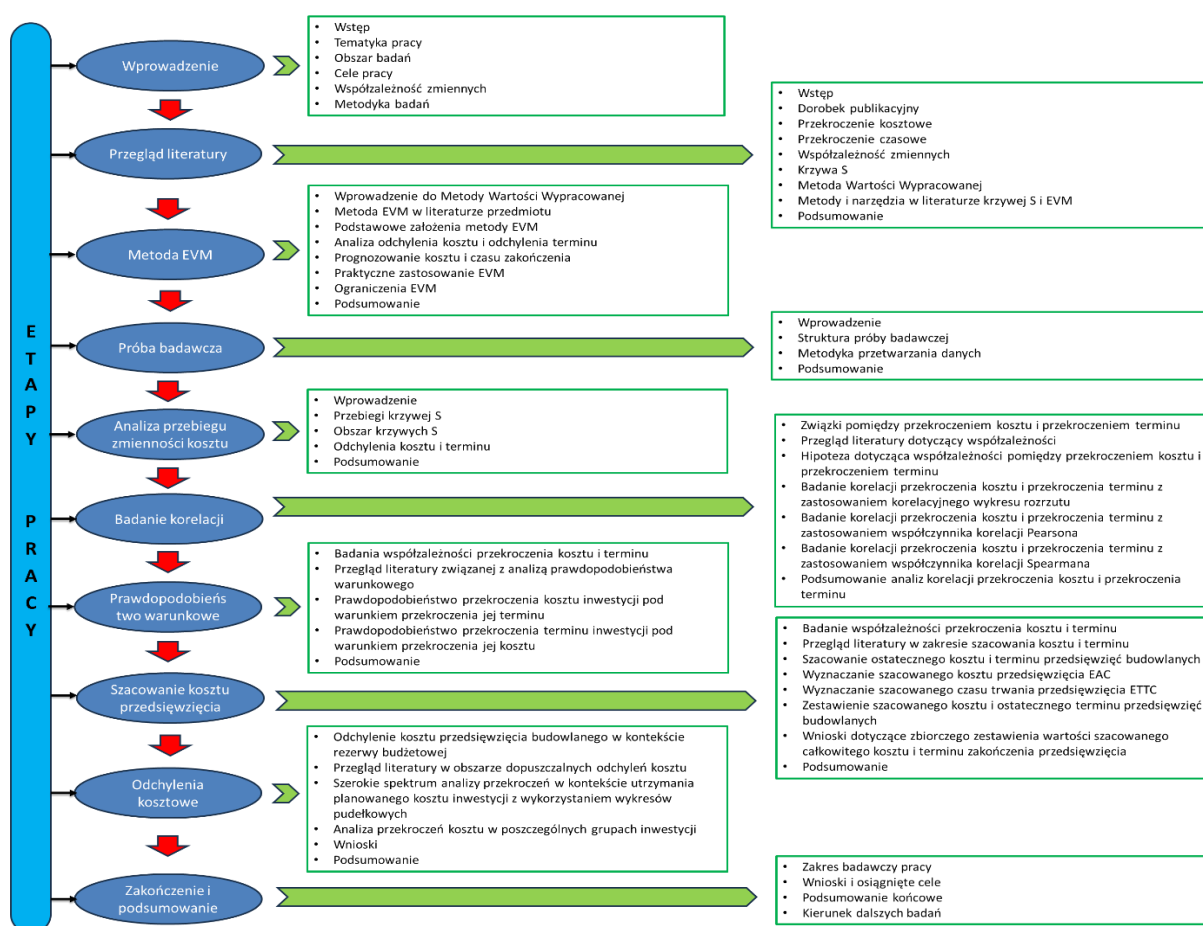
1.7.1. Procedura badawcza

Prezentowana dysertacja składa się z dziesięciu logicznie powiązanych rozdziałów. Jej rozbudowana struktura została przedstawiona na rys. 1.7. w formie schematycznej. Pierwsza część zawiera informacje o charakterze opisowym. Na wstępie przedstawiono istotę problemu badawczego, gdzie przywołując przykłady z realizacji przedsięwzięć budowlanych, poparte spostrzeżeniami i wnioskami ujętymi przez autorów opracowań naukowych nakreślono cel główny, poszerzony o cele szczegółowe. W dalszej części przedstawiono tezy, których treść zdeterminowała dalszy kierunek niniejszej dysertacji. Następnie dokonano wprowadzenia w tematykę pracy nakreślając również obszar badawczy, oscylujący wokół współzależności przekroczenia kosztu i terminu w zróżnicowanych przedsięwzięciach budowlanych. Kolejnym elementem części opisowej było omówienie zagadnień związanych z tematyką współzależności zmiennych. Punkt 5 w rozdziale I jest niejako wprowadzeniem teoretycznym do prowadzonych w dalszej części pracy analiz. Zaprezentowany w rozdziale II przegląd literatury miał na celu zapoznanie się z aktualnym stanem wiedzy począwszy od tematu przekroczenia kosztu, poprzez tematykę współzależności zmiennych na prawdopodobieństwie warunkowym kończąc. Przegląd ten pozwolił również na uporządkowanie stanu wiedzy w analizowanych obszarach oraz zweryfikował słuszność stawianych na wstępie tez. W ramach kolejnej części rozprawy, będącej przygotowaniem do badań, przedstawiono szczegółowy opis metody wartości wypracowanej (EVM), która jest kluczowym elementem dysertacji, ponieważ wyniki uzyskane na jej podstawie zostały następnie wykorzystane w dalszej części pracy. Literatura przedmiotu opisuje różne metody i narzędzia które mogą służyć do monitorowania przebiegu przedsięwzięć budowlanych (Yang & Lai, 2023), (Elghaish & Abrishami, 2021). Charakteryzują się one różnym stopniem skomplikowania i dokładności. Ich zastosowanie wynika często ze specyfiki przedsięwzięć do monitorowania których narzędzia te były aplikowane. W wielu przypadkach opisywane są metody które bazują na metodzie EVM, wprowadzające dodatkowe funkcjonalności takie jak na przykład analiza ryzyka (Kasprowicz & Starczyk-Kołybyk, 2024), czy wprowadzenie nowych wskaźników monitorujących wybrane aspekty przedsięwzięć (Przywara & Rak, 2021b). Dlatego z uwagi na swoją prostotę i użyteczność metoda EVM została wykorzystana w niniejszej pracy do opracowania danych wyjściowych, które zostały

wykorzystane do przeprowadzenia badań w jej kolejnym etapie. Poza opisem metody EVM przedstawiona została próba badawcza (rozdział IV). Opisano w niej źródła pochodzenia danych, sposób ich gromadzenia oraz strukturę z podziałem na grupy będące odzwierciedleniem przynależności do określonej grupy typologicznej w obszarze budownictwa. Dane te zostały następnie wykorzystane w analizach przeprowadzonych w dalszej części pracy. Kolejna część pracy (rozdział V) została poświęcona analizom zgromadzonego materiału badawczego. Miały one na celu ocenę zróżnicowania przebiegu poszczególnych inwestycji na poszczególnych etapach realizacji oraz ocenę wielkości odchyień od wartości średniej. Pozwoliło to ustalić jak bardzo może odbiegać zarówno planowany jak i wypracowany koszt inwestycji na tle innych przedsięwzięć.

Dalsza część niniejszej dysertacji ma charakter badawczy. Przedstawiono w niej analizy wykonane na zgromadzonym materiale badawczym, które zostały przeprowadzone przy użyciu różnych metod.

W rozdziale VI, w ramach przeprowadzonych badań, wykonano analizę korelacji do której wykorzystano trzy powszechnie stosowane metody: korelacyjny wykres rozrzutu, korelację Pearsona oraz korelację Spearmana. Wykorzystanie korelacyjnego wykresu rozrzutu pozwoliło na wstępną ocenę istnienia współzależności. Następnie, z uwagi na ilościowy charakter pozyskanych danych, przeprowadzono badanie korelacji wykorzystując współczynnik Pearsona. Ponieważ w próbie badawczej występowały również wartości odstające, które mogły zakłócić wyniki uzyskane tą metodą, do zbadania korelacji obu cech zastosowano korelację rang Spearmana. Przydzielenie poszczególnym wartościom próby badawczej odpowiednich rang pozwoliło na uszeregowanie danych i uwzględnienie w analizie wartości odstających. Dla uzyskanych współczynników korelacji określono poziom istotności, będący wyznacznikiem jakości uzyskanych wyników.



Rysunek 1.7. Struktura pracy. Źródło: opracowanie własne

W drugim badaniu, opisanym w rozdziale VII, wykorzystano narzędzie statystyczne w postaci prawdopodobieństwa warunkowego. Analizowano warunkowość przekroczenia kosztu i przekroczenia terminu we wszystkich wydzielonych grupach obiektów jak również w całej próbie badawczej. Badania prowadzono dwukierunkowo, określając w pierwszej kolejności prawdopodobieństwo przekroczenia kosztu pod warunkiem przekroczenia terminu. Następnie badanie przeprowadzono również w kierunku odwrotnym badając prawdopodobieństwo przekroczenia terminu pod warunkiem, że przekroczony został koszt. Wykorzystano w tym celu twierdzenie Bayesa.

Kolejny punkt w etapie prac badawczych opierał się na wykorzystaniu metody EVM do określania szacowanych terminów zakończenia oraz szacowanego ostatecznego kosztu inwestycji. Badania przedstawione w rozdziale VIII przeprowadzono w ustalonych, jednakowych przedziałach czasowych przebiegu każdego przedsięwzięcia. Wyniki zaprezentowano w formie zbiorczych wykresów opracowanych dla każdej grupy przedsięwzięć. Pozwoliło to na obserwację trendów oszacowanych cech. Następnie dokonano kompleksowej oceny współzależności pomiędzy nimi.

Ostatnim elementem prac badawczych omówionym w rozdziale IX było przeprowadzenie analizy odchylenia pomiędzy rzeczywistym i zaplanowanym kosztem inwestycji. Narzędziem wykorzystanym w niniejszym badaniu były wykresy pudełkowe, które pozwoliły w prosty i czytelny sposób ująć szereg informacji dotyczących przekroczeń. Następnie opracowano szereg wskaźników, których zastosowanie na etapie planowania

budżetu przedsięwzięcia pozwoli na zmniejszenie dysproporcji pomiędzy kosztem planowanym a rzeczywistym.

Zakończenie niniejszej rozprawy (rozdział X) zawiera syntetyczne podsumowanie wcześniejszych części pracy wraz z oceną rezultatów uzyskanych w poszczególnych analizach. Ponadto nakreśla dalszy kierunek prac związanych z tematyką niniejszej dysertacji.

ROZDZIAŁ II

Przegląd literatury

2.1. Wstęp

Przebieg przedsięwzięć budowlanych mierzony jest najczęściej za pomocą dwóch parametrów: kosztu i czasu. Są to czynniki najczęściej omawiane w literaturze tematu. W ramach poszukiwania odpowiedzi na pytania stawiane we wprowadzeniu – rozdział I niniejszej dysertacji, dotyczące współzależności przekroczenia kosztu i przekroczenia terminu realizacji w zróżnicowanych przedsięwzięciach budowlanych, przeprowadzono analizę istniejącego stanu wiedzy, obejmującą obszary bezpośrednio i pośrednio powiązane z tą tematyką. Miała ona na celu zidentyfikowanie stanu wiedzy postawionym zagadnieniu współzależności obu parametrów oraz zapoznanie się z warsztatem badawczym wykorzystywanym do badań w tym zakresie. W pierwszej kolejności przywołano dorobek publikacyjny Zespołu Inżynierii Przedsięwzięć Budowlanych w Katedrze Budownictwa Ogólnego Wydziału Budownictwa Lądowego i Wodnego Politechniki Wrocławskiej, w tym dorobek własny. Następnie przeanalizowano publikacje, podejmujące tematykę przekroczenia kosztu. Niejednokrotnie autorzy badający ten obszar równolegle analizowali również kolejny obszar tematyczny, eksplorowany w niniejszej pracy – przekroczenie czasu. Istotne z punktu widzenia tematyki pracy było przeprowadzenie rozpoznania literaturowego w tematyce współzależności zmiennych. Dlatego też w punkcie 5 niniejszego rozdziału przedstawiono aktualny stan wiedzy w tym zakresie. Kolejnym krokiem była analiza publikacji na temat krzywej S, jako jednego z kluczowych narzędzi do prezentacji narastających przepływów finansowych. Ostatnim obszarem objętym analizą literatury była metoda EVM oraz jej wykorzystanie do monitoringu przebiegu procesów budowlanych, szczególnie w obszarze odchyleń kosztu i terminu.

Z uwagi na wielowątkowy charakter badań prowadzonych w dalszej części pracy, w każdym z rozdziałów badawczych przedstawiono dodatkowo szczegółowe przeglądy literatury odnoszące się bezpośrednio do przeprowadzonych badań.

2.2. Dorobek publikacyjny Zespołu Badawczego

Obszerne badania własne związane ze współzależnością kosztu i czasu w zróżnicowanych przedsięwzięciach budowlanych prowadzone były również przez autora niniejszej dysertacji w ramach pracy w Zespole Inżynierii Przedsięwzięć Budowlanych w Katedrze Budownictwa Ogólnego Wydziału Budownictwa Lądowego i Wodnego Politechniki Wrocławskiej, do którego dołączył w 2017 roku. Efektem prac badawczych prowadzonych w Zespole Badawczym są pomiary i analizy prowadzone od 2006 roku oraz publikacje naukowe dokumentujące przeprowadzone badania. Jednym z pierwszych artykułów, które są efektem pracy badawczej zespołu, jest artykuł (Konior & Szóstak, 2020c). Analizowano w nim przykład inwestycji budowlanej, porównując koszty zaplanowanych prac z kosztami rzeczywistymi,

faktycznie poniesionymi. Analiza wyników w postaci wykresów i tabel pozwoliła na identyfikację przyczyn opóźnień i niedotrzymania budżetu inwestycji. Kolejny artykuł (Konior & Szóstak, 2020b) prezentował autorską metodykę planowania kosztów w czasie realizacji projektów budowlanych. Jeden z głównych wniosków mówił, że w celu pomyślnego wdrożenia przedsięwzięć budowlanych, konieczne jest odpowiednie planowanie i monitorowanie czasu i kosztu realizacji. Badanie metod analizy i oceny odchylenia w realizacji przedsięwzięć budowlanych było przedmiotem artykułu (Konior & Szóstak, 2020a). Wykazano w nim, że właściwe monitorowanie kosztów i czasu pozwala na zarządzanie inwestycją i reagowanie na ryzyko. Badania oparte na danych z 536 technicznych i finansowych analiz, stanowiły podstawę kolejnego artykułu na temat skumulowanego kosztu poniesionego zróżnicowanych przedsięwzięciach budowlanych (Konior & Szóstak, 2021a). Przeanalizowano w nim różne przedsięwzięcia budowlane i porównano koszt planowany, poniesiony i wypracowany. Badania przeprowadzono z wykorzystaniem metody Earned Value Method, umożliwiającej ocenę wykonania realnych budżetów inwestycyjnych. W artykule (Konior & Szóstak, 2023) autorzy analizowali i porównywali koszty inwestycji budowlanych, opierając się na danych pochodzących z raportów Bankowego Inspektora Nadzoru (Bauer – Celný i in., 2006 – 2024). Wykresy zobrazowały planowane, poniesione i wypracowane wartości kosztów w ośmiu grupach typologicznych budownictwa. Wnioski przedstawione w niniejszej publikacji mogą mieć zastosowanie przy planowaniu budżetów inwestycyjnych i czasu trwania przedsięwzięć w różnych grupach typologicznych. W artykule (Konior, 2022) omówiono nową metodę analizy i oceny odchylenia opartą na metodzie EVM w realizacji inwestycji budowlanych w wybranych sektorach budownictwa. Przeprowadzone badania w trzech grupach obiektów (obiekty zamieszkania zbiorowego, hotele, obiekty handlowo-usługowe) pozwoliły na określenie wskaźników efektywności kosztowej i czasowej różnych zadań inwestycyjnych, które zostały przedstawione w formie wykresów pudełkowych. Nowa metoda daje możliwość kwantyfikacji ryzyka i podejmowania odpowiednich działań usprawniających w odpowiednim czasie. Badania prowadzone na grupie budynków zamieszkania zbiorowego były przedmiotem kolejnego artykułu (Szóstak, 2021). Zaproponowano model opisujący planowanie kosztów i prognozowanie odchylenia finansowych, który umożliwił określenie planowanych nakładów finansowych i miesięcznych kosztów. Analizy badawcze wykazały, że planowane zaawansowanie prac i poniesionych kosztów na początku inwestycji jest większe niż w rzeczywistości. Badania kształtu i przebiegu krzywych kosztów dla różnych typów budynków i różnych grup typologicznych przeprowadzono w artykule (Szóstak, 2023b). Analiza rzeczywistych kosztów poniesionych na zadania inwestycyjne oraz prognozowanie procesu budowlanego pozwoliły wyznaczyć krzywe najlepszego dopasowania oraz przestrzenie krzywych kosztowych. Wykazano, że ich uwzględnienie w procesie planowania inwestycji wydatnie wpłynie na jej prawidłowy przebieg. Badania przeprowadzone w kolejnym artykule (Szóstak, 2023a) wykazały konieczność użycia wielomianu 3 – go stopnia do określenia krzywej kosztów i w konsekwencji do wiarygodnego prognozowania przebiegu przedsięwzięć budowlanych. Krzywe kosztów utworzyły obszar najbardziej prawdopodobnego przepływu kosztów narastających. Zaleca się stosowanie krzywych kosztowych, a nie pojedynczych modeli matematycznych do planowania finansowego przebiegu inwestycji. W artykule (Konior & Stachoń, 2024b) przedstawiono analizę i ocenę trzech rodzajów kosztów w zróżnicowanych przedsięwzięciach budowlanych. Wskazano podstawowe przyczyny odchylenia kosztowych od wartości wypracowanych oraz zaobserwowano podobieństwa w przebiegu krzywych przepływów pieniężnych, zarówno w ramach tych samych grup obiektów budowlanych, jak i pomiędzy nimi. Do podobnych spostrzeżeń doprowadziły analizy zaprezentowane w (Konior

& Stachoń, 2024a). Polegały one na ocenie przebiegu przedsięwzięć budowlanych w zakresie wypracowanego kosztu. Wskazano podstawowe przyczyny odchylenia kosztowych robót rzeczywiście wykonanych. W artykule (Szóstak i in., 2024a) autorzy zaprezentowali analizy przeprowadzone na danych zawartych w bazie wiedzy, opartej na raportach Bankowego Nadzoru Inwestycyjnego. Wyznaczono krzywe najlepszego dopasowania oraz określono oczekiwany obszar skumulowanego kosztu rzeczywistego. Efekty badań w formie wykresów funkcji wielomianowych mogą być wykorzystane w branży budowlanej. Opracowano także metodykę predykcji całościowego budżetu zadania inwestycyjnego (CAPEX) w wybranych przedsięwzięciach budowlanych, która łączy krzywą S, funkcje wielomianowe i obszar skumulowanego kosztu wypracowanego. Taka skonsolidowana metodyka badawcza może być w przystępnej i aplikacyjnej formie wykorzystywana przez menedżerów budowlanych i uczestników procesu inwestycyjnego.

Wykaz omówionych powyżej artykułów, autorstwa zespołu badawczego przedstawiono w tabeli 2.1.

Tabela 2.1 Zestawienie publikacji wynikających z badań prowadzonych przez Zespół Inżynierii Przedsięwzięć Budowlanych w Katedrze Budownictwa Ogólnego Wydziału Budownictwa Lądowego i Wodnego Politechniki Wrocławskiej w latach 2020 - 2024

Lp.	Autorzy	Rok publikacji	Tytuł publikacji	Czasopismo
1	Konior J. Szóstak M.	2020	The S-curve as a tool for planning and controlling of construction process - case study	Applied Sciences
2	Konior J. Szóstak M.	2020	Methodology of planning the course of the cumulative cost curve in construction projects	Sustainability
3	Konior J. Szóstak M.	2020	Odchylenia i wykonania budżetu oraz harmonogramu przedsięwzięć budowlanych monitorowanych przez nadzór bankowy na przykładzie budynków zbiorowego zamieszkania	Przegląd Naukowy. Inżynieria i Kształtowanie Środowiska
4	Konior J. Szóstak M.	2021	Cumulative cost spent on construction projects of different sectors	Civil Engineering and Architecture
5	Konior J. Szóstak M.	2021	Course of planned, actual and earned cost curves of diverse construction investments	International Journal of Construction Management
6	Szóstak M.	2021	Planning the time and cost of implementing construction projects using an example of residential buildings	Archives of Civil Engineering
7	Szóstak M.	2022	Best fit of cumulative cost curves at the planning and performed stages of construction projects	Buildings
8	Szóstak M.	2022	Forecasting the course of cumulative cost curves for different construction projects	Civil and Environmental Engineering Reports
9	Konior J.	2022	Determining cost and time performance indexes for diversified investment tasks	Buildings
10	Konior J. Szóstak M.	2023	Prognozowanie przebiegu krzywych kosztów narastających w różnorodnych przedsięwzięciach budowlanych.	Przegląd Budowlany
11	Konior J. Stachoń T.	2024	Trend skumulowanych kosztów planowanych, poniesionych i wypracowanych w realizacji obiektów budowlanych	Przegląd Budowlany

12	Konior J. Stachoń T.	2024	Przebieg krzywych kosztów wypracowanych w zróżnicowanych sektorach inwestycyjnych	Przegląd Budowlany
13	Szóstak M. Stachoń T. Konior J.	2024	Course of Cumulative Cost Curve (CCCC) as a Method of CAPEX Prediction in Selected Construction Projects	Applied Sciences

Przeprowadzone wcześniej analizy, sformułowane na ich podstawie tezy oraz cele badawcze pozwoliły na ukierunkowanie przeglądu literatury, który obejmuje swoim zakresem tematykę przekroczenia kosztu, przekroczenia czasu, współzależności zmiennych, analiz krzywej S oraz zagadnień związanych metodą EVM.

2.3. Kluczowe pojęcia w literaturze przedmiotu

2.3.1. Przekroczenie kosztowe

Przekroczenie kosztu to sytuacja, w której rzeczywisty koszt realizacji przedsięwzięcia budowlanego jest wyższy od planowanego. Większość autorów dowodzi, że w większości przedsięwzięć budowlanych rzeczywiste koszty rosną podobnie jak koszty planowane (Karunakaran i in., 2018; Plebankiewicz, 2018) i zjawisko to stało się niemal naturalną częścią przedsięwzięć budowlanych. Rozbieżności między planowanymi a rzeczywistymi kosztami niosą za sobą negatywne skutki i konsekwencje finansowe dla sektora publicznego i prywatnego, ale również konsekwencje gospodarcze dla całej branży budowlanej.

Niedokładne oszacowane kosztów na etapie planowania przedsięwzięcia budowlanego, tj. podczas budżetowania i określania zakresu zadania oraz niewłaściwe zaplanowanie procesu inwestycyjnego jest jedną z najczęściej omawianych w literaturze przyczyn wystąpienia przekroczenia kosztowego (Asiedu & Adaku, 2020). Innymi przyczynami przekroczenia kosztów są m.in. błędy projektowe, braki w dokumentacji projektowej prowadzące do zmian projektowych (Aslam i in., 2019; Han i in., 2013; Larsen i in., 2016; Love i in., 2009; Polat i in., 2014), nierealistyczny czas trwania robót budowlanych (Gunduz & Maki, 2018), brak dostępności wykwalifikowanej siły roboczej (Derakhshanalavijeh & Teixeira, 2017), brak wykwalifikowanej kadry zarządzającej (A. S. A. M. Alhammadi & Memon, 2020), brak skutecznej koordynacji między uczestnikami procesu inwestycyjnego (Yap & Skitmore, 2020), brak doświadczenia wykonawców robót (Amusan i in., 2018), zmienne warunki atmosferyczne (A. B. Senouci & Mubarak, 2016a).

Stosując inne podejście do tematyki przekroczenia kosztu autorzy (Przywara & Rak, 2018) badali jeden ze składników kosztów przedsięwzięć budowlanych jakim jest robocizna. Stwierdzili, że stawki robocizny kosztorysowej są uzależnione od sytuacji rynkowej, a duże przedsiębiorstwa budowlane często korzystają z podwykonawców o niższych kosztach pracy. Pozwala to zmniejszyć koszty związane z robocizną, przyczyniając się tym samym do zmniejszenia sumarycznych przekroczeń powstałych w trakcie przebiegu inwestycji.

Przekroczenie kosztu ma istotny wpływ na mnogość czynników związanych z produkcją budowlaną, między innymi na rentowność podmiotów realizujących prace budowlane. W artykule (Przywara & Rak, 2023) przeprowadzono analizę ekonomiczną przerwania robót na placu budowy. Wykorzystano narzędzia metody wartości wypracowanej (EVM) i oceniono koszty oraz tempo realizacji. Analiza ekonomiczna miała na celu ocenę

opłacalności kontynuowania prac na budowie, będącej efektem niedoszacowania kosztu robót budowlanych, skutkującego jego przekroczeniem.

Istotny wpływ na wielkość przekroczeń kosztów przedsięwzięć ma również ich właściwe prognozowanie już we wczesnym etapie realizacji. Wykorzystanie sztucznej inteligencji oraz uczenia maszynowego w predykcji kosztu przynosi zadowalające rezultaty (Juszczak, 2020). Opracowane w ramach badań trzy modele predykcyjne służące do estymacji kosztów konstrukcji stropów w budynkach wykazały zbliżoną skuteczność prognozowania, wskazując przewagę modelu opartego o metodę wektorów nośnych jako najdokładniejszą. Skuteczność takiego podejścia potwierdzają badania przedstawione w pracy (Juszczak i in., 2023), wykorzystujące modele oparte na sieciach neuronowych. Przeprowadzone analizy wykazały lepszą skuteczność predykcyjną w porównaniu z modelami opartymi na podejściu klasycznym i na wykorzystaniu regresji liniowej.

2.3.2. Przekroczenie czasowe

Przekroczenie czasu to sytuacja, w której rzeczywisty czas trwania przedsięwzięcia budowlanego jest dłuższy niż czas zaplanowany w harmonogramie i w zawartej umowie o roboty budowlane (Hamzah i in., 2011). Badania dotyczące czasu realizacji przedsięwzięć budowlanych wykazały, że aż 70% przedsięwzięć doświadczyło przekroczenia czasu, dla których średni czas wyniósł od 10% do 30% pierwotnego czasu trwania (Assaf & Al-Hejji, 2006). Z kolei 68% chińskich międzynarodowych przedsięwzięć budowlanych było poważnie opóźnionych, co miało wpływ na globalny rynek budowlany (H. Sun i in., 2022). Ze względu na skalę, międzynarodowe projekty wiążą się ze znacznymi inwestycjami gospodarczymi, które w przypadku niepowodzenia mogą poważnie wpłynąć na gospodarki wielu krajów i ich regionów (Herrera i in., 2020). Badanie przeprowadzone przez (Faridi & El-Sayegh, 2006) wykazało, że 50% przedsięwzięć budowlanych w Zjednoczonych Emiratach Arabskich napotyka na opóźnienia i nie jest ukończonych na czas.

Wnioski będące efektem badań (Przywara & Rak, 2021a) wskazują, że studium wykonalności pomaga monitorować i identyfikować opóźnienia i odchylenia kosztowe w przedsięwzięciu budowlanym, a model decyzyjny pozwala na wprowadzanie usprawnień i kontrolowanie czasu realizacji.

Istotne skrócenie czasu realizacji przedsięwzięć budowlanych można uzyskać już na etapie planowania (Hejducki & Rogalska, 2005). Zaproponowano zastosowanie teorii ograniczeń oraz metody harmonogramowania łańcucha krytycznego w celu skrócenia czasu realizacji poprzez analizę zależności między czasem trwania procesów a buforem łańcucha krytycznego. Stwierdzono, że rozwój tych metod oraz ich implementacja w procesie planowania realizacji robót mogą skutecznie przyczynić się do optymalizacji harmonogramów budowlanych przekładającej się na zmniejszenie opóźnień na etapie realizacji. Optymalizacja projektów budowlanych na etapie planowania z wykorzystaniem metody priorytetowego harmonogramowania wieloobektowych przedsięwzięć budowlanych pozwoliła na redukcję całkowitych kosztów realizacji o około 3,6% oraz czasu o 0,7% (Sroka, 2023). Metoda ta umożliwia elastyczne uwzględnienie ograniczeń technologiczno-organizacyjnych, co przyczynia się do minimalizacji kosztów i czasu realizacji projektu. Wyniki badań wykazały również, że brak świadomości wpływu kolejności realizacji obiektów oraz niedostateczne narzędzia programistyczne mogą prowadzić do przekroczenia budżetu i harmonogramu inwestycji.

Optymalizacja czasu realizacji nie zawsze pociąga za sobą również obniżenie kosztu przedsięwzięć budowlanych (Anysz & Krzemiński, 2019). Na podstawie przeprowadzonych analiz kosztów realizacji przedsięwzięć budowlanych stwierdzono, że optymalizacja harmonogramu pod względem maksymalnego skrócenia czasu nie zawsze skutkuje zmniejszeniem kosztu. Potwierdzają to przykłady opracowane w oparciu o zaproponowany w pracy model.

Na podstawie przeglądu literatury wyróżnić można główne przyczyny opóźnień przedsięwzięć budowlanych. Jedną z najczęściej wskazywanych przez kolejnych badaczy przyczyn opóźnień jest nieprawidłowe opracowanie harmonogramu prac (Gebrehiwet & Luo, 2017), rozumiane również jako nieefektywne planowanie zasobów (Susanti, 2020), lub niedokładne oszacowanie czasu trwania poszczególnych zadań jak i całego przedsięwzięcia budowlanego (Negesa, 2022). Inne przyczyny powstawania opóźnień przedsięwzięć budowlanych to m.in. trudności finansowe wykonawców (Egwim i in., 2021), zmiany w zakresie projektu w trakcie realizacji (Zidane & Andersen, 2018), brak skutecznej komunikacji między uczestnikami procesu inwestycyjnego (Arantes & Ferreira, 2021; Othman i in., 2018), niedobór wykwalifikowanej siły roboczej (Mahamid, 2022), błędy wykonawcze (Latif i in., 2019), niska wydajność brygad roboczych (Kubečková & Smugala, 2021), warunki atmosferyczne (Al Kulabi & Atiea, 2022), jak również niedostateczne rozpoznanie terenu pod względem archeologicznym (Apollo i in., 2019).

Kluczowym zagrożeniem dla terminowej realizacji projektów budowlanych jest również absencja pracowników (Rogalska & Hejducki, 2022). Jej wpływ na czas realizacji został przeanalizowany przy użyciu danych statystycznych oraz probabilistycznych harmonogramów opartych na różnych funkcjach gęstości prawdopodobieństwa. Analiza wykazała znaczący wpływ absencji pracowników na ostateczny termin zakończenia przedsięwzięć budowlanych. W związku z tym autorzy zalecają uwzględnianie ryzyka absencji w procesie harmonogramowania probabilistycznego, zwłaszcza w ramach metodologii BIM.

2.3.3. Współzależność zmiennych

Współzależność czasu i kosztu w realizacji przedsięwzięć budowlanych jest kluczowym aspektem zarządzania projektami budowlanymi. Odnosi się do wzajemnego wpływu, jak czas realizacji przedsięwzięcia i jego koszt na siebie oddziałują. Zarządzanie tymi dwoma parametrami jest niezbędne dla zapewnienia efektywnego przebiegu przedsięwzięcia budowlanego.

Zgodnie z triadą zarządzania projektami, w tym również przedsięwzięciami budowlanymi, występuje związek między czasem, kosztem oraz jakością (Kerzner, 2003). Zmiana jednego z tych elementów wpływa na pozostałe. I tak na przykład, skrócenie czasu realizacji, tj. przyspieszenie terminu zakończenia budowy, może nieść za sobą zwiększenie kosztów wynikające ze zwiększenia liczby brygad roboczych. Przyspieszenie prac budowlanych może wiązać się z koniecznością zatrudnienia większej liczby pracowników lub zlecenia pracy w godzinach nadliczbowych, co podnosi koszty. Z kolei niewłaściwe oszacowanie kosztów, na etapie planowania przedsięwzięcia budowlanego, może prowadzić do opóźnień w jego realizacji. Dlatego prawidłowe zaplanowanie i koordynacja prac są kluczowe dla zminimalizowania kosztów związanych np. z opóźnieniami.

Właściwe zaplanowanie realizacji przedsięwzięć budowlanych opiera się na podjęciu wielu decyzji na etapie planowania. Będą one wpływać zarówno na wielkość ponoszonych

nakładów kosztowych i czasowych oraz ich ewentualne przekroczenia. W artykule (Szafranko & Harasymiuk, 2022) przeanalizowano szereg modeli proponowanych w literaturze. Badając 34 przedsięwzięcia budowlane rozważano szereg sytuacji decyzyjnych. Pozwoliło to na sformułowanie wniosków i opracowanie modeli wspomagania decyzji dedykowanych jako wsparcie w procesie realizacji przedsięwzięć budowlanych. Podkreślano istotną rolę uzyskania informacji zwrotnej pozwalającej na dopracowanie modelu decyzyjnego.

Przeprowadzonych zostało wiele badań analizujących powyższe elementy, tj. koszt, czas przedsięwzięć budowlanych oraz ich przekroczenia i wzajemne zależności (Kaka & Price, 1991), (Flyvbjerg i in., 2002), (Le-Hoai i in., 2008), (Burtonshaw-Gunn, 2017), (Le-Hoai & Lee, 2009), (Car-Puśić & Radujković, 2009), (Žujo i in., 2017). O silnej współzależności pomiędzy opóźnieniem czasu realizacji i przekroczeniem kosztu piszą autorzy (Anysz & Buczkowski, 2019). Do podobnych wniosków doszli badacze w artykułach (Le-Hoai i in., 2008) i (Seddeeq i in., 2019) upatrując jako przyczynę opóźnień w projektach przekroczenie ich kosztu i odwrotnie.

Badania potwierdzają częste przekroczenia czasu i kosztu przedsięwzięć budowlanych (Makesh & Mathivanan, 2019), (Rachid i in., 2019), (Kowalski i in., 2021). W zależności od źródła danych wartości przekroczeń różnią się. Według Flyvbjerg i inni (Flyvbjerg i in., 2004) przekroczenie kosztu występuje w aż 9 na 10 przedsięwzięć budowlanych, a wartość przekroczenia może sięgać nawet 183%. Przykładowo, w Holandii średnie przekroczenie kosztu wyniosło 16,5% (Cantarelli i in., 2012), w Portugalii 24% (Miranda Sarmiento & Renneboog, 2017), a w Katarze 54% (A. Senouci i in., 2016), (A. B. Senouci & Mubarak, 2016a). Z kolei w USA badania Hoffmana (Hoffman i in., 2007) wykazały, że 72% analizowanych budynków nie zostało ukończonych zgodnie z założonymi celami. Podobne wyniki uzyskano w Australii, Indiach, Chinach, Słowenii, Chorwacji i Polsce, gdzie znaczna część projektów przekraczała zarówno czas, jak i budżet (M. Skitmore & Thomas, 2001, Kenny, 2010, C. Sun & Xu, 2011, Konior & Szóstak, 2023, Szóstak, 2021a, Szóstak, 2023a).

W literaturze przedmiotu wskazuje się na występującą zależność między czasem przedsięwzięcia budowlanego a kosztem realizacji (Anysz & Buczkowski, 2019). Pierwsze badania w tej dziedzinie przeprowadził Bromilow (Bromilow, 1969) w Australii, opracowując model "time-cost" (BTC). Bromilow opracował model regresji do przewidywania czasu trwania przedsięwzięcia budowlanego na podstawie szacowanego końcowego kosztu. Późniejsze badania potwierdziły przydatność tej metody, ale wskazały, że modele te muszą być dostosowane do specyficznych warunków ekonomicznych każdego przedsięwzięcia (D. W. M. Chan & Kumaraswamy, 1995, A. P. C. Chan, 2001, Car-Puśić & Radujković, 2009). Analizy pokazują, że bardziej złożone modele, które uwzględniają dodatkowe zmienne, mogą prowadzić do dokładniejszych wyników, ale jednocześnie komplikują ich praktyczne zastosowanie (Nkado, 1992)(Love i in., 2005). Z tego powodu, prostsze modele mogą być bardziej realistyczne i praktyczne (Žujo i in., 2017).

Z kolei inne badania (D. W. M. Chan & Kumaraswamy, 1995), (Walker, 1995), (A. P. C. Chan, 1999), (R. M. Skitmore & Ng, 2003) wykazały, że czas potrzebny na realizację jest silnie skorelowany z wielkością budowy mierzoną za pomocą projekcji kosztów. Wykazano również, że przyczyny opóźnień są w większości przypadków przyczynami przekroczenia kosztów i odwrotnie. Niektórzy badacze traktują wręcz opóźnienie i przekroczenie kosztów jako tożsame (Le-Hoai i in., 2008, Seddeeq i in., 2019).

Wśród publikacji podejmujących tematykę współzależności pojawiają się również artykuły, które poddają w wątpliwość istnienie pełnej współzależności pomiędzy przekroczeniem kosztu i przekroczeniem terminu. Autorzy (Belay & Torp, 2017), już na wstępie stawiają pytanie o wielkość odchyień kosztu w zależności od długości przedsięwzięć budowlanych. Analizie poddano dwa rodzaje projektów: inwestycje drogowe oraz kubaturowe. Wyniki sugerują, że dłuższe zadania inwestycyjne niekoniecznie mają większe odchylenie kosztów.

Badania nad współzależnością czasu i kosztu w przedsięwzięciach budowlanych są istotne dla poprawy planowania i kontroli zadań inwestycyjnych. Zarządzanie współzależnością czasu i kosztu w przedsięwzięciach budowlanych wymaga starannego planowania, monitorowania i reagowania na zmiany. Kluczowe zatem jest określenie wpływu między tempem realizacji prac (czasem), a kosztem ponoszonym w czasie.

2.3.4. Krzywa S

Krzywa S będąca elementem metody EVM, w zależności od przyjętych parametrów wejściowych może służyć jako wszechstronne i proste narzędzie do analizy danych pozyskanych w trakcie realizacji inwestycji (Narbaev & De Marco, 2014). Przedstawienie planowanych przepływów finansowych na osi czasu za pomocą wykresu skumulowanego kosztu jest prostym i skutecznym narzędziem do pomiaru utylizacji nakładów finansowych przedsięwzięcia budowlanego (Cristóbal, 2017).

Na podstawie gromadzonych na bieżąco danych finansowych możliwe jest generowanie i porównywanie krzywych planowanego oraz rzeczywistego kosztu (Tijanić & Car-Pušić, 2017). Do odwzorowania kształtu krzywej skumulowanego kosztu wykorzystywano dotychczas wiele narzędzi, m.in. teorię zbiorów rozmytych (Hsieh i in., 2004), (Mohagheghi i in., 2017), metodę najmniejszych kwadratów oraz regresji rozmytej (Hsieh i in., 2006), metody wykorzystujące elementy sztucznej inteligencji (L. C. Chao & Chien, 2010), (L. C. Chao & Chen, 2015), a także elementy technologii BIM (K. C. Wang i in., 2016). W prowadzonych badaniach mają zastosowanie również empiryczne metody prognozowania przebiegu krzywej kosztu skumulowanego w różnorodnych przedsięwzięciach budowlanych. Istniejące w literaturze matematyczne modele krzywej kosztu oparte są na rzeczywistych, historycznych danych, dotyczących przedsięwzięć budowlanych realizowanych m.in. w Wielkiej Brytanii (Blyth & Kaka, 2006), Iranie (Banki & Esmaeeli, 2008), Tajwanie (L.-C. Chao & Chien, 2009a), Stanach Zjednoczonych (A. Jiang i in., 2011), krajach azjatyckich (Mohamad i in., 2021).

Do opisu przebiegu krzywej S wielu autorów proponuje wielomian 6-go stopnia (Hsieh i in., 2004), (Ostojčić-Škomrlj & Raduiković, 2012), wielomian 3-go stopnia (Peer, 1982), (Miskawi, 1989), (L.-C. Chao & Chien, 2009a), rzadziej wielomian 2-go stopnia i funkcję liniową (Boussabaine & Elhag, 1999). Wykres krzywej skumulowanego kosztu jest krzywą o zmiennych nachyleniu. Przyjęcie do jej opisu krzywej 2-go stopnia może prowadzić do popełnienia błędu i uzyskania niewiarygodnego, nierzeczywistego kształtu krzywej kosztowej (Boussabaine & Elhag, 1999), (Cioffi, 2005).

Większość analizowanych artykułów skupia się na możliwie najlepszym dopasowaniu krzywych planowanych i rzeczywistych. Inne opisują sposób kontroli bieżącej przedsięwzięcia na podstawie różnych wskaźników. Porównując wykresy można z powodzeniem śledzić odchylenia badanych parametrów.

2.3.5. Metoda Wartości Wypracowanej

Stosowanie Metody Wartości Wypracowanej (*Earned Value Method* – EVM) to dobrze znana metodyka zarządzania projektami, rekomendowany przez znane metodyki takie jak PMBoK Guide (*Project Management Body of Knowledge Guide*) oraz IPMA (*International Project Management Association*), który integruje koszt, harmonogram i wydajność techniczną (Abba, 2000), (De Marco & Narbaev, 2013) .

Metoda Wartości Wypracowanej jest metodą pomiaru postępu projektu (Zohoori i in., 2019) i polega na kontroli zadania inwestycyjnego poprzez cykliczne porównywanie rzeczywiście zrealizowanego zakresu prac z ich planowanym czasem wykonania i planowanym kosztem realizacji, zgodnie z przyjętym planowanym harmonogramem rzeczowo-finansowym opracowanym na początku realizacji przedsięwzięcia budowlanego (H. L. Chen i in., 2016). Metoda ta umożliwi obliczanie odchyłeń kosztu i harmonogramu a także wskaźników wydajności oraz prognoz kosztu i czasu trwania przedsięwzięcia budowlanego (Bhosekar & Vyas, 2012), (Waris i in., 2012). Pozwala ona również na wczesne ustalenie wskaźników realizacji projektu, co jest pomocne przy planowaniu ewentualnych działań naprawczych (Waris i in., 2012).

W literaturze można odnaleźć wiele prac przedstawiających skuteczne zastosowanie Metody Wartości Wypracowanej w rzeczywistych przedsięwzięciach budowlanych (Vandevoorde & Vanhoucke, 2006), (Kwon i in., 2008), (Waris i in., 2012), (Połoński M. & Komendarek P., 2011), (Priyo, 2021), (Przywara & Rak, 2021).

Istotnym problemem w stosowaniu Metody Wartości Wypracowanej jest również jakość uzyskanych danych finansowo-rzeczowych z placu budowy. Metoda jest bardzo wrażliwa z uwagi na wprowadzane dane i aktualizacje harmonogramu rzeczowo-finansowego (Dziadosz i in., 2014). Aby uzyskać najbardziej wiarygodne i rzeczywiste oszacowanie kosztu i czasu trwania przedsięwzięcia budowlanego, należy prowadzić analizy zgodnie z faktycznym postępem realizacji przedsięwzięcia budowlanego. Szacowany rzeczywisty koszt i czas trwania nie jest niezawodny w pierwszym okresie trwania inwestycji, a stabilizuje się dopiero w drugim okresie, w którym, w zależności od scenariusza przyjętego dla dalszych prac, szacuje rzeczywiste wartości z większą dokładnością (Ziółkowska & Połoński, 2016). Ponadto, wszystkie wskaźniki obliczane są w jednostkach pieniężnych, w tym również odchylenie od harmonogramu, przez co utrudniona jest analiza i ocena wyników (Bagherpour i in., 2020).

Dodatkowymi problemami, które pojawiają się w praktycznym zastosowaniu tej metody są m. in.: trudność w prawidłowym i rzeczywistym określeniu procentowego zaawansowania zadań, które zostały rozpoczęte, lecz nie zostały zakończone w momencie kontroli, a także niepełne dane o rzeczywistych kosztach poniesionych na dzień kontroli. Występujące nieprawidłowości mogą prowadzić do błędnych interpretacji otrzymanych wskaźników, a także nieprawidłowego wnioskowania (Czarnigowska, 2008), (Czarnigowska, 2009).

Powyższe trudności wpłynęły na rozwój alternatywnych metod, bazujących na założeniach Metody Wartości Wypracowanej, podejmujących próby bardziej wiarygodnego prognozowania całkowitego kosztu i terminu końcowego przedsięwzięć, np. poprzez podział przedsięwzięcia budowlanego na mniejsze zakresy robót (Howes, 2000), stosowanie metod statystycznych (Z. Chen i in., 2020a), (W. Lipke i in., 2009), zbiorów rozmytych (Salari i in.,

2015), (Salari & Khamooshi, 2016), (Hajali-Mohamad i in., 2016), sztucznej inteligencji (Yaseen i in., 2020).

Metoda Wartości Wypracowanej dzięki prowadzonym badaniom ulegała i nadal ulega ciągłym modyfikacjom (Vandevoorde & Vanhoucke, 2006). Rozszerzenie metody uzyskiwano poprzez wprowadzenie nowych, dotychczas niewystępujących w metodzie parametrów/wskaźników pozwalających na prowadzenie, zdaniem ich autorów, dokładniejszych obliczeń, np. wskaźnika prognozy harmonogramu (SFI - Schedule forecast indicator) (Czemplik, 2014), wskaźnika stabilności prognozowania wartością wypracowaną (Wauters & Vanhoucke, 2015), wskaźnika efektywności ryzyka (Babar i in., 2017), określenia wpływu nieplanowanych odchyleń czasowych i kosztowych na płynność finansową przedsięwzięcia budowlanego (Przywara & Rak, 2017), analizy ryzyka (Dziadosz, 2017), warunków niepewności (Almeida i in., 2021), oceny opłacalności przedsięwzięć budowlanych w losowych warunkach realizacji (Starczyk-Kołbyk, 2019), (Starczyk-Kołbyk & Kruszka, 2021), (Kasprowicz i in., 2023), wprowadzenia odchyleń czasowych od harmonogramu (T/S) oraz odchyleń od planowanego kosztu (T/C) (Przywara & Rak, 2021a).

2.4. Metody i narzędzia w literaturze krzywej S i EVM

Liczba modyfikacji wprowadzona przez autorów poszczególnych publikacji - zarówno w odniesieniu do krzywej S jak również metody EVM - skłoniła autora niniejszej dysertacji do opracowania tabelarycznego zestawienia dokonań badaczy w obszarze obu narzędzi (Tabela 2.2.)

Tabela 2.2. Synteza stosowanych metod i narzędzi matematycznych w literaturze krzywej S i EVM

Metoda	Autorzy	Narzędzie
Krzywa S	Hsieh, T.-Y., Wang, L., Hsiao, M., Chen, C.-W. A (2004)[9]	Model regresji krzywej S
	Barraza, G.A., Back, W.E., Mata, F. (2004) (Barraza i in., 2004)	Stochastyka
	Yao, J.-S., Chen, M.-S., Lu, H.-F. (2006) (Yao i in., 2006)	Stochastyka
	Hsieh, T.Y., Wang, M.H.L., Chen, C.W., Chen, C.Y., Yu, S.E., Yang, H.C., Chen, T.H. (2006) (Hsieh i in., 2006)	Model regresji krzywej S
	Kim, B.C., Reinschmidt, K. (2007) (B. C. Kim & Reinschmidt, 2007)	Model Bayesa do prognozowania rozkładów prawdopodobieństwa czasu trwania przedsięwzięcia i kosztów jego ukończenia
	Chao, L.-C., Chien, C.-F. (2009) (L.-C. Chao & Chien, 2009a)	Szacowanie krzywej S przy użyciu funkcji wielomianowej i sieci neuronowych
	Chao, L.-C., Chien, C.-F. (2010) (L.-C. Chao & Chien, 2010)	Sieci neuronowe
	Cheng, Y.M., Yu, C.H., Wang, H.T. (2011) (Cheng i in., 2011)	Dynamiczne prognozowanie krótkoterminowe dla rzeczywistej krzywej S
	Chao, L.-C., Chen, H.-T. (2015) (L.-C. Chao & Chen, 2015)	Geometryczny opis krzywej S
	Mohagheghi, V., Meysam Mousavi, S., Vahdani, B. (2017) (Mohagheghi i in., 2017)	Zbiory rozmyte

	Szóstak (2022) (Szóstak, 2022) Szóstak (2021) (Szóstak, 2021) Konior, Szóstak (2020) (Konior & Szóstak, 2020c)	Zastosowanie wielomianu 6 – go stopnia
	Szóstak (2023) (Szóstak, 2023a) Szóstak, Stachoń, Konior (2024) (Szóstak i in., 2024)	Zastosowanie wielomianu 3 – go stopnia
Metoda EVM	Howes, R. (2000) (Howes, 2000)	Pakietowanie prac („Work Package Methodology”)
	Vandevorde S. Vanhoucke M. (2006) (Vandevorde & Vanhoucke, 2006)	Porównanie różnych metod prognozowania czasu trwania projektu przy użyciu wskaźników wartości wypracowanej
	Vanhoucke M. Vandevorde S. (2007) (Vanhoucke & Vandevorde, 2007)	Symulacja i ocena wskaźników wartości wypracowanej w celu prognozowania czasu trwania projektu
	Lipke W. Zwikael O. Henderson K. Anbari F. (2009) (W. Lipke i in., 2009)	Zastosowanie metod statystycznych do zarządzania wartością wypracowaną i wskaźników wydajności harmonogramu wypracowanego
	Khamooshi, H., Golafshani, H (2014) (Khamooshi & Golafshani, 2014)	Earned Duration Management (EDM) – modyfikacja EVM
	Czemplik, A. (2014) (Czemplik, 2014)	Wprowadzenie nowego parametru do EVM - wskaźnika prognozy harmonogramu (SFI)
	Salari M. Khamooshi H. (2017) (Salari & Khamooshi, 2016)	Model prognozowania rozmytych szeregów czasowych w procesie estymacji
	Przywara, D., Rak, A. (2017) (Przywara & Rak, 2017)	Analiza wpływu nieplanowanych odchyleń czasowych i kosztowych na płynność projektu budowlanego
	P. Ballesteros-Pérez, K.M. Elamrousy (2018) (Ballesteros-pérez & Mohamed Elamrousy, 2018)	Metoda Monte Carlo
	Ballesteros-Pérez, P., Sanz-Ablanedo, E., Mora-Melià, D., (...), Fuentes-Bargues, J.L., Pellicer, E. (2019) (Ballesteros-Pérez i in., 2019)	Modyfikacja EVM – nowe mierniki
	Martens A. Vanhoucke M (2020) (Martens & Vanhoucke, 2020)	Działania naprawcze w prognozowaniu czasu projektu z wykorzystaniem wygładzania wykładniczego
	P. Ballesteros-Pérez, E. Sanz-Ablanedo, R. Soetanto, M.C. González-Cruz, G.D. Larsen, A. Cerezo-Narváez (2020) (Ballesteros-Pérez i in., 2020)	Badanie empiryczne - czas trwania i zmienność kosztów działań budowlanych
	Chen Z. Demeulemeester E. Bai S. Guo Y (2020), (Z. Chen i in., 2020)	Nowa metoda ustalania limitów tolerancji w oparciu o wskaźniki wydajności harmonogramu Earned Value Management/Earned Schedule (EVM/ES)

2.5. Podsumowanie przeglądu literatury

Celem niniejszego przeglądu literatury było usystematyzowanie wiedzy na temat współzależności przekroczenia kosztu i przekroczenia terminu w zróżnicowanych przedsięwzięciach budowlanych. Stanowi ono syntetyczne ujęcie zagadnień bezpośrednio lub pośrednio związanych z badaniem współzależności wspomnianych cech. Przeprowadzone rozpoznanie literaturowe wskazało na niedostateczne rozpoznanie tematyki współzależności przekroczenia kosztu i terminu. W szczególności widoczny był brak badań opartych na empirycznym materiale badawczym. Na potrzebę kontynuacji badań wskazywała również zaobserwowana duża rozbieżność uzyskanych wyników. Trzynastu autorów wskazywało na istotną współzależność kosztu i terminu. Wnioski badaczy (Belay & Torp, 2017) poparte badaniami empirycznymi wskazywały z kolei, że oba parametry nie wykazują cech mogących o tej zbieżności jednoznacznie świadczyć. Potwierdzają to również obserwacje własne autora, poczynione na autorskiej próbie badawczej omówionej w rozdziale IV.

Wszyscy badacze zgodnie potwierdzili natomiast konieczność prowadzenia dalszych badań w oparciu o empiryczny materiał badawczy, który pozwala na rzeczywiste odwzorowanie przebiegu przedsięwzięć budowlanych. Utwierdziło to autora w przekonaniu o słuszności obranego kierunku działań, szczególnie w obliczu zgromadzonej próby badawczej.

Aby zgłębić podjętą tematykę, w kolejnych rozdziałach niniejszej dysertacji przeprowadzono szereg badań i analiz mających na celu zbadanie współzależności przekroczenia kosztu z przekroczeniem terminu, prawdopodobieństw warunkowych cech tych obu zdarzeń losowych oraz szacowania trendów przekroczeń kosztu i terminu w zróżnicowanych przedsięwzięciach budowlanych.

ROZDZIAŁ III

Metoda EVM

3.1. Wprowadzenie do Metody Wartości Wypracowanej

Metoda Wartości Wypracowanej – Earned Value Method (EVM) to zaawansowana metoda zarządzania przedsięwzięciami, która pozwala na kompleksowe monitorowanie i kontrolowanie postępu realizacji przedsięwzięć w odniesieniu do harmonogramu i budżetu. Integruje ona trzy kluczowe aspekty zarządzania przedsięwzięciem: zakres, harmonogram oraz koszty. Umożliwia tym samym precyzyjne śledzenie wykonania zadań oraz prognozowanie przyszłych rezultatów. Jest z powodzeniem stosowana w wielu branżach, takich jak budownictwo, inżynieria, IT oraz przemysł zbrojeniowy, jest narzędziem nieocenionym w identyfikacji i zarządzaniu ryzykiem w inwestycjach (Połowski M. i in., 2018).

Wybrane wskaźniki zawarte w metodzie EVM, szczegółowo omówione w dalszej części pracy, zostały wykorzystane w przeprowadzonych w rozdziałach VI – IX badaniach. Przetworzenia danych w próbie badawczej pozwoliły na wyznaczenie wartości przekroczeń kosztu i terminu oraz na szacowanie ostatecznego kosztu i terminu zakończenia przedsięwzięcia, przyczyniając się do zbadania współzależności obu cech, które jest głównym celem niniejszej dysertacji.

EVM opiera się na kilku podstawowych parametrach i miarach, które pozwalają na ocenę wydajności przedsięwzięcia oraz identyfikację potencjalnych problemów na każdym etapie realizacji. Kluczowe wskaźniki obejmują: planowany koszt zaplanowanej pracy (BCWS), planowany koszt wykonanej pracy (BCWP), rzeczywisty koszt wykonanej pracy (ACWP). Na ich podstawie można określić szereg użytecznych współczynników opisujących istotne elementy przebiegu przedsięwzięć. Wśród nich należy wyróżnić dwa wskaźniki efektywności, które są kluczowe z punktu widzenia badań prowadzonych w dalszej części niniejszej dysertacji. Pierwszym jest wskaźnik wykonania budżetu CPI (*Cost Performance Index*) którego wartość informuje o poziomie odchylenia kosztu od zaplanowanej wartości. Drugim jest wskaźnik wykonania harmonogramu SPI (*Schedule Performance Index*), który określa wielkość odchylenia związanych z terminem realizacji (Połowski M. i in., 2018). Dzięki ich znajomości, w trakcie monitoringu przedsięwzięć, można skutecznie śledzić postęp prac i podejmować właściwe decyzje dotyczące zarządzania zasobami, harmonogramem oraz budżetem. Ponadto, dysponując odpowiednią bazą danych pochodzących z zakończonych inwestycji, metoda EVM umożliwia dokładne odtworzenie ich przebiegu. Taki jest również cel jej wykorzystania na potrzeby niniejszego opracowania. W oparciu o wymienione powyżej wskaźniki wykonania kosztu (CPI) i wykonania harmonogramu (SPI) planowane jest przetworzenie danych zawartych w zgromadzonej bazie przedsięwzięć na potrzeby analiz przedstawionych w rozdziałach VI – IX. Opis próby badawczej wraz omówieniem procesów jej przetwarzania zamieszczono w rozdziale IV. W kolejnych punktach omówiono podstawowe

założenia tej metody, jej użyteczność w kontekście prognozowania całkowitego kosztu i terminu zakończenia przedsięwzięcia oraz poruszono aspekt praktyczny i ograniczenia.

3.2. Metoda EVM w literaturze przedmiotu

Ponieważ metoda wartości wypracowanej jest obecnie powszechnie stosowana i rekomendowana do monitorowania przebiegu przedsięwzięć w wielu branżach a jej korzenie sięgają lat '80 XX wieku, powstało wiele opracowań podejmujących związaną z nią tematykę. Jako system zarządzania przedsięwzięciami, rekomendowany jest przez znane metodyki takie jak PMBoK Guide (*Project Management Body of Knowledge Guide*) oraz IPMA (*International Project Management Association*). Wszystkie aspekty tej metody zostały również szeroko omówiona w pracy (Połoński M. i in., 2018). Opiera się ona na pomiarze rzeczywistego postępu przedsięwzięcia (Zohoori i in., 2019) a następnie na kontroli zadania inwestycyjnego poprzez cykliczne porównywanie zrealizowanego zakresu prac z ich planowanym czasem wykonania i planowanym kosztem realizacji, zgodnie z przyjętym planowanym harmonogramem rzeczowo-finansowym opracowanym na początku realizacji przedsięwzięcia budowlanego (H. L. Chen i in., 2016). Wielu autorów wskazuje w swoich publikacjach dobrą aplikacyjność metody EVM do kontroli rzeczywistego przebiegu przedsięwzięć budowlanych (Vandevoorde & Vanhoucke, 2006, Czarnigowska, 2009, Car-Puśić & Radujković, 2009, Kasprowicz & Starczyk-Kołbyk, 2024). Z uwagi na duże zróżnicowanie sektorów budowlanych, w celu zwiększenia precyzji metody EVM, na przestrzeni lat proponowano alternatywne metody, bazujące na jej założeniach. W szczególności proponowano podział przedsięwzięcia budowlanego na mniejsze zakresy robót (Howes, 2000), zastosowanie metod statystycznych (Z. Chen i in., 2020a); (W. Lipke i in., 2009), wykorzystanie zbiorów rozmytych (Salari i in., 2015); (Salari & Khamooshi, 2016); (Hajali-Mohamad i in., 2016); oraz sztucznej inteligencji (Yaseen i in., 2020). Szersze rozpoznanie literatury w tematyce Metody Wartości Wypracowanej zostało zawarte w przeglądzie literatury ujętym w rozdziale II.

3.3. Podstawowe założenia metody EVM

Celem metody EVM jest powiązanie rzeczowego zaawansowania prac z poniesionymi kosztami i planowanym budżetem przedsięwzięcia. Metoda ta opiera się na trzech kluczowych parametrach, które są określane na podstawie danych uzyskanych w trakcie okresowej kontroli inwestycji:

- BCWS (*Budgeted Cost of Work Scheduled*): Planowany Koszt Planowanej Pracy, to wartość budżetu przypisana do robót, które powinny zostać wykonane do określonego momentu w czasie. Jest to wartość skumulowana, będąca sumą wszystkich kosztów planowanych dla zadań, które mają być zakończone do danego punktu w harmonogramie. BCWS służy jako punkt odniesienia do porównania rzeczywistego postępu prac z planem;
- BCWP (*Budgeted Cost of Work Performed*): znany również jako Earned Value (EV), to Planowany Koszt Wykonanej Pracy. Reprezentuje skumulowaną wartość kosztu, przypisaną do rzeczywiście wykonanej pracy do określonego momentu w czasie. BCWP jest miarą fizycznego zaawansowania czyli rzeczywiście zrealizowanego kosztu przedsięwzięcia w kontekście zaplanowanego budżetu;

- **ACWP (Actual Cost of Work Performed):** Rzeczywisty Koszt Wykonanej Pracy, to faktyczny koszt poniesiony na wykonanie pracy do określonego momentu w czasie. ACWP odzwierciedla rzeczywiste koszty przedsięwzięcia, które mogą obejmować koszty materiałów, robocizny, wynajmu sprzętu itp.;

Znajomość tych trzech wartości jest kluczowa dla omawianej metody, gdyż umożliwia określenie kilku kluczowych wskaźników, które pozwalają ocenić stan realizacji przedsięwzięcia

3.4. Analiza odchyleń kosztu i terminu

Omówione powyżej wartości wejściowe pozwalają na ustalenie odchyleń kosztu (budżetu) i czasu (terminu) oraz wyznaczenie wskaźnika wykonania kosztu i wskaźnika wykonania harmonogramu:

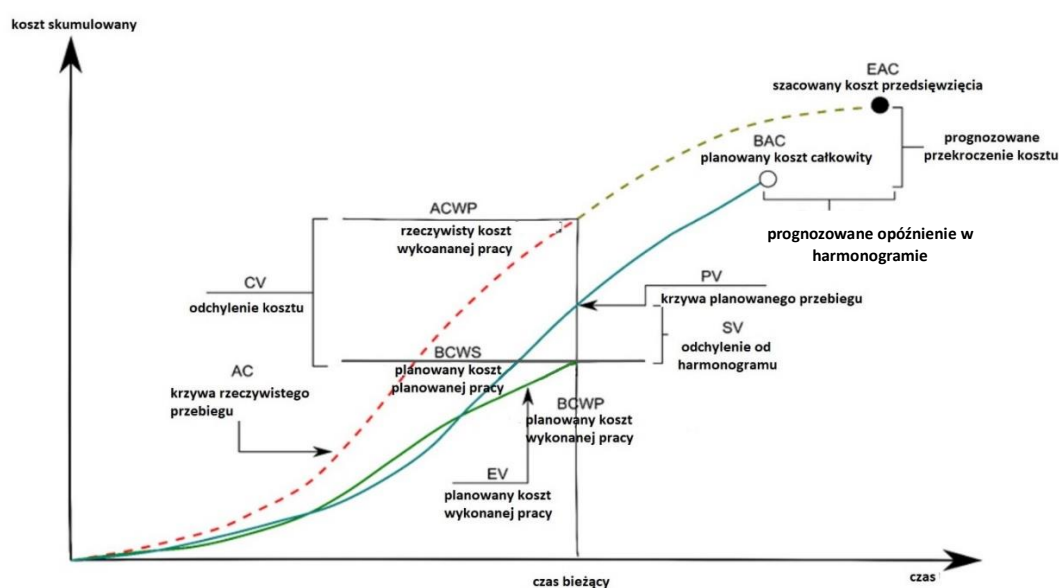
- **CV (Cost Variance):** czyli odchylenie kosztowe, mierzy różnicę między wartością wypracowaną (BCWP) a rzeczywistym kosztem wykonanej pracy (ACWP). Wartość wskaźnika CV wskazuje, czy przedsięwzięcie jest realizowane poniżej budżetu ($CV > 0$) czy powyżej budżetu ($CV < 0$)

$$CV = BCWP - ACWP \quad [3.1.]$$

- **SV (Schedule Variance):** odchylenie od harmonogramu, mierzy różnicę między wartością wypracowaną (BCWP) a planowanym kosztem zaplanowanej pracy (BCWS). Wskaźnik SV pokazuje, czy przedsięwzięcie jest realizowane zgodnie z harmonogramem ($SV > 0$) czy ma opóźnienia ($SV < 0$).

$$SV = BCWP - BCWS \quad [3.2.]$$

Parametry omówione powyżej posiadają swoją interpretację graficzną która jest ściśle powiązana z krzywą przebiegu inwestycji (rys. 3.1.)



Rysunek 3.1. Interpretacja graficzna parametrów metody EVM. Źródło: opracowanie własne.

Uzyskane w wyniku pomiaru kosztów dane wejściowe umożliwiają wygenerowanie dwóch wskaźników które określają wydajność kosztową i harmonogramową przedsięwzięcia:

- **CPI (*Cost Performance Index*)**: wskaźnik wydajności kosztowej, pokazuje efektywność kosztową przedsięwzięcia. Wyraża on stosunek wartości wypracowanej (BCWP) do rzeczywistego kosztu wykonanej pracy (ACWP). $CPI > 1$ oznacza, że przedsięwzięcie jest realizowane efektywnie pod względem kosztów, podczas gdy $CPI < 1$ wskazuje na przekroczenie budżetu.

$$CPI = \frac{BCWP}{ACWP} \quad [3.3.]$$

- **SPI (*Schedule Performance Index*)**: wskaźnik wydajności harmonogramu, pokazuje efektywność realizacji harmonogramu. SPI wyraża stosunek wartości wypracowanej (BCWP) do planowanego kosztu zaplanowanej pracy (BCWS). Wartości $SPI > 1$ oznaczają, że przedsięwzięcie jest realizowane szybciej niż planowano, podczas gdy $SPI < 1$ świadczy o opóźnieniach.

$$SPI = \frac{BCWP}{BCWS} \quad [3.4]$$

Odpowiednia interpretacja wartości tych wskaźników umożliwia szybką ocenę aktualnego stanu przedsięwzięcia. Porównanie ich z wynikami uzyskanymi podczas wcześniejszych kontroli pozwala na prognozowanie dalszego przebiegu inwestycji w kontekście odchylenia kosztu i terminu.

3.5. Szacowanie ostatecznego kosztu i terminu zakończenia inwestycji

Kolejnym obszarem zastosowań metody EVM jest prognozowanie całkowitego kosztu i terminu zakończenia przedsięwzięcia, a także szacowanego kosztu ukończenia prac i wskaźnika wydajności wymaganej do jego zakończenia. Do ich wyznaczenia niezbędna jest znajomość wartości kosztów i wskaźników omówionych w punktach 3.3. i 3.4.:

- **ETC (*Estimate to Complete*)** – szacowany koszt ukończenia prac – to prognoza kosztów potrzebnych do zakończenia pozostałych zadań inwestycyjnych. Wskaźnik ETC uwzględnia aktualną wydajność kosztową przedsięwzięcia

$$ETC = \frac{BAC - BCWP}{CPI} \quad [3.5.]$$

- **EAC (*Estimate at Completion*)** – szacowany całkowity koszt przedsięwzięcia po zakończeniu – to prognoza całkowitych kosztów inwestycji po jej zakończeniu. EAC uwzględnia rzeczywiste koszty poniesione do tej pory oraz szacowany koszt dokończenia pozostałych prac (ETC).

$$EAC = ACWP + ETC \quad [3.6.]$$

- **TCPI (*To Complete Performance Index*)** – wskaźnik wydajności wymaganej do zakończenia – pokazuje, jaką wydajność kosztową należy utrzymać, aby zrealizować przedsięwzięcie w ramach pozostałego budżetu.

$$TCPI = \frac{BAC - BCWP}{BAC - ACWP} \quad [3.7.]$$

- *ETTC (Estimated Time to Complete)* – szacowany czas zakończenia pozostałych prac – prognoza czasu potrzebnego do zakończenia pozostałych zadań przedsięwzięcia, uwzględniająca aktualną wydajność harmonogramu.

$$ETTC = \frac{OD - ATE}{SPI} \quad [3.8.]$$

gdzie: *BAC (Budget At Completion)* - planowany całkowity koszt wykonania inwestycji, *OD* to wynikający z harmonogramu planowany czas realizacji przedsięwzięcia, *ATE* to rzeczywisty czas trwania prac od rozpoczęcia do momentu kontroli.

3.6. Praktyczne zastosowanie metody EVM

Metoda Wartości Wypracowanej (EVM) jest narzędziem służącym do monitorowania postępów przedsięwzięcia, które integruje jego koszty, harmonogram i zakres. Poniżej przedstawiono szereg praktycznych korzyści z jej zastosowania:

- lepsza kontrola kosztu i harmonogramu: EVM umożliwia śledzenie bieżącego kosztu i porównywanie go z planowanymi, co pozwala szybko zidentyfikować przekroczenia budżetu lub opóźnienia w harmonogramie. Pozwala prognozować końcowy koszt przedsięwzięcia oraz szacować czas potrzebny na jego ukończenie, co umożliwia bardziej efektywne zarządzanie budżetem i czasem;
- wczesne wykrywanie problemów: dzięki analizie odchyleń kosztów (*Cost Variance – CV*) oraz harmonogramu (*Schedule Variance – SV*), EVM umożliwia szybkie zidentyfikowanie obszarów problematycznych. Metoda pozwala również przewidzieć potencjalne trudności, zanim jeszcze wpłyną na przedsięwzięcie w sposób nieodwracalny, co daje możliwość wdrożenia działań naprawczych na czas;
- ściśle monitorowanie postępu prac: EVM integruje postęp prac z kosztami, co umożliwia dokładne określenie wartości faktycznie wypracowanej w stosunku do zakresu przedsięwzięcia. Daje to precyzyjny obraz tego, ile rzeczywiście zrealizowano w porównaniu do pierwotnego planu, a nie tylko poniesionych kosztów czy upływu czasu;
- prognozowanie przyszłych wyników: metoda pozwala prognozować całkowite koszty i czas realizacji na podstawie dotychczasowych danych, co pomaga w lepszym planowaniu i zarządzaniu zasobami. Jest ona przydatna do oszacowania wskaźników efektywności, takich jak *CPI (Cost Performance Index)* i *SPI (Schedule Performance Index)*, które pomagają ocenić, czy przedsięwzięcie zmierza do zakończenia w planowanym czasie i budżecie;
- zwiększenie przejrzystości i raportowania: EVM dostarcza precyzyjnych, liczbowych wskaźników, które mogą być łatwo raportowane interesariuszom, co zwiększa przejrzystość i zaufanie do procesu zarządzania przedsięwzięciem. Metoda ta ułatwia prezentowanie jego stanu i przebiegu w prosty sposób, co sprzyja lepszej komunikacji z interesariuszami, zespołem i zarządem;
- wsparcie w podejmowaniu decyzji: dzięki analizie wskaźników i prognozom, EVM wspiera kierownictwo inwestycji w podejmowaniu szybkich, opartych na danych decyzji. Informacje te są podstawą do oceny, czy konieczne jest przeorganizowanie

zasobów, przyspieszenie lub zwolnienie tempa prac, lub nawet zmiana strategii zarządzania przedsięwzięciem;

- poprawa efektywności i wydajności: EVM umożliwia lepszą kontrolę wydajności zespołu, dostarczając informacji o tym, jak efektywnie realizowane są zadania w stosunku do planu. Pomaga zidentyfikować, które obszary można poprawić, co z kolei może prowadzić do optymalizacji zasobów i poprawy efektywności operacyjnej;
- podstawa do porównywania inwestycji: dane z EVM mogą być wykorzystywane do analizy i porównywania różnych przedsięwzięć, co pomaga w ustaleniu benchmarków i zrozumieniu, jakie czynniki wpływają na sukces lub porażkę.

Podsumowując, metoda EVM dostarcza praktyczne narzędzia, które umożliwiają skuteczniejsze monitorowanie, wczesne wykrywanie problemów oraz usprawnienie procesów decyzyjnych, co ostatecznie przekłada się na lepsze wyniki przedsięwzięć i efektywne zarządzanie zasobami.

3.7. Ograniczenia metody EVM

Mimo licznych zalet, Metoda Wartości Wypracowanej (EVM) ma również pewne ograniczenia, które mogą wpływać na jej skuteczność w praktyce:

- wymóg dokładnego planowania: metoda opiera się na precyzyjnych danych dotyczących kosztów i harmonogramu, dlatego wymaga szczegółowego i realistycznego planu przed rozpoczęciem przedsięwzięcia. Jeśli wstępne szacunki budżetu lub czasu są nieprawidłowe lub niekompletne, wyniki analizy EVM mogą być mylące;
- trudności z pomiarem wartości wypracowanej: stosowanie metody sprawdza się najlepiej w przedsięwzięciach o jasno zdefiniowanych, mierzalnych wynikach. W przedsięwzięciach, w których postęp jest trudny do skwantyfikowania (np. prace badawcze czy kreatywne), może być problematyczne dokładne określenie wartości wypracowanej. Ocena postępu pracy w takich inwestycjach może prowadzić do subiektywnych ocen, co wpływa na wiarygodność wskaźników;
- skupienie na koszcie i harmonogramie, a nie na jakości: EVM koncentruje się głównie na koszcie i czasie, a mniej na jakości dostarczanych produktów czy usług. Może to prowadzić do sytuacji, w której przedsięwzięcie jest realizowane zgodnie z budżetem i harmonogramem, ale końcowa jakość jest niższa od oczekiwanej;
- duża złożoność wdrożenia i utrzymania: wdrożenie EVM może być skomplikowane i czasochłonne, szczególnie w dużych, złożonych przedsięwzięciach. Monitorowanie kosztów, harmonogramu i wartości wypracowanej wymaga regularnych aktualizacji danych, co z kolei wymaga dodatkowych zasobów. Potrzebne są także zaawansowane systemy raportowania i wyszkolony personel, co zwiększa koszt zarządzania przedsięwzięciem;

- brak elastyczności na zmiany zakresu przedsięwzięcia: EVM zakłada, że przedsięwzięcie jest realizowane zgodnie z ustalonym wcześniej zakresem. W przypadku zmian zakresu przedsięwzięcia metoda staje się mniej efektywna, ponieważ wskaźniki muszą zostać przeliczone, co jest czasochłonne. Dla inwestycji, które często zmieniają swój zakres, metoda EVM może nie być wystarczająco elastyczna;
- potencjalne mylące interpretacje wskaźników: wskaźniki EVM, takie jak CPI (Cost Performance Index) i SPI (Schedule Performance Index), mogą być niejednoznaczne, gdy są interpretowane w izolacji. Na przykład wysoki SPI może wskazywać na szybszy postęp, ale bez odniesienia do jakości lub pełnego zakresu prac. Analiza wyników EVM wymaga wiedzy i zrozumienia kontekstu przedsięwzięcia, aby właściwie interpretować wskaźniki;
- ograniczona użyteczność w krótkoterminowych inwestycjach: w krótkoterminowych przedsięwzięciach, gdzie zmiany są szybkie i dynamiczne, EVM może być mniej przydatne. W takich przypadkach ciągle monitorowanie i aktualizowanie wskaźników może być zbyt czasochłonne w stosunku do korzyści;
- skupienie na bieżących problemach, a nie na przyszłych zagrożeniach: EVM jest skuteczna w monitorowaniu bieżącego stanu przedsięwzięcia, ale niekoniecznie przewiduje przyszłe ryzyka, które mogą pojawić się w późniejszych etapach realizacji. Brak uwzględnienia ryzyk i ich potencjalnego wpływu na przedsięwzięcie może prowadzić do błędnych prognoz końcowego kosztu i czasu.
- niezgodność w inwestycjach z nietradycyjnym harmonogramem lub modelem kosztowym: Przedsięwzięcia o nietypowych harmonogramach, dopuszczających elastyczny czas zakończenia lub nieregularne rozliczenia kosztów, mogą sprawiać trudności w zastosowaniu EVM, ponieważ metoda zakłada stały postęp i regularne ponoszenie kosztu.
- wysoki koszt wdrożenia w małych przedsięwzięciach: EVM może być zbyt kosztowne do wdrożenia w mniejszych inwestycjach, gdzie nakłady na monitorowanie i analizę przewyższają korzyści wynikające z zastosowania tej metody.

W przedsięwzięciach o wysokiej dynamice zmian, nietypowych harmonogramach lub trudnych do zmierzenia wynikach metoda ta może być mniej skuteczna lub wymagać dodatkowego dostosowania.

3.8. Podsumowanie metody EVM

Metoda EVM jest skutecznym i prostym narzędziem zarządzania przedsięwzięciami, które umożliwia skuteczne monitorowanie postępu prac i kontrolowanie kosztów. Dzięki wskaźnikom takim jak CPI, SPI, EAC i ETTC, metoda EVM dostarcza szeregu kompleksowych informacji na temat realizacji inwestycji i umożliwia prognozowanie przyszłych wyników. Metoda dobrze sprawdza się w przypadku przedsięwzięć o dużej skali i złożoności, gdzie dzięki dokładności i precyzji prowadzonego można osiągnąć wyniki wysokiej jakości. Mimo swoich ograniczeń, EVM jest szeroko stosowana i ceniona za swoje możliwości analityczne. Przykłady zastosowań w budownictwie i pokazują, że metoda ta może być skutecznie stosowana w różnych obszarach, pod warunkiem odpowiedniego przygotowania i zarządzania danymi. Wdrożenie EVM wymaga starannego planowania, regularnych aktualizacji oraz ciągłego szkolenia i edukacji użytkowników.

W związku z powyższymi analizami i rozważaniami przedstawione w dalszej części niniejszej rozprawy są realizowane w oparciu o wybrane elementy i parametry zaczerpnięte z tej metody.

Metodę Wartości Wypracowanej zastosowano w trakcie opracowywania próby badawczej omówionej w rozdziale IV. Zaprezentowane wykresy były efektem poczynionych analiz. Posłużyły one do przetworzenia danych finansowych na wskaźniki wykonania kosztu (CPI) i harmonogramu (SPI), będące wskaźnikami tej metody. Elementy tej metody posłużyły również do opracowania wykresów krzywych S na podstawie danych z próby badawczej w rozdziale V. EVM została również wykorzystana w dwóch rozdziałach badawczych niniejszej dysertacji. W rozdziale VIII użyto ją do szacowania ostatecznego kosztu przedsięwzięcia (EAC) i terminu jego zakończenia (ETTC) a w rozdziale IX do badania przekroczeń kosztu w poszczególnych grupach analizowanych przedsięwzięć budowlanych.

ROZDZIAŁ IV

Próba badawcza

4.1. Wprowadzenie

Próba badawcza stanowi kluczowy element każdego badania naukowego. Jej wielkość oraz charakterystyka mają podstawowe znaczenie dla uzyskania wiarygodnych i użytecznych wyników. Materiał badawczy wykorzystany w niniejszej dysertacji został przygotowany i opracowany w sposób umożliwiający utworzenie rzetelnej bazy wiedzy, która następnie została wykorzystywana do przeprowadzenia zaplanowanych analiz i obliczeń w rozdziałach VI – IX. Wnioski sformułowane na podstawie tych analiz pozwoliły na wyjście poza próbę badawczą i odniesienie się do szerszego kontekstu. W celu uzyskania odpowiedzi na pytania postawione w rozdziale I, dotyczące wzajemnych powiązań pomiędzy przekroczeniem kosztu a wydłużeniem czasu realizacji inwestycji, pomierzono, opracowano, i zestandaryzowano pozyskany materiał badawczy. Był on gromadzony i przetwarzany według jednolitych wymogów, kryteriów i zasad w celu uzyskania wiarygodnej próby badawczej.

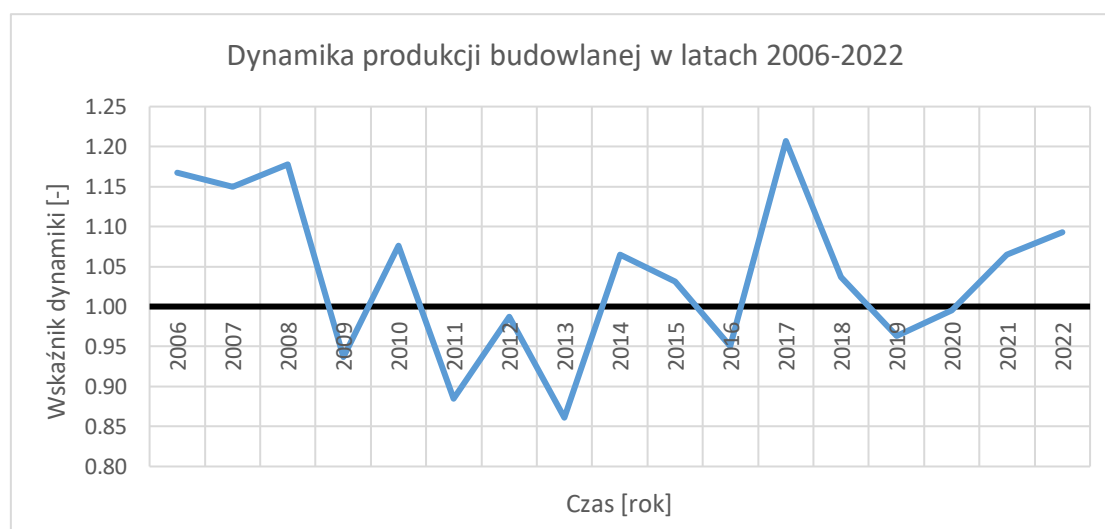
Dobór próby badawczej wynikał ze specyfiki pomiaru parametrów realizacyjnych i przetworzenia danych badawczych, uniemożliwiającej swobodny wybór przedsięwzięć budowlanych. Obecność tych przedsięwzięć w próbie badawczej jest efektem pozyskanych komercyjnie zleceń, których zakres opracowań został omówiony szerzej w punkcie 4.3. niniejszej pracy. Zgromadzone dane utworzyły zbiór zamknięty, obejmujący 41 przedsięwzięć budowlanych, na które złożyło się łącznie 547 pomiarów. Typologiczny podział na budynki mieszkalne, budynki biurowe, budynki hotelowe, centra handlowe oraz centra logistyczne, wynikający z przynależności do określonych grup typologicznych skutkowało zróżnicowaną liczbą obiektów, a tym samym liczbą pomiarów, w poszczególnych grupach. Konsekwencją tego podziału, pomimo losowego doboru, była utrata pełnej reprezentatywności próby badawczej z uwagi na jej niewielką liczebność. Spełnienie pozostałych wymogów, takich jak odwzorowanie struktury populacji, dobór losowy oraz brak obciążenia błędem doboru sprawiło, że uzyskana próba badawcza zachowała wysoką jakość danych. Z uwagi na przedstawione w dalszej części pracy kierunki badań, uzyskana jakość danych jest akceptowalna i wystarczająca do przeprowadzenia oraz sformułowania wniosków. Liczebność próby nie była podstawowym kryterium wpływającym na jakość analiz, ponieważ nie miały one na celu tworzenia modeli powiązania zmiennych oraz ekstrapolacji uzyskanych wyników na wyodrębnione typologicznie populacje, a jedynie stwierdzenie występowania lub niewystępowania współzależności pomiędzy badanymi cechami. W kontekście wypełnienia celów rozprawy doktorskiej reprezentatywność dotyczyła właściwego składu próby typologicznej. Wskazała zatem, czy tak stworzona próba dała właściwy obraz rzeczywistości i

nawet jeśli był on nieco rozmazany, nadal pozwolił prowadzić niniejszą dysertację w kierunku udowodnienia postawionych tez rozprawy.

Istotną cechą prezentowanej próby badawczej jest jej adekwatność. Przyjęta próba badawcza była odpowiednia pod względem badanych zmiennych, które umożliwiły osiągnięcie głównego celu badań, jakim było ustalenie współzależności pomiędzy przekroczeniami kosztu i terminu w zróżnicowanych przedsięwzięciach budowlanych. W tym przypadku, analiza obejmująca budynki mieszkalne, biurowe, hotele, centra handlowe oraz centra logistyczne pozwoliła na wszechstronną ocenę przedmiotowych parametrów w różnych kontekstach badawczych.

Ważną i pożądaną cechą była również jednorodność pozyskanych danych zapewniająca ich spójność i analogię. Wszystkie dane zawarte w bazie były gromadzone według ustalonych wcześniej jednolitych zasad i ustandaryzowanych kryteriów. Pozwoliło to na wyeliminowanie potencjalnych błędów, wynikających z różnic w metodyce ich gromadzenia oraz zapewniło spójność w kontekście przetwarzania na potrzeby poszczególnych badań.

Próba badawcza obejmowała możliwie najbardziej aktualne dane, aby wyniki były relewantne w kontekście obecnych warunków. Materiał w niej ujęty był pozyskiwany, mierzony, gromadzony i przetwarzany w latach 2006-2023, bezpośrednio przez Zespół Badawczy (próba badawcza nie jest wynikiem ankietyzacji i sondażu). Był to okres w którym wystąpił szereg mniej lub bardziej istotnych czynników mogących potencjalnie wpływać na produkcję budowlaną w Polsce. Takim przykładem może być pandemia COVID-19, która miała miejsce w latach 2020 – 2023. Analizując dane dotyczące dynamiki produkcji budowlanej opracowane przez Główny Urząd Statystyczny stwierdzono jednak, że jej wahania w okresie od 2006 roku do 2022 mieszczą się w przedziale około +/- 20% (rys. nr 4.1.). Uznano zatem, że materiał badawczy pozyskany w tym okresie spełnia wymóg aktualności, a wyniki badań które były na nim przeprowadzone, były istotne jakościowo.



Rysunek 4.1. Dynamika produkcji budowlanej w Polsce w latach 2006 – 2022 [Źródło:(Ewa Kuniewicz i in., 2023)]

Ostatnią ważną cechą opracowanej próby badawczej była jej wiarygodność. Była ona w dużej mierze uzależniona od sposobu i metody pozyskania danych. Istotna była również możliwość ich weryfikacji. Materiał badawczy z którego wyodrębniono próbę wykorzystywaną w niniejszej dysertacji był starannie weryfikowany i audytowany, co zagwarantowało jego

wysoką jakość i wiarygodność pozyskanych informacji. Z uwagi na wrażliwy i poufny charakter tych materiałów, nie były one powszechnie dostępne. Dostęp do nich wynikał z charakteru pracy i pełnionej funkcji jaką wykonywali członkowie Zespół Inżynierii Przedsięwzięć Budowlanych w Katedrze Budownictwa Ogólnego Wydziału Budownictwa Lądowego i Wodnego Politechniki Wrocławskiej, która została szerzej omówiona w dalszej części pracy.

4.2. Opis próby badawczej

4.2.1. Struktura próby badawczej

Dane ujęte w niniejszej próbie badawczej zostały zgromadzone przez Zespół Badawczy w latach 2006 – 2023. Stanowią one obszerną bazę wiedzy dotyczącą przebiegu 41 różnorodnych przedsięwzięć budowlanych, które można zakwalifikować do 5 grup typologicznych zgodnych z podziałem zaproponowanym w Polskiej Klasyfikacji Obiektów Budowlanych. Podział na poszczególne grupy typologiczne oraz zawartą w nich liczbę inwestycji przedstawiono w tabeli 4.1.

Tabela 4.1. Podział przedsięwzięć budowlanych ujętych w próbie badawczej na grupy typologiczne wraz z ilością dokonanych pomiarów.

Kategoria	Grupa typologiczna	Symbol wg PKOB	Okres pomiarów	Liczba przedsięwzięć budowlanych	Liczba pomiarów
M	Budynki mieszkalne	1130	2006 - 2021	14	218
O	Budynki biurowe	1220	2008 – 2021	4	69
H	Budynki hotelowe	1211	2013 - 2020	9	110
G	Centra handlowe	1230	2008 - 2018	8	113
L	Centra logistyczne	1252	2017 -2022	6	37
Razem				41	547

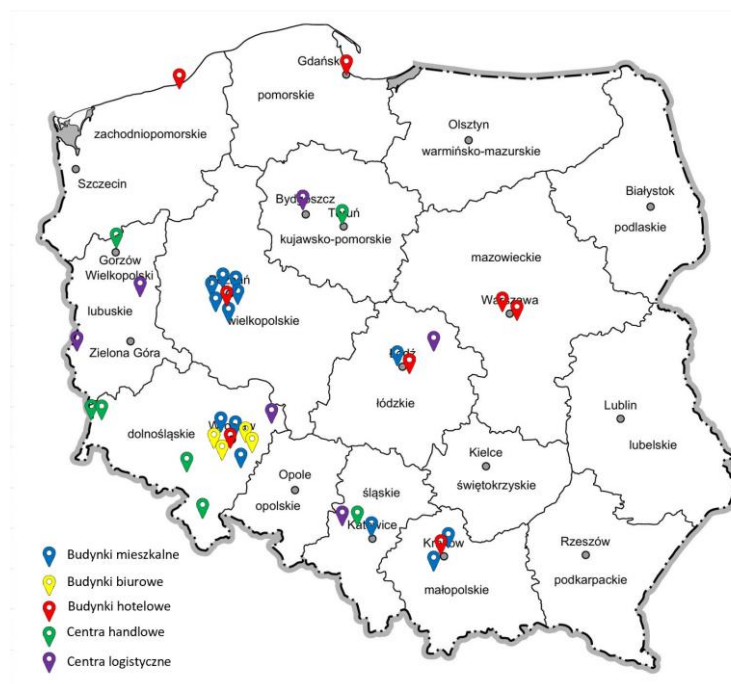
Poniżej przedstawiono fragment bazy danych zawierający szczegółowe zestawienie inwestycji wraz z podaniem ich nazw i okresem realizacji wraz z liczbą dokonanych pomiarów (tabela 4.2)

Tabela 4.2. Szczegółowe zestawienie przedsięwzięć budowlanych ujętych w próbie badawczej

Nr	Obiekt	Nazwa inwestycji	Liczba pomiarów
1	M.1	Mieszkania-MASTERM SOKOŁA_Poznań_2017-18	16
2	M.2	Mieszkania-MASTERM FABRYCZNA_Poznań_2017-19	16
3	M.3	Mieszkania-MASTERM TRÓJPOLE_Poznań_2019-20	16
4	M.4	Mieszkania-ANGEL PARK_Wrocław_2019-22	31
5	M.5	Mieszkania-PIASTOWSKI MĘDŁÓW_Medłów_2010-11	8
6	M.6	Mieszkania-MASTERM BUKOWSKA_Poznań_2015-16	15
7	M.7	Mieszkania-MASTERM TRAUGUTTA_Poznań_2014-15	15
8	M.8	Kamienica-ORANGE PALACE_Łódź-2008-09	12
9	M.9	Mieszkania-PLANTY ŚLĄSKIE_Chorzów_2013-14	22
10	M.10	Mieszkania-FELIŃSKIEGO_Kraków_2010-12_budynek K	18
11	M.11	Mieszkania-MAEXPA_Kraków_2008-10	23
12	M.12	Lofty-ARCHICOM LOFTY PLATINUM_Wrocław_2011-12	22
13	M.13	Mieszkania-OLIMPIA PORT_Wrocław_2015-16	22
14	M.14	Mieszkania-NOVAFORM-NOWE OLENDRY_Poznań_2019-20	18

15	O.1	Biurowiec-ARCHICOM CITY FORUM B_Wrocław_2017-19	30
16	O.2	Biurowiec-WEST FORUM 1B_Wrocław_2012-15_etap I	27
17	O.3	Biurowiec-WEST FORUM 1B_Wrocław_2012-15_etap II	23
18	O.4	Biurowiec-ARCHICOM CITY FORUM A_Wrocław_2019-21	12
19	H.1	Hotel-SHERATON_Warszawa_2017-19	34
20	H.2	Hotel-PROVITA_Kołobrzeg_2016-17	6
21	H.3	Hotel-MARRIOTT_Wrocław_2016-17	17
22	H.4	Hotel Puro Gdańsk_2016-2017	11
23	H.5	Hotel Puro Poznan_2013-14	10
24	H.6	Hotel Puro_Gdańsk II_2016-2017	10
25	H.7	Hotel Puro_Kraków_2016-2018	12
26	H.8	Hotel Puro_Łódź_2017-2019	11
27	H.9	Hotel Puro_Warszawa_2016-2019	14
28	G.1	Centrum Handlowe-NOVA PARK_Gorzów Wielkopolski_2011-	15
29	G.2	Centrum Handlowe-TWIERDZA I_Kłodzko_2008-10	13
30	G.3	Centrum Handlowe-TWIERDZA II_Kłodzko_2010-11	11
31	G.4	Centrum Handlowe-AGORA BYTOM_Bytom_2010-11	24
32	G.5	Centrum Handlowe-ZGORZELEC PLAZA I_Zgorzelec_2009-11	17
33	G.6	Centrum Handlowe rozbudowa-ZGORZELEC PLAZA	6
34	G.7	Centrum Handlowe-GALERIA ŚWIDNICKA_Świdnica_2011-	16
35	G.8	Centrum Handlowe-TORUŃ PLAZA_Toruń_2011-12	19
36	L.1	Centrum Logistyczne_MLP C.2.2_Mirków_2017-18_budynek B1	8
37	L.2	Centrum Logistyczne_MLP_Gliwice_2017-18_budynek A1	8
38	L.3	Centrum Logistyczne_Hillwood_Rokitno_2021-22	9
39	L.4	Centrum Logistyczne_Hillwood_Przyłęki_2021-22	10
40	L.5	Centrum Logistyczne_Hillwood_Słubice_2022-2023	9
41	L.6	Centrum Logistyczne_Hillwood_Łyszkowice_2022-2023	11

Lokalizację poszczególnych inwestycji wskazano na mapie przedstawionej na rys. 4.2. Kolor znacznika określa przynależność do danej grupy obiektów.



Rysunek 4.2. Mapa lokalizacji przedsięwzięć budowlanych ujętych w próbie badawczej

Przykładową strukturę kosztów zawartych w każdym protokole zaawansowania prac dla jednego z analizowanych przedsięwzięć budowlanych przedstawiono w tabeli 4.3.

Tabela 4.3. Przykładowa struktura kosztów w protokole zaawansowania prac

Nr	Nazwa rodzajów robót	Wartość elementów	Wartość bieżącego protokołu	Wartość wg poprzednich protokołów	Wartość narastająco	Wartość pozostała do rozliczenia
1	Roboty fundamenty	200000,00	0,00	200000,00	200000,00	0,00
3	Konstrukcja żelbetowa	980000,00	0,00	980000,00	980000,00	0,00
4	Konstrukcja stalowa	320000,00	100000,00	220000,00	320000,00	0,00
5	Dach	370000,00	70000,00	300000,00	370000,00	0,00
6	Roboty elewacyjne	1200000,00	200000,00	1000000,00	1200000,00	0,00
7	Roboty wykończeniowe	800000,00	250000,00	400000,00	650000,00	150000,00
8	Instalacje elektryczne	800000,00	70000,00	450000,00	520000,00	280000,00
9	Instalacje sanitarne	1500000,00	180000,00	950000,00	1130000,00	370000,00
10	Sieci	1100000,00	130000,00	750000,00	880000,00	220000,00
11	Zagospodarowanie	1600000,00	140000,00	740000,00	880000,00	720000,00
12	Ogólne koszty budowy	550000,00	30000,00	400000,00	430000,00	120000,00
Razem		11 600 000,00	9420000,00	1170000	6390000	7560000

4.2.2. Profil próby badawczej

Cała próba badawcza zawiera 41 przedsięwzięć budowlanych, zakwalifikowanych do pięciu grup, będących odzwierciedleniem wybranych grup typologicznych w Polsce.

Do pierwszej grupy typologicznej (grupa M) zaliczano budynki mieszkalne, wielorodzinne. Łączna ich liczba zgromadzona w tej grupie wyniosła 14. Średni koszt realizacji przedsięwzięć w tej grupie wyniósł 17 684 301,93 PLN, a średni czas realizacji wynosił około 18 miesięcy. Łączny koszt realizacji wszystkich przedsięwzięć wyniósł 247 580 227 PLN. Łączny czas ich realizacji pochłonął 254 miesiące.

W drugiej grupie (grupa O) zgromadzono budynki biurowe. Ich łączna zgromadzona w tym obszarze liczba wyniosła 4. Średni koszt realizacji przedsięwzięć w tej grupie wyniósł 41 518 299,71 PLN, a średni czas realizacji wynosił około 30 miesięcy. Łączny koszt realizacji wszystkich przedsięwzięć wyniósł 166 073 198,83 PLN. Łączny czas ich realizacji wyniósł 121 miesięcy.

Trzecia grupa badawcza zawierała budynki hotelowe (grupa H). Łącznie zgromadzono w niej 9 przedsięwzięć. Średni koszt ich realizacji wyniósł 33 283 067,24 PLN, a średni czas realizacji wynosił około 19 miesięcy. Łączny koszt realizacji wszystkich przedsięwzięć wyniósł 299 547 605,18. Łączny czas realizacji wszystkich przedsięwzięć hotelowych wyniósł 178 miesięcy.

Centra handlowe (grupa G) były przedmiotem analiz prowadzonych w ramach czwartej wydzielonej grupy przedsięwzięć. Łączna ich liczba zgromadzona w tej grupie typologicznej wyniosła 8. Średni koszt realizacji przedsięwzięć w tej grupie wyniósł 65 965 340,49 PLN, a średni czas realizacji wynosił około 15 miesięcy. Łączny koszt realizacji wszystkich przedsięwzięć wyniósł 527 722 723 PLN. Łączny czas ich realizacji wyniósł 121 miesięcy.

Ostatnia grupa badawcza obejmowała centra logistyczne (grupa L). Łącznie zawarto w niej 6 przedsięwzięć. Średni koszt ich realizacji wyniósł 22 232 458 PLN, a średni czas realizacji wynosił około 9 miesięcy. Łączny koszt realizacji wszystkich przedsięwzięć wyniósł

133 394 749. Łączny czas realizacji wszystkich przedsięwzięć hotelowych wyniósł 55 miesięcy.

Łączny koszt realizacji próby badawczej, przypadający na lata 2006 – 2023 wyniósł 1 374 318 504,34 PLN. Łączny czas realizacji wszystkich przedsięwzięć wyniósł 729 miesięcy.

Pozyskany materiał badawczy zawiera również dane dotyczące przedsięwzięć, które można przypisać do innych grup typologicznych, jednak nie rozszerzyły one próby badawczej z uwagi na jednostkowy charakter.

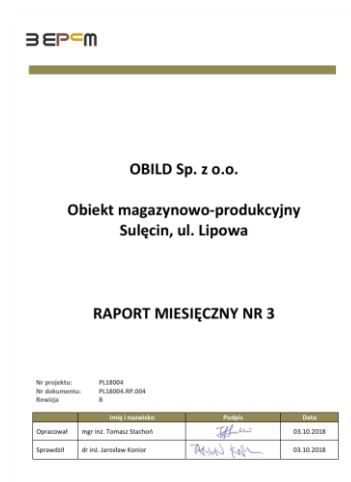
4.3. Metodyka przetwarzania danych

Raporty Bankowego Inspektora Nadzoru – w których pomierzono przedsięwzięcia budowlane, tworzące próbę badawczą - zostały opracowane przez Zespół Badawczy na zlecenie banków udzielających kredytów inwestycyjnych w celu monitorowania parametrów kosztu i terminu w kredytowanych przedsięwzięciach budowlanych.

Autor niniejszej dysertacji jest członkiem Zespołu Badawczego i od 2017 roku sprawuje nadzór nad realizacją przedsięwzięć budowlanych, których przykładem może być zakład przemysłowy w miejscowości Sulęcín w województwie lubuskim. Przedmiotem inwestycji była hala magazynowo – produkcyjna z zapleczem biurowo – socjalnym, naziemny zbiornik przeciwpożarowy oraz parkingi wraz z zagospodarowaniem terenu realizowana w latach 2017 - 2018. Na rysunku nr 4.3. przedstawiono widok zrealizowanego kompleksu. Rysunek 4.4. prezentuje stronę tytułową jednego z raportów okresowych.



Rysunek 4.3. Widok zrealizowanego zakładu przemysłowego



Rysunek 4.4. Strona tytułowa jednego z raportów okresowych

Materiał zebrany na potrzeby analiz współzależności przekroczenia kosztu i terminu w zróżnicowanych przedsięwzięciach budowlanych pochodzą ze realizowanych inwestycji i są efektem wieloletniej pracy Zespołu Badawczego w latach 2006 – 2023. Polegała ona na pomiarach rzeczywistych kosztów robót budowlanych poprzez prowadzenie comiesięcznych, bezpośrednich inspekcji techniczno – finansowych na placach budów realizowanych inwestycji w ramach pełnienia obowiązków Bankowego Inspektora Nadzoru (BIN). Działalność i uprawnienia BIN są kluczowe w zrozumieniu wagi i jakości uzyskanego materiału badawczego. Jest on niezależnym podmiotem który jest powoływany na mocy porozumienia pomiędzy bankiem kredytującym a inwestorem do nadzorowania i audytowania

współfinansowanych przez nich niepublicznych przedsięwzięć inwestycyjnych. Do zadań Bankowego Inspektora Nadzoru należy:

- raportowanie wstępne obejmujące weryfikację dokumentacji dostarczonej przez Inwestora wraz ze wszystkimi pozwoleniami i decyzjami administracyjnymi oraz planowanym budżetem, weryfikacja zawartych przez Inwestora umów;
- raportowanie miesięczne, czyli stały monitoring realizacji inwestycji, rzetelne monitorowanie stanu realizacji inwestycji, weryfikacja i akceptacja rozliczeń i faktur, analiza warunków wypłat transz kredytowych, ewentualne rekomendowanie i wprowadzanie programów naprawczych;
- raportowanie końcowe obejmujące końcową analizę finansową realizacji inwestycji wraz z dokumentacją uzyskania ostatecznych pozwoleń na oddanie obiektu do użytkowania.

W ramach działań Bankowego Inspektora Nadzoru analizom poddano planowane harmonogramy rzeczowo-finansowe opracowane przez inwestorów przed rozpoczęciem prac oraz informacje o rzeczywistym przebiegu realizacji pochodzące z comiesięcznych zestawień i protokołów będących potwierdzeniem ilościowego wykonania robót. Materiały te zostały opracowane na potrzeby comiesięcznych rozliczeń wynagrodzenia między inwestorem a wykonawcą robót. Wszystkie wykazane w dokumentacji wartości kosztu wykonanych prac poddawane były wielokrotnej weryfikacji i sprawdzeniu – w pierwszym etapie przez generalnego wykonawcę i podwykonawców, następnie przez wielobranżowych inspektorów nadzoru, potem przez bankowego inspektora nadzoru, a na końcu przez bank finansujący. Każda kontrola BIN kończyła się sporządzeniem raportu dla banku kredytującego i inwestora. Ustalenia i wnioski zawarte w raportach są dla banku jedynym źródłem informacji na temat przebiegu inwestycji i odgrywają kluczową rolę w podejmowaniu decyzji związanych z udzielonym kredytem inwestycyjnym.

Na podstawie omówionej powyżej dokumentacji dokonywano pomiarów, które następnie zamieszczano w bazie danych. Na każdą wartość kosztu będącą odpowiednikiem jednego pomiaru dla pojedynczego przedsięwzięcia budowlanego, składało się kilkadziesiąt pomiarów zaawansowania prac. Ponieważ pomiary były przeprowadzane dla poszczególnych rodzajów robót, ich liczba dochodziła do kilku tysięcy w całej próbie badawczej.

Aby wykorzystać pozyskane informacje do badań naukowych, ukierunkowanych na badanie współzależności przekroczenia kosztu i terminu w zróżnicowanych przedsięwzięciach budowlanych, należało je przetworzyć w celu dalszej aplikacji do ściśle określonych zastosowań. Proces przetwarzania danych podzielono na 5 podstawowych etapów:

4.3.1. Etap I – gromadzenie danych

Szczegółowy proces pozyskania danych oraz źródło ich pochodzenia zostały szczegółowo omówione w punkcie 4.2. W ramach uzupełnienia należy dodać, że na wstępnym etapie opracowywania bazy danych przyjęto następujące założenia:

- zgromadzone dane pochodzą od jednego, niezależnego podmiotu świadczącego usługi, tj. od Bankowego Inspektora Nadzoru,
- analizowane raporty opracowywane były wg jednolitej metody zbierania danych o przedsięwzięciach budowlanych, niezależnie od typu obiektu budowlanego,

- informacje o przebiegu przedsięwzięć budowlanych są niezależne i deterministyczne,
- pozyskane do analizy przedsięwzięcia budowlane obejmują zadania inwestycyjne, które zostały ukończone.

Punktem wyjścia do kolejnego etapu przetwarzania danych były informacje finansowe pozyskane z analiz ujętych w raportach BIN.

4.3.2. Etap II – standaryzacja danych

Istotnym elementem przygotowywania danych do prowadzenia badań była ich standaryzacja czyli proces, w którym integruje się dane z różnych źródeł oraz przekształca je do wspólnego formatu. Ma to na celu ich porównywanie i ułatwienie analizy oraz umożliwienie efektywnego wykorzystania w procedurach badawczych. Źródłami danych były raporty opracowane na potrzeby poszczególnych przedsięwzięć budowlanych ujętych w bazie danych. Ponieważ każdy z raportów został opracowany według tego samego, jednolitego wzorca, standaryzacja opierała się na przeniesieniu wartości planowanego kosztu planowanej pracy (*BCWS*), planowanego kosztu wykonanej pracy (*BCWP*) oraz rzeczywistego kosztu wykonanej pracy (*ACWP*) z treści raportu do zestawienia zbiorczego tworzonego w kolejnym etapie pracy.

Tabela 4.4. Przykładowa wartość *BCWS* pozyskana z zestawienia struktury kosztów zawartych w protokole zaawansowania prac

Nr	Nazwa rodzajów robót	Wartość elementów	Wartość bieżącego protokołu	Wartość wg poprzednich protokołów	Wartość narastająco	Wartość pozostała do rozliczenia
1	Fundamenty	100 000,00	0,00	100 000,00	100 000,00	0,00
3	Konstrukcja żelbetowa	1 250 000,00	0,00	1 250 000,00	1 250 000,00	0,00
4	Konstrukcja stalowa	250 000,00	0,00	250 000,00	250 000,00	0,00
5	Dach	300 000,00	50 000,00	250 000,00	300 000,00	0,00
6	Elewacja	1 000 000,00	100 000,00	900 000,00	1 000 000,00	0,00
7	Roboty wykończeniowe	2 000 000,00	200 000,00	1 100 000,00	1 300 000,00	700 000,00
8	Instalacje elektryczne i teletechniczne	750 000,00	150 000,00	450 000,00	600 000,00	100 000,00
9	Instalacje sanitarne	1 750 000,00	200 000,00	950 000,00	1 150 000,00	600 000,00
10	Sieci	1 000 000,00	100 000,00	800 000,00	900 000,00	100 000,00
11	Zagospodarowanie terenu i prace ziemne	2 500 000,00	200 000,00	1 800 000,00	2 000 000,00	500 000,00
12	Koszt ogólny	700 000,00	50 000,00	500 000,00	550 000,00	150 000,00
	Razem	11 600 000,00	1 050 000,00	8 350 000,00	9 400 000,00	2 150 000,00

Na przykładzie tabeli 4.4. przedstawiono pozyskanie wartości planowanego kosztu planowanej pracy. W analogiczny sposób pozyskiwano pozostałe wartości, których źródłem były inne tabele ujęte w raporcie. Kolorem czerwonym zaznaczono przykładową wartość *BCWS*, która posłużyła do utworzenia próby badawczej.

Tak pozyskane wartości posłużyły do opracowania tabelarycznego zestawienia (tabela 4.5.), które zostało opracowane w ramach etapu III omówionego w punkcie 4.3.3.

4.3.3. Etap III – opracowanie danych

W wyniku analiz raportów opracowano bazę danych będących zbiorczym zestawieniem danych wykonanym w formie dwuwymiarowej tabeli w programie Microsoft Excel, zawierającej wybrane informacje dotyczące poszczególnych przedsięwzięć budowlanych. W tabeli każda kolejna kolumna zawierała dane dotyczące kolejnych raportowanych okresów, natomiast każdy wiersz zawierał informację o kolejnym przedsięwzięciu budowlanym. Strukturę bazy danych o przedsięwzięciach budowlanych w części dotyczącej kosztów przedstawiono w tabeli 4.6, która prezentuje wartości skumulowane poszczególnych kosztów. Każdy zestaw danych zawiera następujące wartości, które zostały opracowane z wykorzystaniem metody EVM:

- planowany koszt planowanej pracy ($BCWS_i$), określony dla każdego pojedynczego badanego okresu $i \in (1, \dots, n)$, gdzie n – oznacza liczbę okresów rozliczeniowych, określoną na podstawie bazowego harmonogramu rzeczowo-finansowego. Wartość planowanych kosztów planowanej pracy ($BCWS_i$) wyrażona jest w przyjętej dla analizowanego przedsięwzięcia budowlanego walucie, np. PLN,
- skumulowana wartość planowanego kosztu planowanej pracy (C_{BCWS_i}), określona dla każdego pojedynczego badanego okresu $i \in (1, \dots, n)$, otrzymana poprzez zsumowanie poszczególnych wartości planowanego kosztu planowanej pracy ($BCWS_i$) poprzedzające analizowany okres rozliczeniowy włącznie z badanym okresem rozliczeniowych, zgodnie ze wzorem ogólnym:

$$C_{BCWS_i} = BCWS_1 + BCWS_2 + \dots + BCWS_i + \dots + BCWS_n = \sum_{i=1}^n BCWS_i \quad [4.1.]$$

Skumulowana wartość planowanego kosztu planowanej pracy (C_{BCWS_i}) wyrażona jest w przyjętej dla analizowanego przedsięwzięcia budowlanego walucie, np. PLN,

- planowany koszt wykonanej pracy ($BCWP_j$), określony dla każdego pojedynczego badanego okresu $j \in (1, \dots, m)$, gdzie m – oznacza liczbę okresów rozliczeniowych określoną na podstawie liczby przerobów finansowych i rzeczywistego czasu trwania analizowanego przedsięwzięcia budowlanego. Wartość wyrażona w przyjętej dla analizowanego przedsięwzięcia budowlanego walucie, np. PLN,
- skumulowana wartość planowanego kosztu wykonanej pracy (C_{BCWP_j}), określona dla każdego pojedynczego badanego okresu $j \in (1, \dots, m)$, otrzymana poprzez zsumowanie poszczególnych wartości planowanego kosztu wykonanej pracy ($BCWP_j$) poprzedzające analizowany okres rozliczeniowy włącznie z badanym okresem rozliczeniowym, zgodnie ze wzorem ogólnym:

$$C_{BCWP_j} = BCWP_1 + BCWP_2 + \dots + BCWP_j + \dots + BCWP_m = \sum_{j=1}^m BCWP_j \quad [4.2.]$$

Skumulowana wartość planowanego kosztu wykonanej pracy (C_{BCWP_j}) wyrażona jest w przyjętej dla analizowanego przedsięwzięcia budowlanego walucie, np. PLN,

- rzeczywisty koszt wykonanej pracy ($ACWP_j$), określony dla każdego pojedynczego badanego okresu $j \in (1, \dots, m)$, gdzie m – oznacza liczbę okresów rozliczeniowych

określoną na podstawie liczby przerobów finansowych i rzeczywistego czasu trwania analizowanego przedsięwzięcia budowlanego. Wartość wyrażona w przyjętej dla analizowanego przedsięwzięcia budowlanego walucie, np. PLN,

- skumulowana wartość rzeczywistego kosztu wykonanej pracy (C_{ACWP_j}), określona dla każdego pojedynczego badanego okresu $j \in (1, \dots, m)$, otrzymana poprzez zsumowanie poszczególnych wartości rzeczywistego kosztu wykonanej pracy ($ACWP_j$) poprzedzające analizowany okres rozliczeniowy włącznie z badanym okresem rozliczeniowym, zgodnie ze wzorem ogólnym:

$$C_{ACWP_j} = ACWP_1 + ACWP_2 + \dots + ACWP_j + \dots + ACWP_m = \sum_{j=1}^m ACWP_j \quad [4.3.]$$

Skumulowana wartość rzeczywistego kosztu wykonanej pracy (C_{ACWP_j}) wyrażona jest w przyjętej dla analizowanego przedsięwzięcia budowlanego walucie, np. PLN,

Tabela 4.5. Struktura bazy danych o przedsięwzięciach budowlanych w części dotyczącej kosztów (fragment zestawienia)

Nr	Obiekt	Ilość pomiarów	...	BCWS.3	BCWS.4	...	BCWP.3	BCWP.4	...	ACWP.3	ACWP.4	...
1	M.1	17	...	3 255 000.00	4 705 000.00	...	3 305 000.00	4 153 000.00	...	3 305 000.00	4 153 000.00	...
2	M.2	17	...	1 613 891.00	2 440 787.00	...	1 980 000.00	2 824 226.00	...	1 980 123.48	2 824 254.90	...
3	M.3	17	...	2 038 395.00	2 868 920.00	...	2 690 403.00	3 905 403.00	...	2 690 403.00	3 905 403.00	...
4	M.4	9	...	3 495 000.00	6 745 000.00	...	4 145 088.85	6 671 323.75	...	4 145 088.85	6 671 323.75	...
5	M.5	9	...	368 600.14	685 121.77	...	399 060.48	690 843.45	...	399 060.48	690 843.45	...
6	M.6	16	...	1 150 00.00	2 854 500.00	...	1 185 000.00	2 520 000.00	...	1 185 000.00	2 520 000.00	...
7	M.7	16	...	3 084 075.00	4 660 052.00	...	2 133 000.00	3 213 000.00	...	2 160 799.09	3 263 795.60	...
8	M.8	13	...	1 134 310.00	2 188 132.00	...	337 502.00	711 473.00	...	337 502.00	711 473.00	...
9	M.9	23	...	2 872 760.00	4 066 910.00	...	2 217 028.07	3 460 704.12	...	2 217 028.07	3 460 704.12	...
10	M.10	19	...	1 253 366.00	1 630 029.00	...	961 715.00	1 253 366.00	...	961 715.00	1 253 366.00	...
11	M.11	24	107 134.00	107 134.00	...	107 134.00	107 134.00	...
12	M.12	23	...	1 573 007.00	2 531 664.00	...	1 573 007.09	2 531 663.99	...	1 573 007.09	2 531 663.99	...
13	M.13	23	...	940 309.20	1 472 956.64	...	940 309.20	1 472 956.65	...	940 309.20	1 472 956.65	...
14	M.14	19	...	1 727 439.37	2 996 728.20	...	1 727 439.37	2 704 382.48	...	1 727 439.37	2 996 728.20	...
15	O.1	31	...	2 919 300.00	4 496 520.00	...	2 919 300.00	4 496 520.00	...	2 919 300.00	4 496 520.00	...
16	O.2	28	...	3 726 370.00	4 716 089.00	...	2 188 929.00	2 905 693.00	...	2 188 929.00	2 905 693.00	...
17	O.3	24	...	2 188 929.00	2 905 693.00	...	3 827 570.76	4 905 966.20	...	2 987 439.84	4 510 265.76	...
18	O.4	42	...	7 393 112.55	8 919 812.55	...	7 393 112.55	8 919 812.55	...	7 393 112.55	8 919 812.55	...
19	H.1	35	...	4 048 603.00	5 835 332.00	...	4 048 602.90	5 835 331.92	...	4 048 602.90	5 833 331.93	...
20	H.2	7	...	11 434 824.08	17 475 452.06	...	8 667 951.78	13 317 478.03	...	8 667 146.00	13 331 830.00	...
21	H.3	18	...	1 797 060.00	2 649 172.00	...	1 797 060.41	2 649 172.33	...	1 797 060.41	2 649 172.33	...
22	H.4	17	...	863 427.28	2 409 888.26	...	90 195.79	2 409 887.26	...	90 195.79	2 409 887.26	...
23	H.5	16	...	1 410 345.00	2 985 565.72	...	2 298 832.42	3 059 858.30	...	2 298 832.42	3 059 858.30	...
24	H.6	19	...	1 308 511.10	1 660 486.89	...	1 315 128.88	1 512 411.18	...	1 315 128.88	1 512 411.18	...
25	H.7	20	...	2 850 828.53	4 627 299.20	...	3 693 234.42	4 723 918.92	...	3 693 234.42	4 723 918.92	...
26	H.8	25	...	1 127 115.15	1 555 909.93	...	1 127 115.15	1 555 909.93	...	1 127 115.15	1 555 909.93	...
27	H.9	28	...	1 675 425.83	2 020 945.32	...	1 675 425.83	2 020 945.00	...	1 675 425.83	2 020 945.00	...
28	G.1	16	...	35 372 128.00	49 014 882.00	...	28 651 895.28	36 746 525.35	...	31 441 500.00	39 649 500.00	...

29	G.2	14	...	8 735 718,00	17 585 116,49	...	8 735 718,00	16 474 331,08	...	8 735 718,00	16 474 331,08	...
30	G.3	12	...	1 325 000,00	2 055 128,21	...	2 634 500,00	3 416 500,00	...	2 634 500,00	3 416 500,00	...
31	G.4	25	...	27 064 941,05	37 521 658,67	...	14 304 635,32	21 320 279,28	...	14 304 635,32	21 320 279,28	...
32	G.5	18	...	2 570 000,00	3 970 000,00	...	3 082 974,96	3 735 424,16	...	2 929 920,00	3 522 880,00	...
33	G.6	7	...	613 386,00	859 386,00	...	759 593,83	857 890,61	...	721 613,78	814 995,80	...
34	G.7	17	...	9 221 113,98	11 709 871,61	...	9 221 113,98	11 709 871,61	...	9 221 113,98	11 709 871,61	...
35	G.8	20	...	766 475,00	1 494 074,00	...	766 474,72	1 494 073,74	...	766 474,72	1 430 557,04	...
36	L.1	9	...	1 609 364,00	2 595 410,00	...	1 648 644,00	2 449 525,00	...	1 693 322,25	2 029 616,50	...
37	L.2	9	...	3 504 169,00	5 663 252,00	...	4 162 438,00	5 909 585,00	...	4 216 965,94	5 987 000,56	...
38	L.3	10	...	10 102 910,00	17 704 916,28	...	10 102 910,00	17 704 916,28	...	10 102 910,00	17 704 916,28	...
39	L.4	11	...	3 378 500,00	8 209 330,00	...	3 378 500,00	8 209 330,00	...	3 378 500,00	8 209 330,00	...
40	L.5	10	...	4 107 372,69	7 354 743,00	...	4 133 598,20	7 420 600,65	...	4 133 598,20	7 420 600,65	...
41	L.6	12	...	5 967 920,95	12 459 255,25	...	5 967 920,95	12 459 255,25	...	5 967 920,95	12 459 255,25	...

4.3.4. Etap IV – przetworzenie danych

Z uwagi na tematykę pracy skupioną wokół przekroczenia kosztu i przekroczenia terminu, w kolejnym etapie dokonano przetwarzania danych, w oparciu o planowany koszt wykonanej pracy ($BCWP_j$), rzeczywisty koszt wykonanej pracy ($ACWP_j$) oraz planowany koszt planowanej pracy ($BCWS_i$), możliwe było wyznaczenie dwóch wskaźników które odzwierciedlają przekroczenie kosztu i przekroczenie terminu inwestycji:

- Wskaźnik wykonania budżetu (CPI_j^I), określony dla każdego pojedynczego badanego okresu $j \in (1, \dots, m)$, gdzie m – oznacza liczbę okresów rozliczeniowych określoną na podstawie liczby przerobów finansowych i rzeczywistego czasu trwania analizowanego przedsięwzięcia budowlanego.

$$CPI_j^I = \frac{BCWP_j}{ACWP_j} \quad [4.4.]$$

Wartość wskaźnika jest bezwymiarowa, co wprost wynika ze sposobu jego wyznaczania.

- Wskaźnik wykonania harmonogramu (SPI_j^I), określany dla każdego pojedynczego badanego okresu $j \in (1, \dots, m)$, gdzie m – oznacza liczbę okresów rozliczeniowych określoną na podstawie liczby przerobów finansowych i rzeczywistego czasu trwania analizowanego przedsięwzięcia budowlanego

$$SPI_j^I = \frac{BCWP_j}{BCWS_i} \quad [4.5.]$$

Wskaźniki również w tym przypadku przyjmują postać bezwymiarową.

Wartości obu wskaźników zostały wyznaczone w oparciu o formuły zawarte w metodzie EVM którą omówiono w rozdziale III. Strukturę bazy danych o przedsięwzięciach budowlanych w części dotyczącej odchylen kosztu i odchylen terminu przedstawiono w tabeli 4.6.

Tabela 4.6. Struktura bazy danych o przedsięwzięciach budowlanych w części dotyczącej odchyłeń (fragment zestawienia)

Nr	Symbol	Ilość pomiarów	...	CPI.3	CPI.4	CPI.5	CPI.6	...	SPI.3	SPI.4	SPI.5	SPI.6	...
1	M.1	17	...	1,00	1,00	1,00	1,00	...	1,00	1,00	1,00	1,00	...
2	M.2	17	...	1,00	1,00	1,00	1,00	...	1,00	1,00	1,00	1,00	...
3	M.3	17	...	1,00	1,00	1,00	1,00	...	1,32	1,36	1,22	1,20	...
4	M.4	9	...	1,00	1,00	1,00	1,00	...	1,19	0,99	0,77	0,68	...
5	M.5	9	...	1,00	1,00	1,11	1,00	...	1,08	1,01	1,22	1,13	...
6	M.6	16	...	1,00	1,00	1,00	1,00	...	1,03	0,88	0,91	0,81	...
7	M.7	16	...	0,99	0,98	0,98	0,98	...	0,69	0,69	0,68	0,68	...
8	M.8	13	...	1,00	1,00	1,00	1,00	...	0,30	0,33	0,43	0,47	...
9	M.9	23	...	1,00	1,00	1,00	1,00	...	0,77	0,85	0,85	0,87	...
10	M.10	19	...	1,00	1,00	1,00	1,00	...	0,77	0,77	0,81	0,84	...
11	M.11	24	...	1,00	1,00	1,00	1,00	...				0,78	...
12	M.12	23	...	1,00	1,00	1,00	0,76	...	1,00	1,00	0,94	0,94	...
13	M.13	23	...	1,00	1,00	1,00	1,00	...	1,00	1,00	1,00	0,83	...
14	M.14	19	...	1,00	0,90	0,98	0,98	...	1,00	0,90	0,98	0,98	...
15	O.1	31	...	1,00	1,00	1,00	1,00	...	1,00	1,00	1,00	1,00	...
16	O.2	28	...	1,00	1,00	1,00	0,88	...	0,59	0,62	0,63	0,61	...
17	O.3	24	...	1,28	1,09	1,04	1,04	...	1,75	1,69	1,50	1,30	...
18	O.4	42	...	1,00	1,00	1,00	1,00	...	1,00	1,00	0,92	1,00	...
19	H.1	35	...	1,00	1,00	1,00	1,00	...	1,00	1,00	1,00	1,00	...
20	H.2	7	...	1,00	1,00	1,00	1,04	...	0,76	0,76	0,79	1,00	...
21	H.3	18	...	1,00	1,00	1,00	1,00	...	1,00	1,00	1,00	1,00	...
22	H.4	17	...	1,00	1,00	1,00	1,00	...	0,10	1,00	0,98	0,97	...
23	H.5	16	...	1,00	1,00	1,00	1,00	...	1,63	1,02	0,96	0,98	...
24	H.6	19	...	1,00	1,00	1,00	1,00	...	1,01	0,91	0,95	0,82	...
25	H.7	20	...	1,00	1,00	1,00	1,00	...	1,30	1,02	1,09	1,07	...
26	H.8	25	...	1,00	1,00	1,00	1,00	...	1,00	1,00	1,00	1,00	...
27	H.9	28	...	1,00	1,00	1,00	1,00	...	1,00	1,00	1,00	1,04	...
28	G.1	16	...	0,91	0,93	0,94	0,94	...	0,81	0,75	0,68	0,67	...
29	G.2	14	...	1,00	1,00	1,11	1,10	...	1,00	0,94	0,93	0,92	...
30	G.3	12	...	1,00	1,00	1,00	1,00	...	1,99	1,66	1,76	1,11	...
31	G.4	25	...	1,00	1,00	1,00	1,00	...	0,53	0,57	0,59	0,71	...
32	G.5	18	...	1,05	1,06	1,06	1,07	...	1,20	0,94	0,83	0,82	...
33	G.6	7	...	1,05	1,05	1,05	1,03	...	1,24	1,00	0,83	0,91	...
34	G.7	17	...	1,00	1,00	1,00	1,00	...	1,00	1,00	1,00	1,00	...
35	G.8	20	...	1,00	1,04	1,02	0,96	...	1,00	1,00	0,97	0,97	...
36	L.1	9	...	0,97	1,21	1,20	1,17	...	1,02	0,94	0,91	0,97	...
37	L.2	9	...	0,99	0,99	0,99	0,99	...	1,19	1,04	0,95	0,91	...
38	L.3	10	...	1,00	1,00	1,00	1,00	...	1,00	1,00	1,00	0,98	...
39	L.4	11	...	1,00	1,00	1,00	1,00	...	1,00	1,00	0,57	0,78	...
40	L.5	10	...	1,00	1,00	1,00	1,00	...	1,01	1,01	1,01	1,03	...
41	L.6	12	...	1,00	1,00	1,00	1,00	...	1,00	1,00	1,00	0,78	...

Opracowane na podstawie formuł pochodzących z metody EVM wartości wskaźników wykonania budżetu (CPI) i harmonogramu (SPI) przedstawiają wartości odchyłeń na podstawie których można stwierdzić nie tylko czy doszło do przekroczenia danego parametru, ale również ocenić wielkość tego przekroczenia. Tak opracowane wartości zostały wykorzystane w części analiz prowadzonych w dalszej części pracy. Niektóre z planowanych analiz wymagały danych które wskazywałyby jedynie czy w danym okresie nastąpiło przekroczenie poszczególnych wskaźników czy nie. W związku z tym baza danych ulegała kolejnemu przetworzeniu, w efekcie czego dane zostały sprowadzone do formy dychotomicznej:

- Dychotomiczny wskaźnik wykonania budżetu (CPI_j^{II}), określony dla każdego pojedynczego badanego okresu $j \in (1, \dots, m)$, gdzie m – oznacza liczbę okresów rozliczeniowych określoną na podstawie liczby przerobów finansowych i rzeczywistego czasu trwania analizowanego przedsięwzięcia budowlanego.

$$CPI_j^{II} = \begin{cases} 1 & \text{dla } CPI_j^I < 1 \\ 0 & \text{dla } CPI_j^I \geq 1 \end{cases} \quad [4.6.]$$

- Dychotomiczny wskaźnik wykonania harmonogramu (SPI_j^{II}), określany dla każdego pojedynczego badanego okresu $j \in (1, \dots, m)$, gdzie m – oznacza liczbę okresów

rozliczeniowych określoną na podstawie liczby przerobów finansowych i rzeczywistego czasu trwania analizowanego przedsięwzięcia budowlanego

$$SPI_j^{II} = \begin{cases} 1 & \text{dla } SPI_j^I < 1 \\ 0 & \text{dla } SPI_j^I \geq 1 \end{cases} \quad [4.7.]$$

Oba wskaźniki przyjmują również wartości bezwymiarowe. Fragment bazy danych przetworzonych do formy dychotomicznej przedstawiono w tabeli 4.7.

Tabela 4.7. Struktura bazy danych o przedsięwzięciach budowlanych w części dotyczącej odchyień w formie dychotomicznej (fragment zestawienia)

Nr	Symbol	Ilość pomiarów	...	CPI.3	CPI.4	CPI.5	CPI.6	...	SPI.3	SPI.4	SPI.5	SPI.6	...
1	M.1	17	...	0	0	0	0	...	0	0	0	0	...
2	M.2	17	...	1	1	1	0	...	0	1	1	1	...
3	M.3	17	...	0	0	0	0	...	0	0	0	0	...
4	M.4	9	...	0	0	0	0	...	0	1	1	1	...
5	M.5	9	...	0	0	0	0	...	1	1	1	1	...
6	M.6	16	...	0	0	0	0	...	1	1	1	1	...
7	M.7	16	...	1	1	1	1	...	1	1	1	1	...
8	M.8	13	...	0	0	0	0	...	1	1	1	1	...
9	M.9	23	...	0	1	1	1	...				1	...
10	M.10	19	...	0	0	0	0	...	0	1	1	1	...
11	M.11	24	...	0	0	0	0	...	0	0	0	1	...
12	M.12	23	...	0	0	0	1	...	0	1	1	1	...
13	M.13	23	...	0	0	0	0	...	0	0	0	0	...
14	M.14	19	...	0	1	1	1	...	1	1	1	1	...
15	O.1	31	...	0	0	0	0	...	0	0	0	0	...
16	O.2	28	...	0	1	1	1	...	0	0	1	0	...
17	O.3	24	...	0	0	0	0	...	1	1	1	0	...
18	O.4	42	...	0	0	0	0	...	1	1	1	0	...
19	H.1	35	...	0	1	1	1	...	0	0	1	0	...
20	H.2	7	...	0	0	0	0	...	1	1	1	1	...
21	H.3	18	...	0	0	0	0	...	0	0	1	1	...
22	H.4	17	...	1	1	1	1	...	0	1	1	1	...
23	H.5	16	...	1	0	1	1	...	0	0	0	0	...
24	H.6	19	...	0	1	1	1	...	0	0	0	0	...
25	H.7	20	...	0	0	0	0	...	0	1	1	0	...
26	H.8	25	...	1	0	1	1	...	1	1	1	1	...
27	H.9	28	...	0	0	0	0	...	0	1	1	1	...
28	G.1	16	...	0	0	1	1	...	0	0	0	0	...
29	G.2	14	...	0	0	0	0	...	1	1	1	1	...
30	G.3	12	...	0	0	1	1	...	0	1	1	1	...
31	G.4	25	...	0	0	0	0	...	0	1	1	1	...
32	G.5	18	...	0	0	0	0	...	0	0	0	0	...
33	G.6	7	...	0	0	0	0	...	1	1	1	1	...
34	G.7	17	...	0	0	0	0	...	0	1	1	1	...
35	G.8	20	...	0	0	0	1	...	0	0	1	1	...
36	L.1	9	...	1	0	0	0	...	0	0	0	1	...
37	L.2	9	...	1	1	1	1	...	0	0	1	1	...
38	L.3	10	...	0	0	0	0	...	0	0	0	0	...
39	L.4	11	...	0	0	0	0	...	0	0	0	1	...
40	L.5	10	...	0	0	0	0	...	0	0	0	0	...
41	L.6	12	...	0	0	0	0	...	0	1	1	1	...

4.3.5. Etap V – walidacja danych

W ramach kontroli przebiegu przedsięwzięć opracowywano cykliczne raporty będące efektem comiesięcznych inspekcji. W każdym kolejnym raporcie odwoływano się do wcześniejszych opracowań, sprawdzając tym samym poprawność pomiarów i przetworzeń w nim zawartych. W protokole zaawansowania prac zamieszczana była informacja o zakresie robót wykonanych w analizowanym okresie rozliczeniowym, zakresie robót wykonanych w poprzednim okresie rozliczeniowym, oraz informacja o zakresie robót prezentowana jako wartość narastająca. Zatem w ramach opracowywania danego raportu potwierdzano w udokumentowany sposób prawidłowość danych wykazanych w raporcie wcześniejszym. Zatem

w cyklach miesięcznych walidowano trend współzależności przekroczenia kosztu i przekroczenia terminu w monitorowanym i mierzonym przedsięwzięciu budowlanym.

4.4. Podsumowanie

Materiał badawczy pozyskany do bazy danych jest wyjątkowy z kilku powodów. Przede wszystkim dane pochodzą z rzeczywiście realizowanych inwestycji budowlanych, co zwiększa ich wiarygodność i jakość. Raporty gromadzone przez Bankowego Inspektora Nadzoru były sporządzane według jednolitych kryteriów i zasad, co zapewnia spójność i porównywalność danych. Dodatkowo, dane te obejmują szeroki zakres różnych typów budynków ujętych w pięciu grupach typologicznych, co pozwala na wszechstronną analizę kosztów i czasu realizacji przedsięwzięć budowlanych. Wszystkie zebrane dane były wielokrotnie weryfikowane przez różne podmioty (menedżerów przedsięwzięcia, uczestników procesu inwestycyjnego, departamenty analiz ryzyka banków finansujących), co gwarantuje ich wysoką jakość i poprawność merytoryczną. Wartości przerobów i kosztów wykonanych robót budowlanych były dokładnie sprawdzane i dokumentowane, co redukuje możliwość wystąpienia błędów. Ponadto – ponieważ wszystkie dane były gromadzone w czasie rzeczywistym podczas realizacji inwestycji – odzwierciedlają one rzeczywiste warunki i wyzwania, z jakimi borykają się inwestorzy i wykonawcy na placu budowy. Zgromadzona próba badawcza, obejmująca 41 przedsięwzięć budowlanych i 547 raportów, stanowi unikalny i wartościowy zbiór danych do analizy współzależności pomiędzy przekroczeniem kosztu i przekroczeniem terminu w zróżnicowanych przedsięwzięciach budowlanych. Wysoka jakość, spójność oraz ich pochodzenie z rzeczywistych inwestycji budowlanych, zapewniły solidne podstawy do przeprowadzenia wiarygodnych, użytecznych analiz i badań. Dzięki temu możliwe było lepsze zrozumienie czynników wpływających na koszt i czas realizacji przedsięwzięć budowlanych, co w konsekwencji może prowadzić do bardziej efektywnego zarządzania tymi projektami w przyszłości.

Tak opracowana próba badawcza posłużyła do opracowania graficznego oraz tabelarycznego zobrazowania zgromadzonych danych, które wykorzystano w rozdziale V do analizy przebiegu zmienności badanych cech, a następnie do przeprowadzenia badań w rozdziałach badawczych VI - IX. W pierwszej kolejności analizowano korelacje pomiędzy przekroczeniem kosztu i przekroczeniem terminu w rozdziale VI. W rozdziale VII określano prawdopodobieństwa warunkowe obu tych cech. W dalszej części pracy przeprowadzono szacowanie całkowitego kosztu oraz terminu zakończenia przedsięwzięć budowlanych (rozdział VIII) oraz analizowano odchylenia kosztu w rozdziale IX. Przeprowadzone badania pozwoliły zbadać czy istnieje współzależność pomiędzy przekroczeniem kosztu i przekroczeniem terminu w zróżnicowanych przedsięwzięciach budowlanych.

ROZDZIAŁ V

Analiza przebiegu zmienności kosztu i terminu w przedsięwzięciach budowlanych

5.1. Wprowadzenie

Dane zgromadzone i opisane w rozdziale IV – próbie badawczej, po ich uprzednim sklasyfikowaniu i przygotowaniu z wykorzystaniem metody EVM, pozwoliły na analizę przebiegu zmienności kosztu i terminu w zrealizowanych przedsięwzięciach budowlanych .

W pierwszej kolejności przedstawiono charakterystyczne dla każdego przedsięwzięcia budowlanego przebiegi krzywej S. Zostały one opracowane w oparciu o zaplanowane dane wynikające z harmonogramu (krzywe BCWS) oraz w oparciu o wyniki uzyskane z obserwacji rzeczywistego przebiegu przedsięwzięć (krzywe AWCP). Ponieważ każda inwestycja przebiega w indywidualny sposób, uzależniony od wielu czynników, zaprezentowane zostały obwiednie krzywych S, które określają zakres kosztowo – czasowy każdej grupy przedsięwzięć. Pozwoliło to na ocenę zróżnicowania przebiegu poszczególnych inwestycji na poszczególnych etapach w ramach danej grupy. Ostatnim elementem obserwacji była ocena wielkości odchyień od wartości średniej, która pozwoliła ustalić jak bardzo mogą odbiegać zarówno planowane jak i wypracowane koszty inwestycji na tle całej grupy.

5.2. Przebieg funkcji krzywej S w zróżnicowanych przedsięwzięciach budowlanych

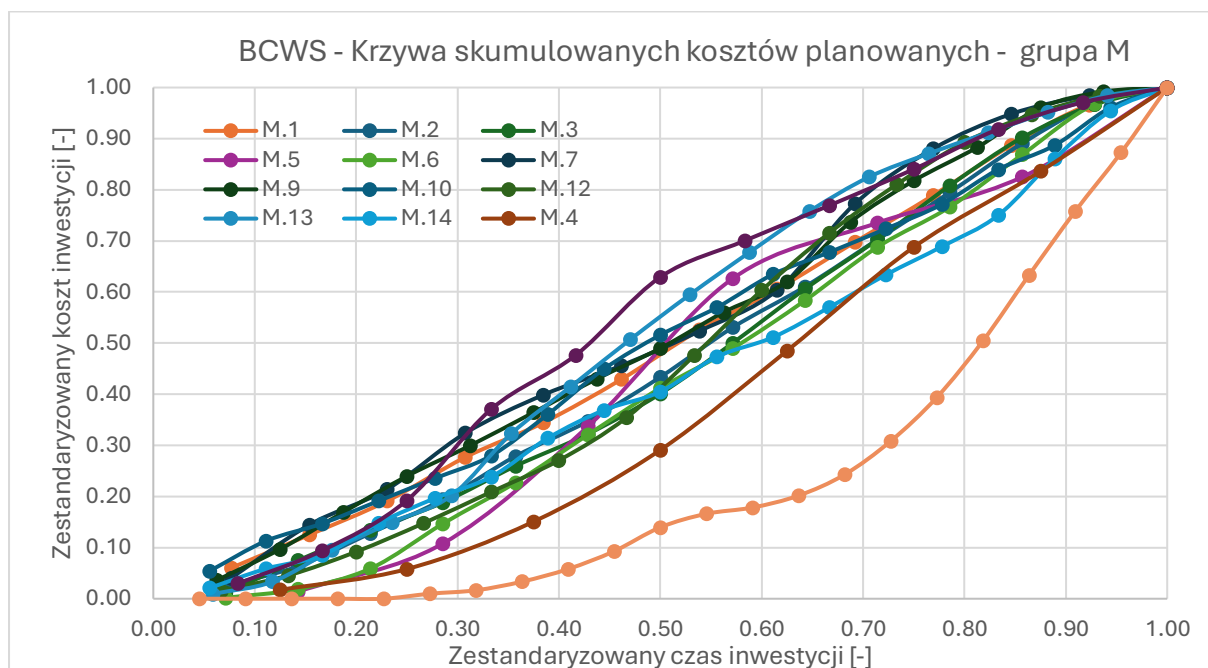
Krzywa S jest wykresem skumulowanych kosztów przedsięwzięcia w czasie jego realizacji. Każda kolejna wartość tworząca wykres jest sumą wartości uzyskanej we wcześniejszym okresie oraz kosztów poniesionych w okresie bieżącym. Jest to narzędzie wykorzystywane w niektórych metodach kontroli przebiegu inwestycji, między innymi w metodzie EVM wykorzystywanej w niniejszej pracy. Z uwagi na różnice w kosztach i okresie trwania analizowanych inwestycji, w celu ujednoczenia i większej przejrzystości prezentowanych wykresów przeprowadzono normalizację danych. W jej efekcie zarówno koszt inwestycji jak i czas ich trwania sprowadzono do wskaźnikowych wartości „0” jako rozpoczęcia i „1” jako ich zakończenia.

Każda inwestycja została przedstawiona na wykresie indywidualnym kolorem i oznaczona kodem (np. M.4), w którym litera oznacza przynależność do określonej grupy obiektów a liczba odnosi się do konkretnego przedsięwzięcia. Zestawienie wszystkich przedsięwzięć wraz z ich oznaczeniami przedstawiono w rozdziale IV w tabeli 4.3.

5.2.1. Przebieg krzywej S skumulowanego kosztu planowanego

Wartości kosztu planowanego (BCWS) uzyskano z harmonogramów przedsięwzięć które powstały na etapie ich planowania. Po podziale próby badawczej na grupy przedsięwzięć

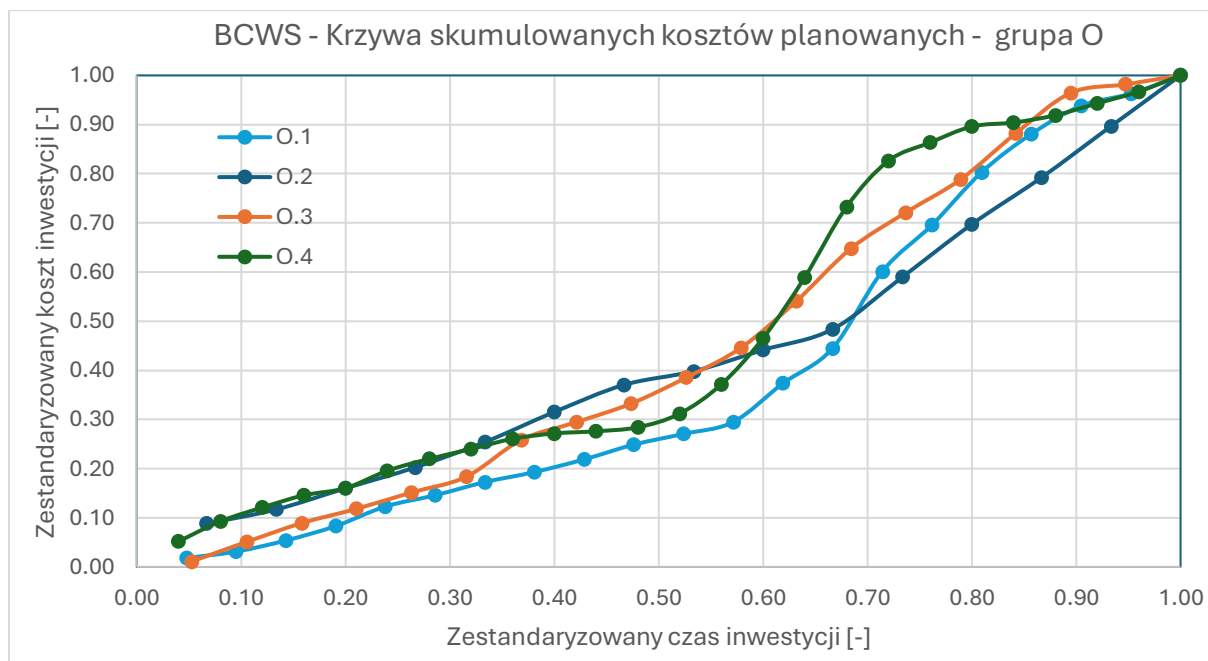
o jednakowym profilu sporządzono zbiorczy wykres krzywych S dla wszystkich inwestycji z grupy budynków mieszkalnych (M) - rys. 5.1.



Rysunek 5.1. Przebieg krzywych S dla grupy budynków mieszkalnych (M).

Zaobserwowano wąski przedział występowania wartości na niemal każdym etapie realizacji. Widoczne rozbieżności pomiędzy poszczególnymi przedsięwzięciami wynikają z oczywistych różnic, zarówno technicznych jak i organizacyjnych pomiędzy nimi.

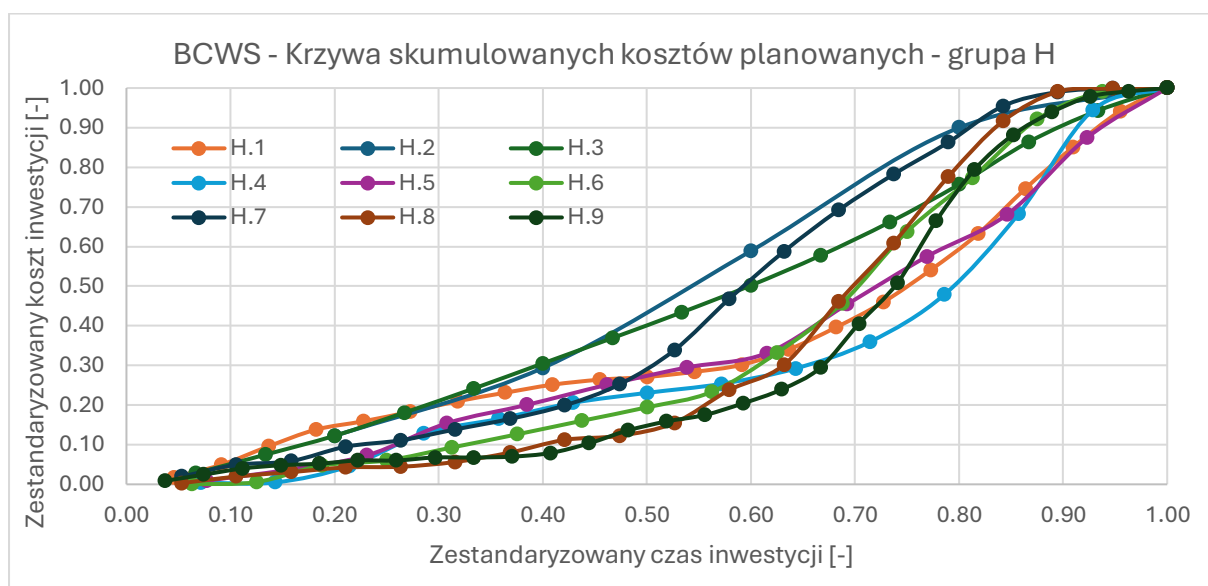
Kolejną grupą przedsięwzięć dla której opracowano wykresy przebiegu są budynki biurowe (O) (rys. 5.2.)



Rysunek 5.2. Przebieg krzywych S dla grupy budynków biurowych (O).

Do około połowy przebiegu wszystkich inwestycji w tej grupie obserwuje się duże skupienie uzyskanych wartości. Jest to wynik prowadzenia w tym okresie robót o podobnym charakterze. Natomiast od około połowy obserwuje się rozproszenie wartości, które maleje wraz z ze zbliżaniem się do planowanego zakończenia robót. Za rozproszenie odpowiada również rodzaj robót (roboty wykończeniowe) wykonywanych w tym przedziale czasu wynikający ze zróżnicowanego stopnia skomplikowania oraz standardu wykonywanych prac.

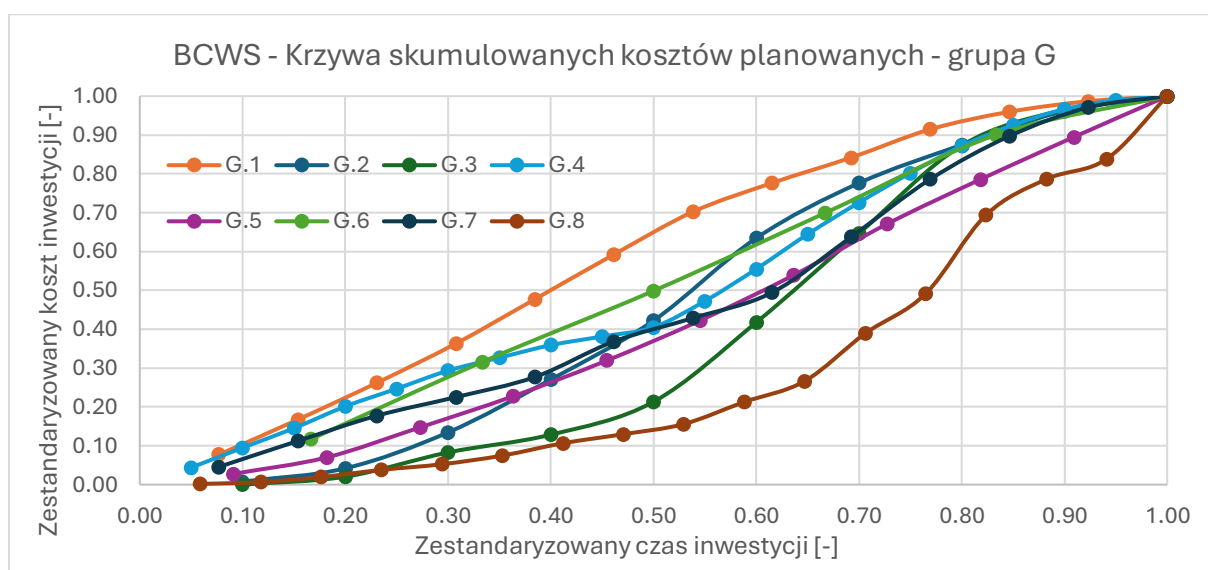
W grupie budynków hotelowych (H) zaobserwowano narastające różnice pomiędzy wartościami w poszczególnych inwestycjach od samego początku do około 2/3 zaawansowania czasu realizacji (rys. 5.3.)



Rysunek 5.3. Przebieg krzywych S dla grupy budynków hotelowych (H).

W ostatnich 30% przebiegu kosztu planowanego wzrasta skupienie wartości BCWS aż do 1. Relatywnie szeroki przedział wartości kosztu przedsięwzięć na poszczególnych etapach realizacji wynika z dużego zróżnicowania pomiędzy poszczególnymi inwestycjami, co skutkuje również odmienną dynamiką ich przebiegu.

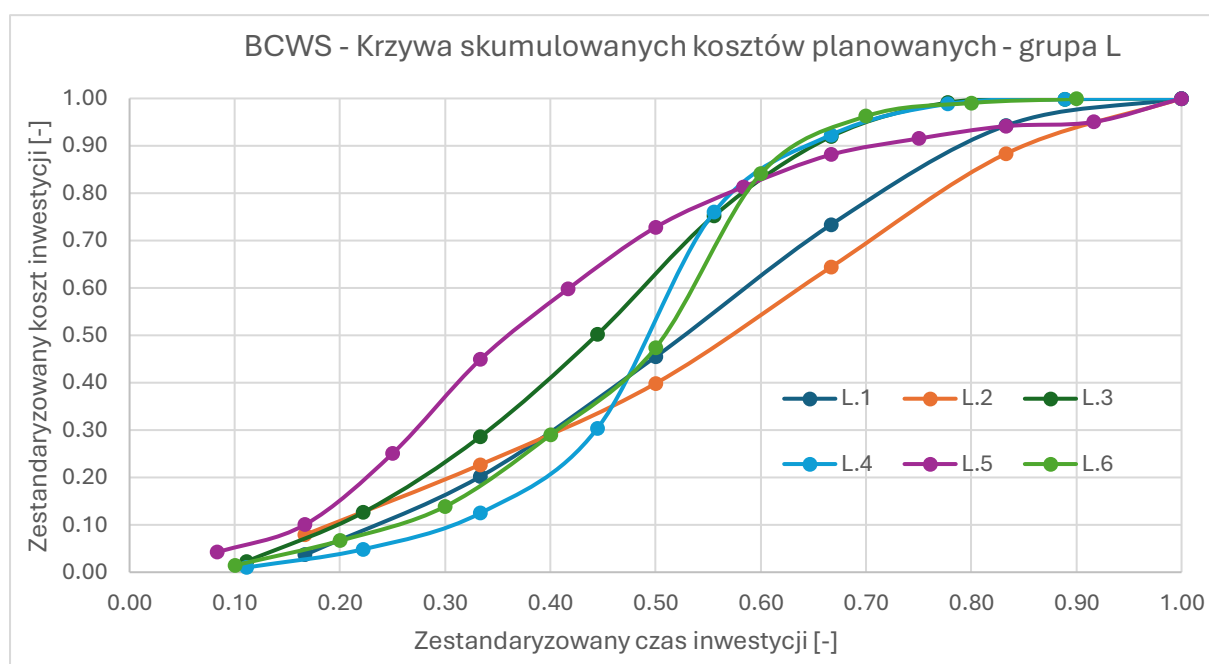
Kolejną analizowaną grupą są centra handlowe (G) (rys. 5.4.).



Rysunek 5.4. Przebieg krzywych S dla grupy centrów handlowych (G).

Przebieg krzywych S dla tej grupy obiektów również wykazuje rozbieżności uzyskanych wartości w poszczególnych przedsięwzięciach, które narastają do około 2/3 zaawansowania robót. Następnie obserwuje się stopniowe zagęszczanie wartości aż do zakończenia przedsięwzięć. Podobnie jak w przypadku budynków hotelowych (H), centra handlowe (G) charakteryzują się dużą różnorodnością zakresu robót, przekładającą się na zróżnicowaną dynamikę przebiegu tych inwestycji.

Ostatnią analizowaną grupą przedsięwzięć budowlanych są centra logistyczne (L). Przebieg skumulowanych kosztów planowanych BCWS przedstawiono na rys 5.5.



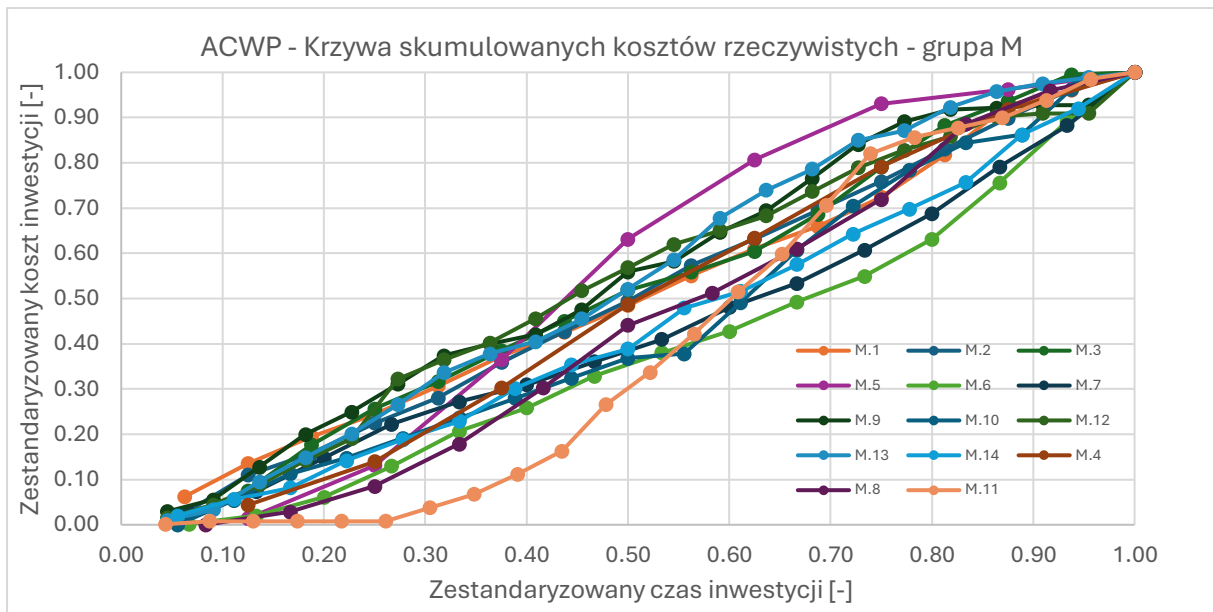
Rysunek 5.5. Przebieg krzywych S dla grupy centrów logistycznych (L).

Charakteryzuje się on dużym zróżnicowaniem wartości w przedziale 0,25 – 0,75 przebiegu inwestycji. W przypadku dwóch inwestycji obserwuje się dynamiczny przyrost w około połowie zaawansowania.

5.2.2. Przebiegi krzywej S skumulowanego kosztu rzeczywistego

Wartości rzeczywiście poniesionego kosztu (ACWP) uzyskano w wyniku obserwacji bieżącego przebiegu inwestycji. Na osi pionowej zaprezentowanych poniżej wykresach przedstawiono relację kosztu rzeczywistego w stosunku do planowanego. Oś pozioma przedstawia pierwotny harmonogram w zestandaryzowanej skali. Dane są przedstawione na wykresie w formie skumulowanej. Sposób prezentacji danych w czytelny sposób pokazuje różnice pomiędzy planowanym a rzeczywistym przebiegiem przedsięwzięć budowlanych próby badawczej.

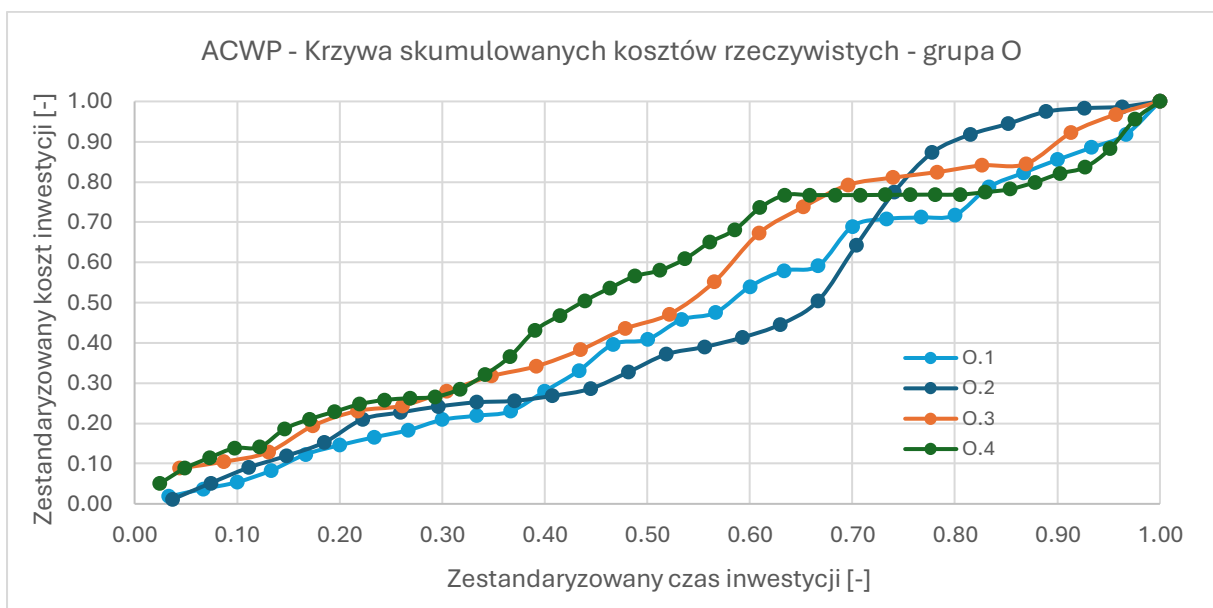
Przebieg wartości kosztu rzeczywistego (ACWP) dla grupy budynków mieszkalnych (M) przedstawiono na rys. 5.6.



Rysunek 5.6. Przebieg kosztu ACWP dla grupy budynków mieszkalnych (M)

Na przedstawionym wykresie obserwuje się zbliżony do liniowego rzeczywisty przebieg większości przedsięwzięć. Po około 70% zaawansowania widoczny jest trend rozpraszania się wartości czasu inwestycji. Obserwuje się również przekroczenie terminu realizacji większości przedsięwzięć. Mniej liczne jest przekroczenie kosztu rzeczywistego.

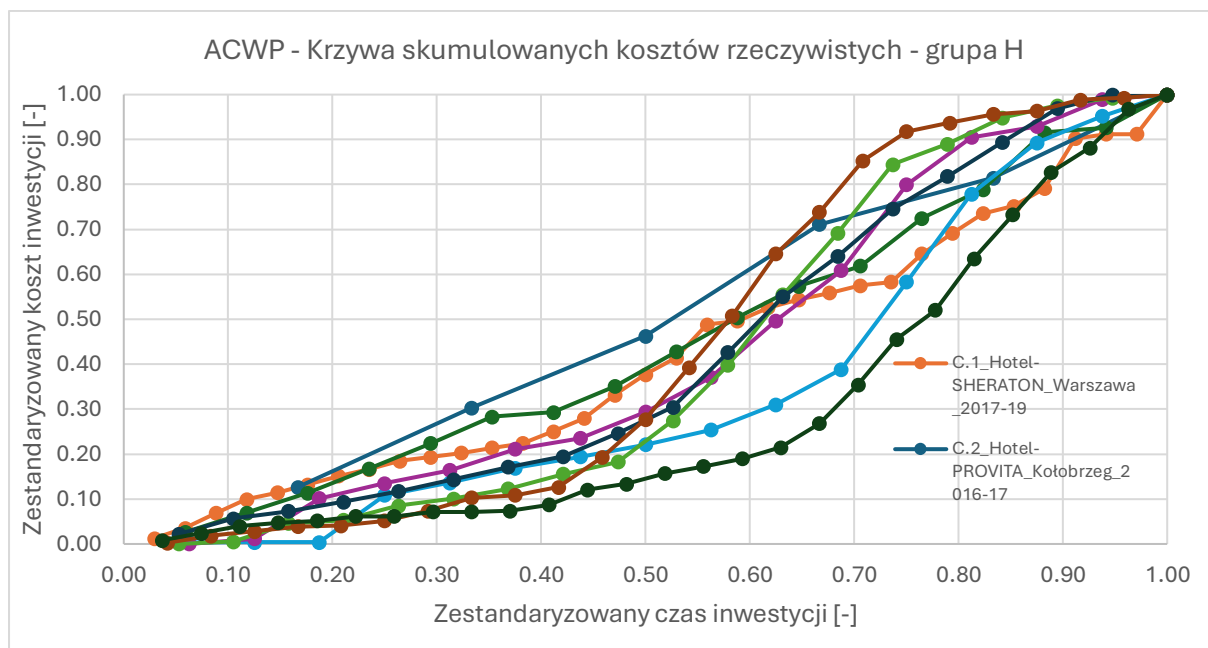
W obszarze budynków biurowych (O), dla których przebieg kosztu rzeczywistego ACWP został przedstawiony na rys. 5.7, obserwuje się liniowy charakter wartości oraz bardzo zbliżoną dynamikę przebiegu do około 50% zaawansowania inwestycji. Relatywnie niewielki kąt nachylenia wykresu w tym przedziale świadczy o niskim poziomie ponoszonych nakładów finansowych. Równoległość wykresów w początkowym przedziale świadczy o zbliżonej strukturze zarządzania przedsięwzięciem oraz podobnym poziomie organizacyjnym budowy. W kolejnych przedziałach czasu szerokość przedziału obserwowanych wartości zwiększa się, a przebieg robót odbywa się z różną intensywnością.



Rysunek 5.7. Przebieg kosztu ACWP dla grupy budynków biurowych (O).

W przypadku każdej inwestycji zaobserwowano przekroczenie terminu realizacji, a w połowie z nich również przekroczenie kosztu.

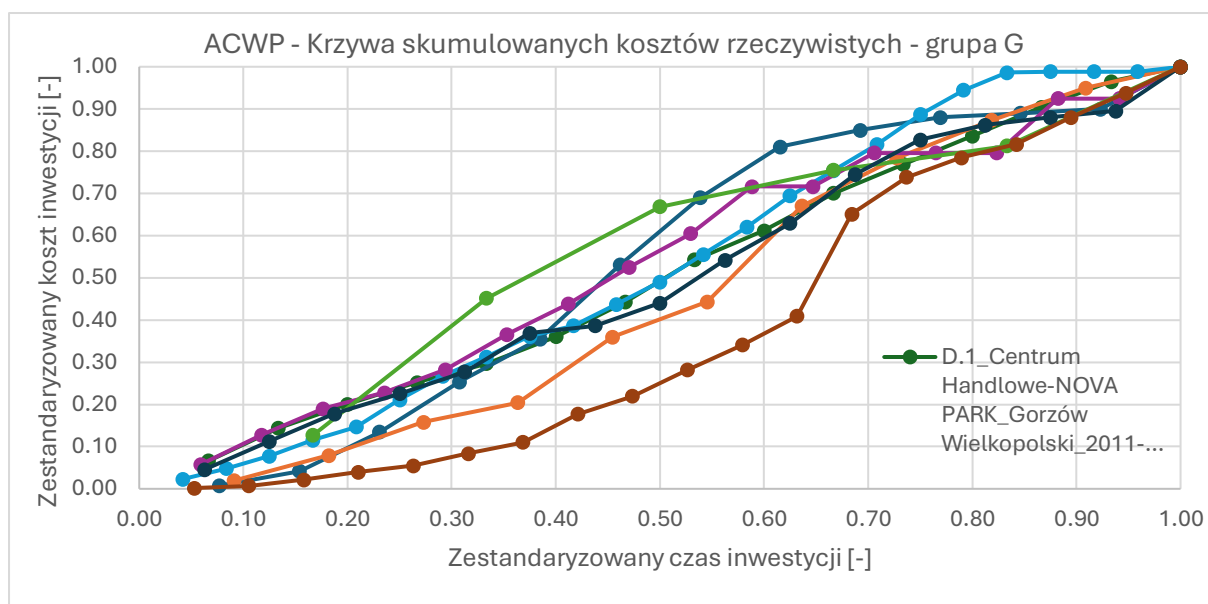
Przebieg rzeczywistego kosztu przedsięwzięć (ACWP) dla grupy budynków hotelowych (H) przedstawiono na rys. 5.8.



Rysunek 5.8. Przebieg kosztu ACWP dla grupy budynków hotelowych (H).

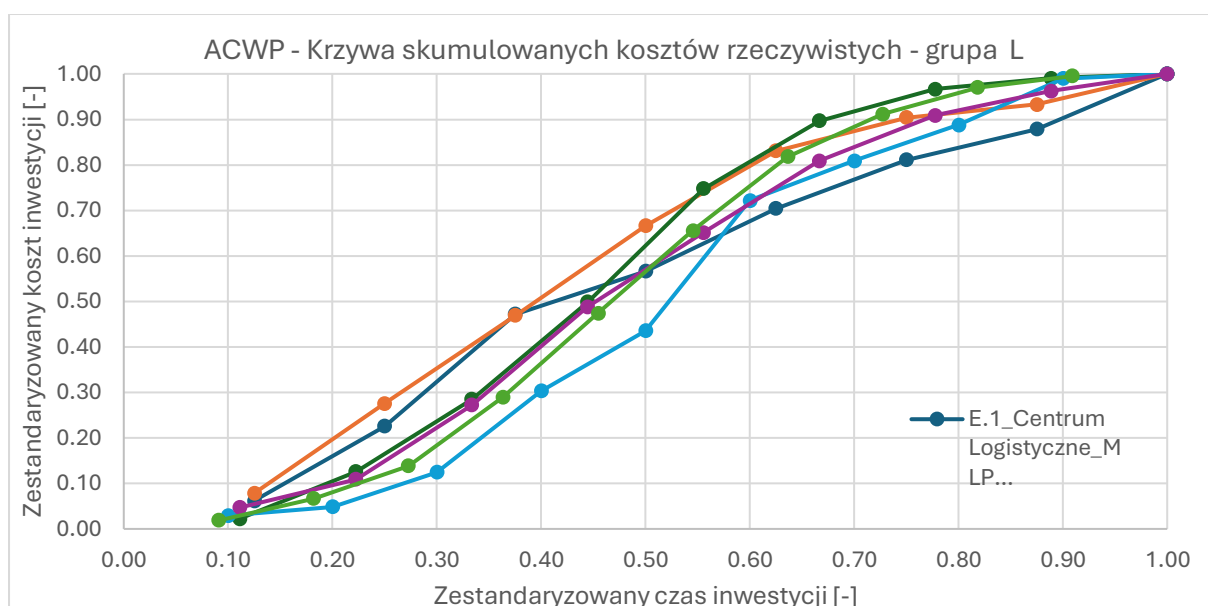
W tej grupie obiektów przebieg przedsięwzięć charakteryzuje się niemal liniowym przyrostem kosztu do około 60% zaawansowania. Niewielkie nachylenie wykresów świadczy o stałym, powolnym postępie robót w tym początkowym przedziale. W pozostałym przedziale czasowym obserwuje się wzrost dynamiki inwestycji przy jednoczesnym zachowaniu obserwowanego wcześniej skupienia wartości świadczącego o podobnym poziomie organizacyjnym i zbliżonej strukturze zarządzania inwestycjami. We wszystkich badanych przedsięwzięciach nastąpiło przekroczenie planowanego terminu zakończenia, a tylko w jednym przypadku utrzymano planowany koszt.

W grupie centrów handlowych (G), dla której przebieg rzeczywistego kosztu inwestycji przedstawiono na rys. 5.9, obserwuje się prawie liniowy charakter zależności kosztowo – czasowej.



Rysunek 5.9. Przebieg kosztu ACWP dla grupy centrów handlowych (G).

Zwiększająca się rozpiętość wartości w poszczególnych przedziałach czasowych świadczy o zróżnicowanym poziomie organizacyjnym wynikającym ze specyfiki każdego przedsięwzięcia. We wszystkich obserwowanych inwestycjach nastąpiło przekroczenie terminu, a jedynie w dwóch przypadkach również przekroczenie kosztu.



Rysunek 5.10. Przebieg kosztu ACWP dla grupy centrów logistycznych (L).

Ostatnia grupa przedsięwzięć dla której przebieg rzeczywistego kosztu został przedstawiony na rys. 5.10, to centra logistyczne (L). We wszystkich przedsięwzięciach niemal od samego początku obserwuje się wysoki przyrost kosztu co świadczy o dużej dynamice tej grupy przedsięwzięć. Narastająca rozbieżność pomiędzy wartościami widoczna od około 20% zaawansowania wskazuje na duże zróżnicowanie pod względem zarządzania i organizacji obserwowanych inwestycji. Również w tej grupie przedsięwzięć zaobserwowano przekroczenie harmonogramu w większości przypadków. Planowany koszt nieznacznie przekroczyła jedynie jedna inwestycja.

5.2.3. Wnioski z obserwacji przebiegu funkcji krzywej S

Na podstawie obserwacji przeprowadzonych w poszczególnych grupach inwestycji sformułowano kilka istotnych spostrzeżeń:

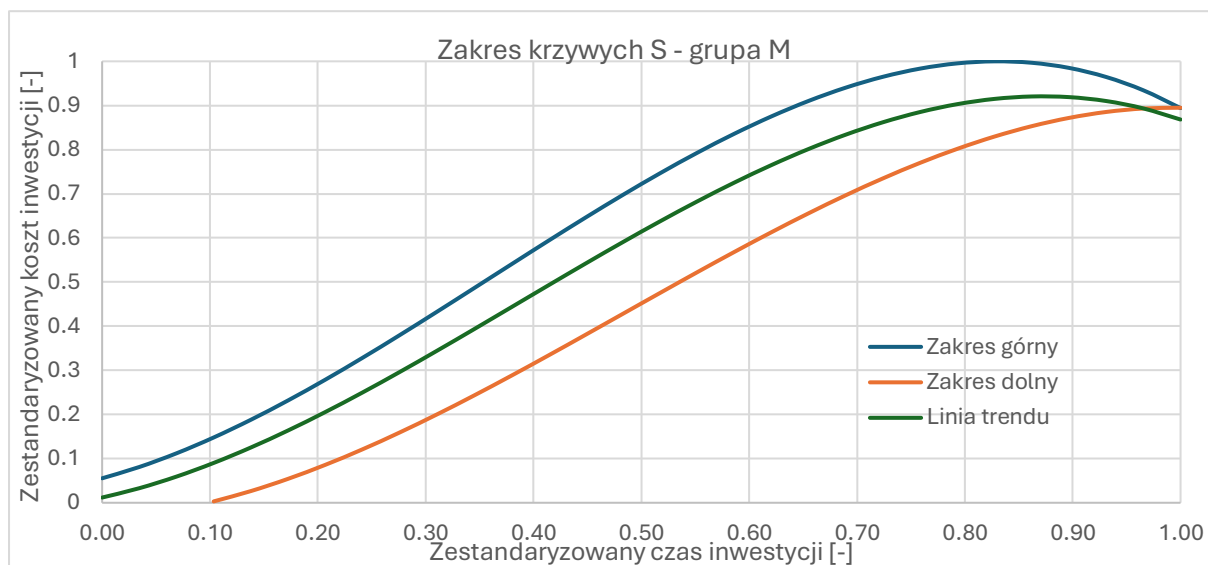
- krzywe wyznaczone dla grupy budynków mieszkalnych (M) cechują się dążeniem do liniowości zarówno w planowanym (wykresy BCWS) jak i rzeczywistym (wykresy ACWP) przebiegu realizacji;
- wielokrotnie załamujące się krzywe na wykresach opracowanych dla budynków biurowych (O) oraz ich niewielkie nachylenie względem czasu wskazuje na niejednostajny postęp prac oraz ich niską dynamikę;
- grupa budynków hotelowych (H) charakteryzuje się dużą nieliniowością przebiegu krzywych, co świadczy o zróżnicowanej dynamice przedsięwzięć w kolejnych przedziałach czasowych;
- krzywe opracowane dla grupy centrów handlowych (G) charakteryzują się dużą różnorodnością widoczną niemal od samego początku. Jest to związane z dużym zróżnicowaniem zarówno pod względem konstrukcyjnym jak i organizacyjnym. Obserwuje się wykresy zarówno o małym początkowym przyroście, jak i nachylone pod większym kątem, co świadczy o zróżnicowanej dynamice przebiegu przedsięwzięć;
- o dużym zróżnicowaniu obiektów z grupy centrów handlowych (G) świadczy również zróżnicowanie przebiegu obserwowanych wartości. Niektóre przedsięwzięcia charakteryzują się przebiegiem zbliżonym do liniowego a przebieg innych jest bardziej złożony;
- zmienny kształt krzywych przebiegu w grupie centrów logistycznych (L) świadczy o dużej dynamice przedsięwzięć. Dość szeroki przedział wartości w poszczególnych przedziałach czasowych może również świadczyć o zróżnicowaniu zarówno technicznym jak i organizacyjnym;
- zaobserwowano dużo większą liczbę przedsięwzięć, w których nastąpiło przekroczenie terminu w odniesieniu do liczby przedsięwzięć, w których nastąpiło przekroczenie planowanego kosztu;

5.3. Pole krzywych S dla zróżnicowanych przedsięwzięć budowlanych

Zaprezentowane w punkcie 5.2. przebiegi krzywych S, opracowane dla próby badawczej pozwoliły na zaobserwowanie określonych trendów w ramach każdej analizowanej grupy przedsięwzięć. Na tej podstawie dla każdej badanej grupy opracowano zakresy pola krzywych S, wyznaczające obszary występowania wartości rzeczywistego kosztu przedsięwzięcia (ACWP). W pierwszej kolejności opracowano linię trendu dla wszystkich wartości występujących w danej grupie, której funkcję opisano wielomianem 3 – go stopnia. Następnie, w oparciu o skrajne punkty (zarówno górne jak i dolne) sporządzono obwiednię zamykającą obszar występowania danych. Dla krzywych tworzących obwiednię wyznaczono kolejne linie trendu opisane za pomocą wielomianów 3 – go stopnia. Obszar zamknięty pomiędzy tymi krzywymi wyznacza przedział wartości tworzących krzywe S w oparciu o wartości kosztu rzeczywistego.

5.3.1. Zakres pola krzywych S w poszczególnych grupach przedsięwzięć budowlanych

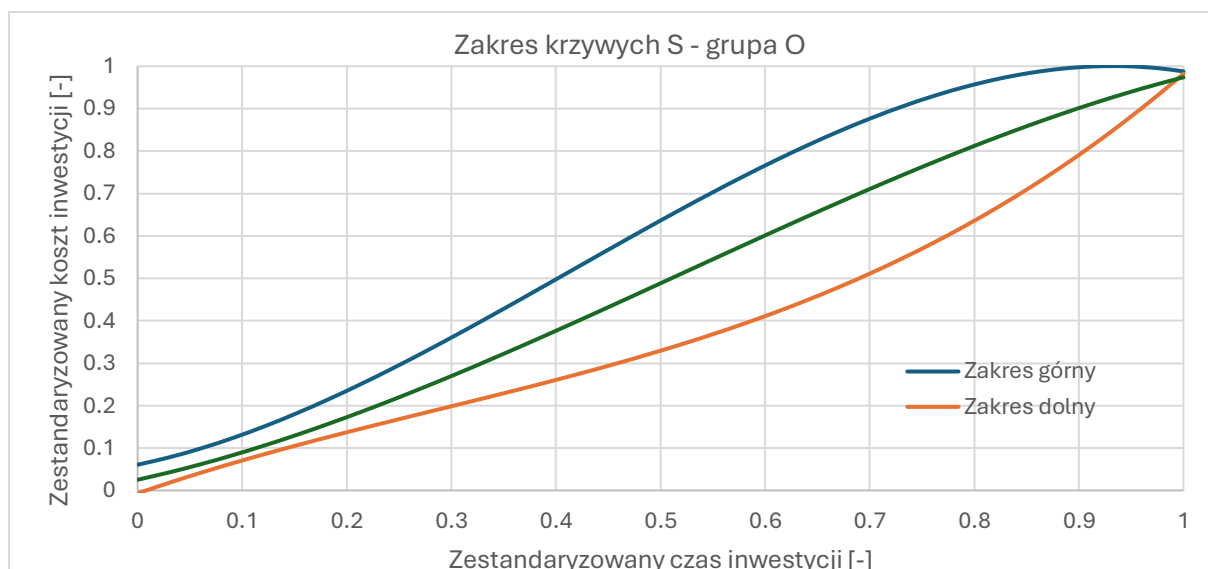
Zakres pola krzywych S opracowanych w oparciu o wartości rzeczywistego kosztu przedsięwzięcia (ACWP) dla grupy budynków mieszkalnych (M) przedstawiono na rys. 5.11.



Rysunek 5.11. Zakres krzywych S dla grupy budynków mieszkalnych (M).

Środkowa krzywa S wskazuje trend przebiegu wartości w tej grupie i pozwala ocenić wielkość ewentualnych odchyłeń w danym okresie czasu. Pole krzywych charakteryzuje się dość dużym kątem nachylenia wskazującym na dużą dynamikę przedsięwzięć przez większą część ich przebiegu, zwalnającą powyżej około 75% zaawansowania robót.

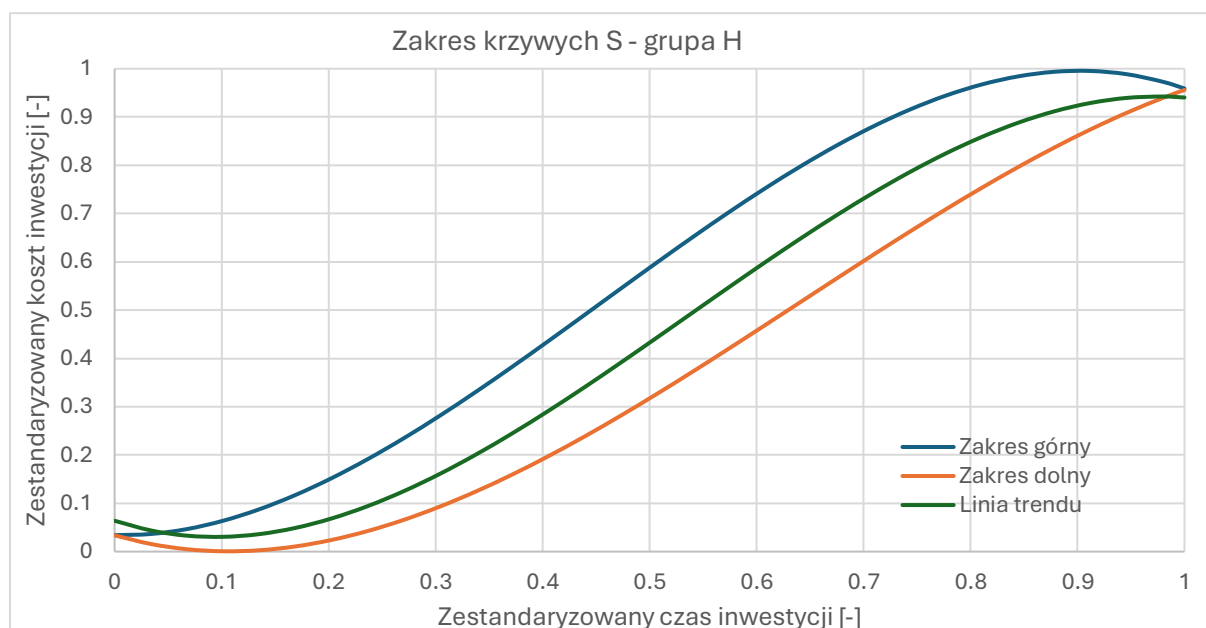
Kolejną przedstawioną na rys. 5.12. grupą krzywych wyznacza obszar pola wartości dla przedsięwzięć z grupy budynków biurowych (O).



Rysunek 5.12. Zakres krzywych S dla grupy budynków biurowych (O).

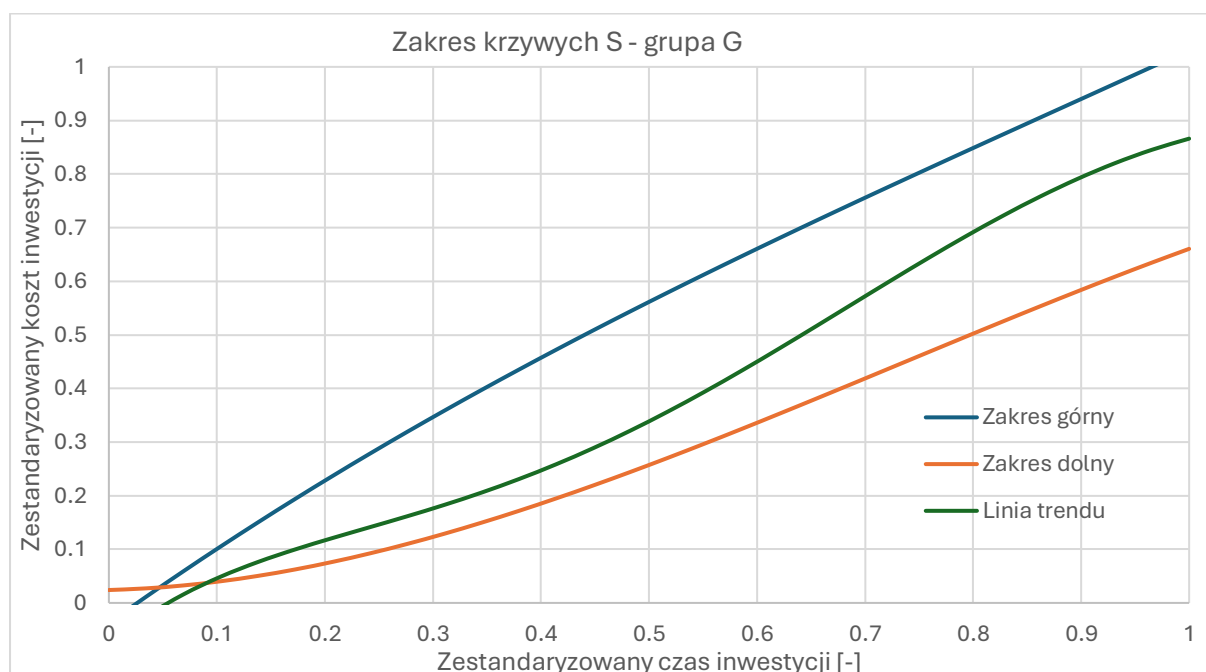
Pole krzywych S dla tej grupy przedsięwzięć charakteryzuje się umiarkowaną dynamiką przebiegu, o czym świadczy łagodniejszy niż w przypadku poprzedniej grupy kąt nachylenia linii trendu.

Opracowany dla budynków hotelowych (H) zakres krzywych S przedstawiony na rys. 5.13. wykazuje zmienną dynamikę przebiegu przy maksymalnej szerokości przedziału wartości wynoszącym około 0,25.



Rysunek 5.13. Zakres krzywych S dla grupy budynków hotelowych (H).

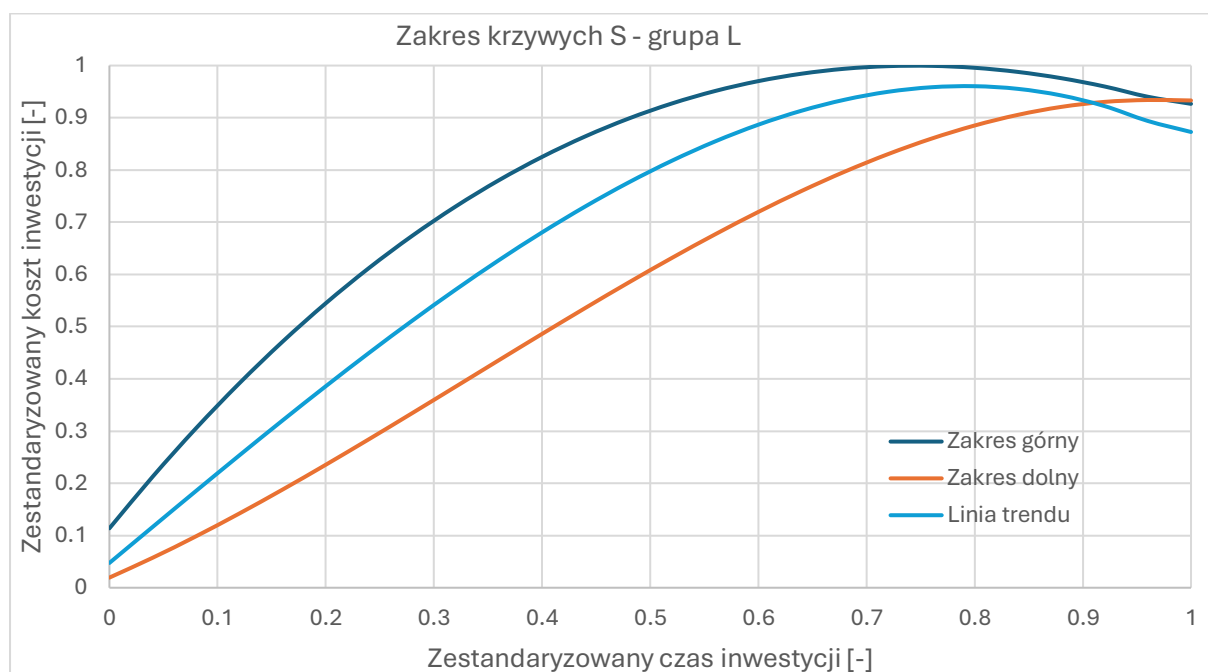
Grupą obiektów wyróżniającą się na tle pozostałych są centra handlowe (G). Obserwując zakresy krzywych S przedstawione na rys. 5.14. należy zauważyć znaczące jego rozszerzenie po przekroczeniu około 1,5 wykonania harmonogramu.



Rysunek 5.14. Zakres krzywych S dla grupy centrów handlowych (G).

Oznacza to, że po znaczącym przekroczeniu terminu planowanego zakończenia przedsięwzięcia przybliżone określenie wartości może być znacząco utrudnione.

W ostatniej analizowanej grupie obiektów – centrach logistycznych (L) – obserwuje się najbardziej dynamiczny przebieg inwestycji (rys. 5.15.).



Rysunek 5.15. Zakres krzywych S dla grupy centrów logistycznych (L).

5.3.2. Wnioski z analizy zakresów pól krzywych S

W wyniku obserwacji zakresu i kształtu obszaru krzywych S przeprowadzonych w poszczególnych grupach obiektów sformułowano następujące spostrzeżenia:

- zróżnicowany kształt zakresów pól krzywych S opracowany dla poszczególnych grup przedsięwzięć wskazuje na zasadność prowadzenia analiz z uwzględnieniem tego podziału;
- szeroki przedział wartości w grupie centrów handlowych (G) wynika z ich dużej różnorodności, zarówno pod względem wielkości, technologii jak i wielofunkcyjności, co ma istotny wpływ na dynamikę tego typu przedsięwzięć;
- grupa budynków biurowych (O), po przekroczeniu około 50% zaawansowania również wyróżnia się zwiększeniem przedziału wartości, co jest wynikiem zróżnicowanego standardu wykończenia i częstego wprowadzania innych dodatkowych funkcji;
- przedstawione na wykresach linie trendu krzywych S mogą wskazywać prawdopodobny przebieg skumulowanego kosztu narastającego, a różnice wynikające z porównania z krzywymi ograniczającymi wyznaczają możliwe odchylenia;
- zestawienie danych uzyskanych w trakcie kontroli przedsięwzięcia budowlanego z odpowiednim zakresem obszaru krzywych S, może być wskazówką do ustalenia prawidłowości jego przebiegu – wartości wykraczające poza wyznaczony zakres pola mogą świadczyć o zbyt dużych odchyleniach i wymagać wprowadzenia działań naprawczych.

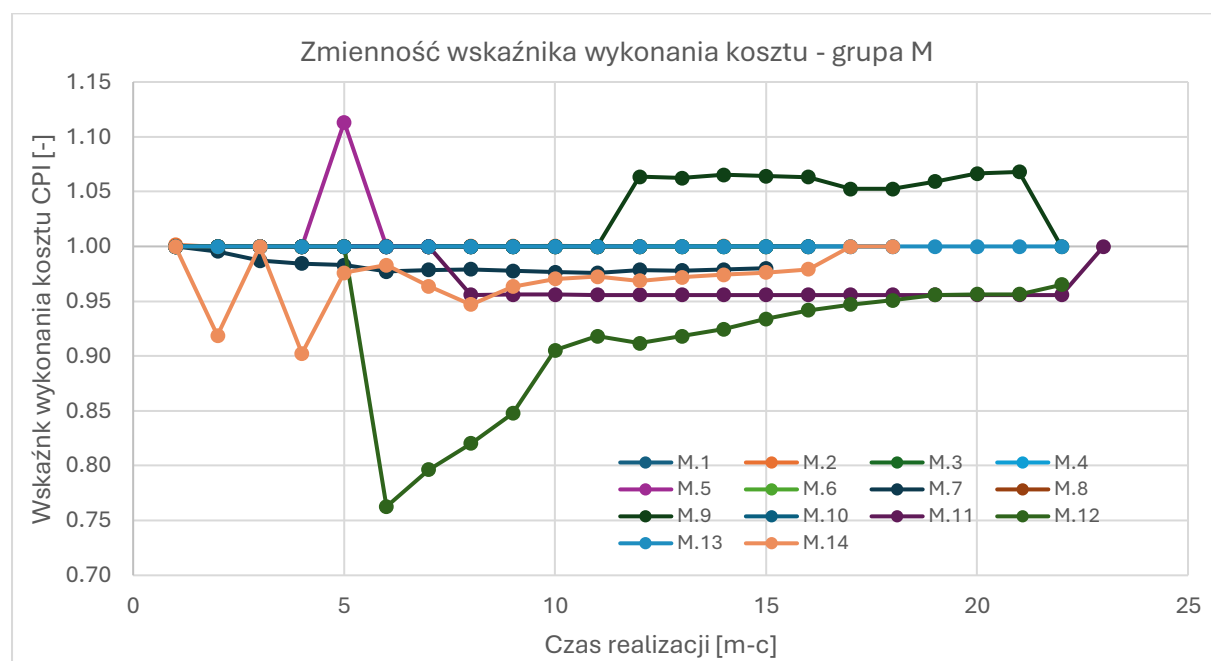
5.4. Wskaźnik wykonania kosztu i terminu w zróżnicowanych przedsięwzięciach budowlanych

Nieuniknionym elementem każdego przedsięwzięcia budowlanego są odchylenia od zaplanowanego kosztu i terminu, będące wynikiem wielu różnych czynników mogących wpływać na przebieg procesu inwestycyjnego. Dysponując dokładnymi danymi pochodzącymi z 41 przedsięwzięć budowlanych opracowano zestawienia ukazujące w czytelny sposób wielkość odchylenia kosztu i terminu od zaplanowanych wartości za pomocą wskaźników wykonania kosztu (CPI) i wykonania terminu (SPI). Przedstawione poniżej wykresy pozwalają na porównanie zestandaryzowanych wartości CPI i SPI pomiędzy przedsięwzięciami ujętymi w danej grupie obiektów.

5.4.1. Obserwacje wskaźnika wykonania kosztu w zróżnicowanych przedsięwzięciach budowlanych

Wskaźnik wykonania kosztu inwestycji CPI został przedstawiony na wykresach w zależności od czasu realizacji inwestycji. Wyniki analiz zaprezentowano z podziałem na grupy przedsięwzięć.

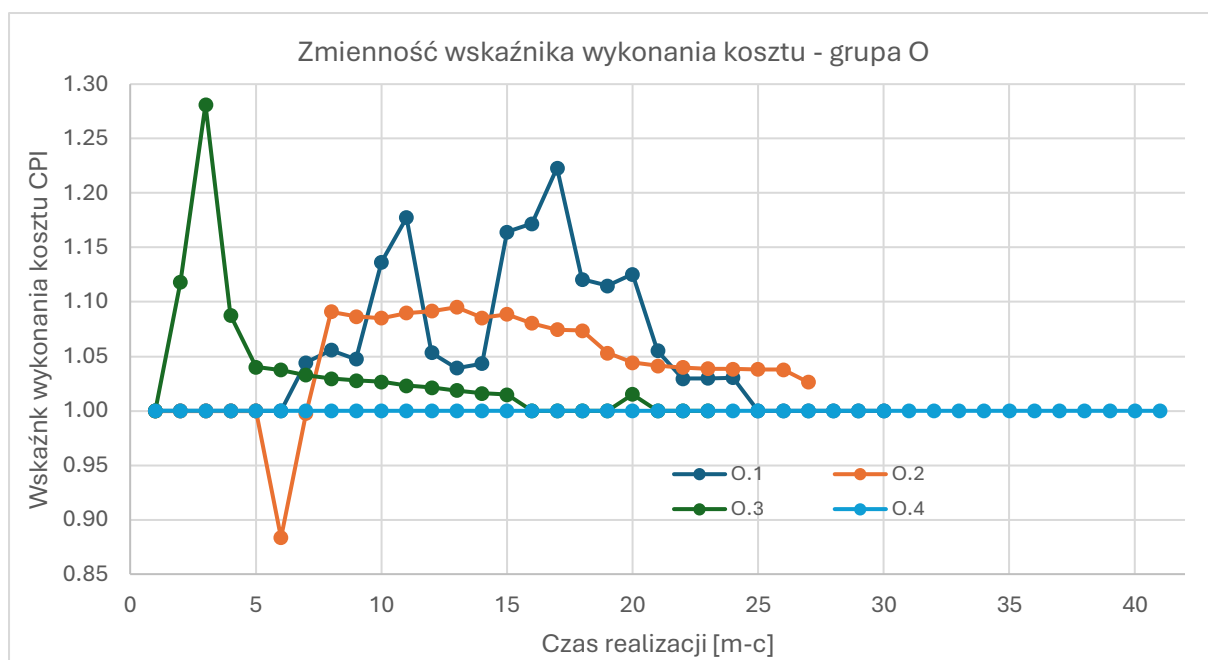
Wykres zmienności wskaźnika wykonania kosztu w grupie budynków mieszkalnych (M) przedstawiono na rys. 5.16.



Rysunek 5.16. Zmienność wskaźnika wykonania kosztu inwestycji w grupie budynków mieszkalnych (M).

W przypadku ośmiu przedsięwzięć nie wystąpiły żadne odchylenia. Wśród pozostałych zaobserwowano występowanie większych wartości odchylenia w początkowym okresie ich przebiegu, które następnie ulegały stopniowej redukcji.

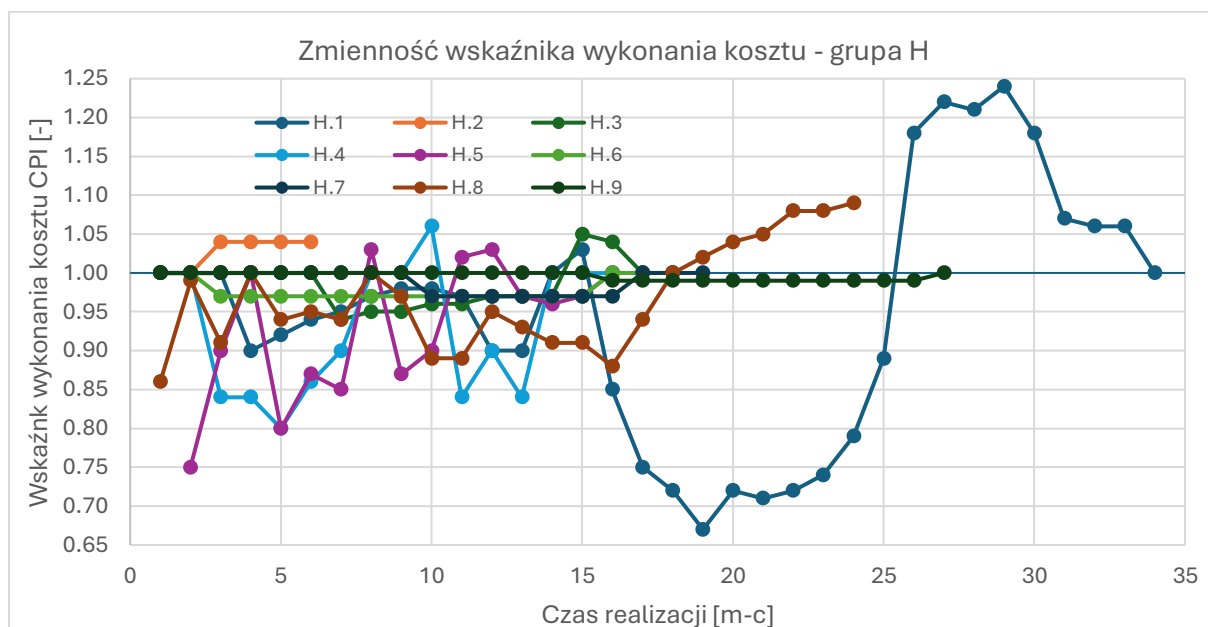
W przypadku grupy budynków biurowych (O) (rys. 5.17.) odchylenia wskaźnika zaobserwowano w 75% przedsięwzięć.



Rysunek 5.17. Zmienność wskaźnika wykonania kosztu inwestycji w grupie budynków biurowych (O).

Zdecydowana większość zaobserwowanych odchyleń charakteryzowała się wartościami CPI większymi od 1.

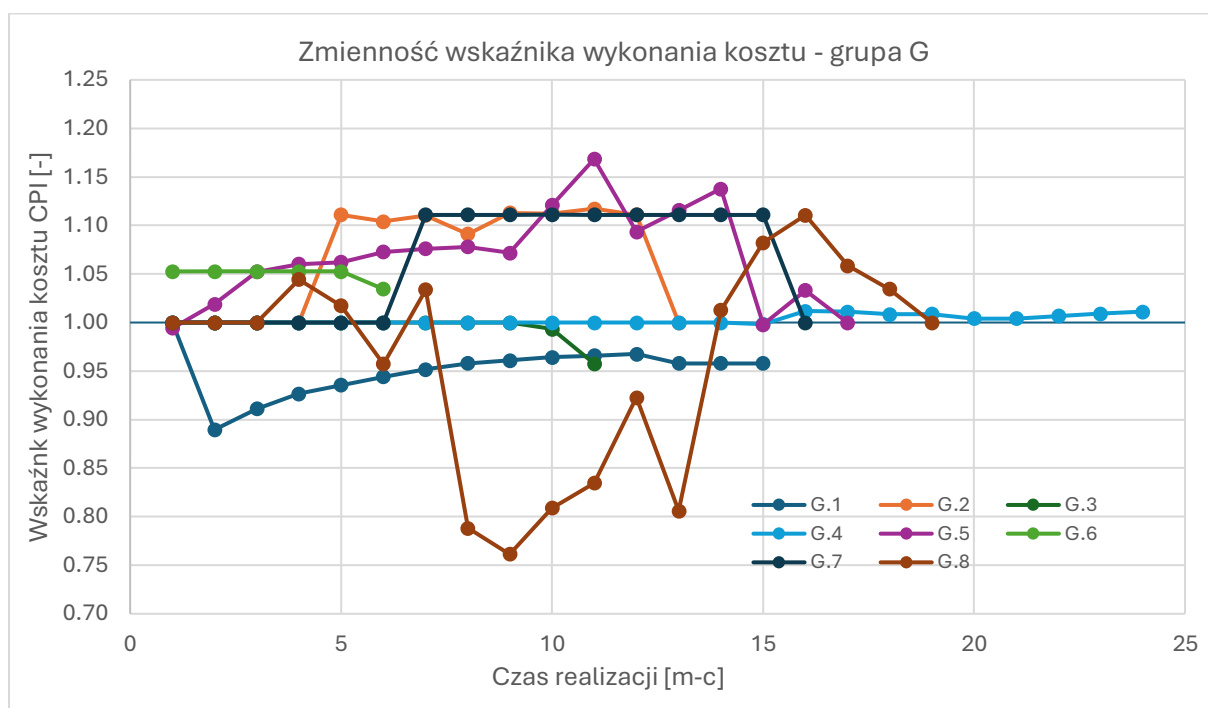
Grupa budynków hotelowych (H) dla której wyniki obserwacji przedstawiono na rys. 5.18. charakteryzowała się występowaniem odchyleń wskaźnika CPI w przypadku każdego przedsięwzięcia.



Rysunek 5.18. Zmienność wskaźnika wykonania kosztu inwestycji w grupie budynków hotelowych (H).

Przeważająca liczba przedsięwzięć wykazywała dużą zmienność wartości wskaźnika w przedziale 0,8 – 1,05. Wartości jednej inwestycji (H1) istotnie odbiegały od pozostałych osiągając wartości z przedziału 0,67 – 1,24.

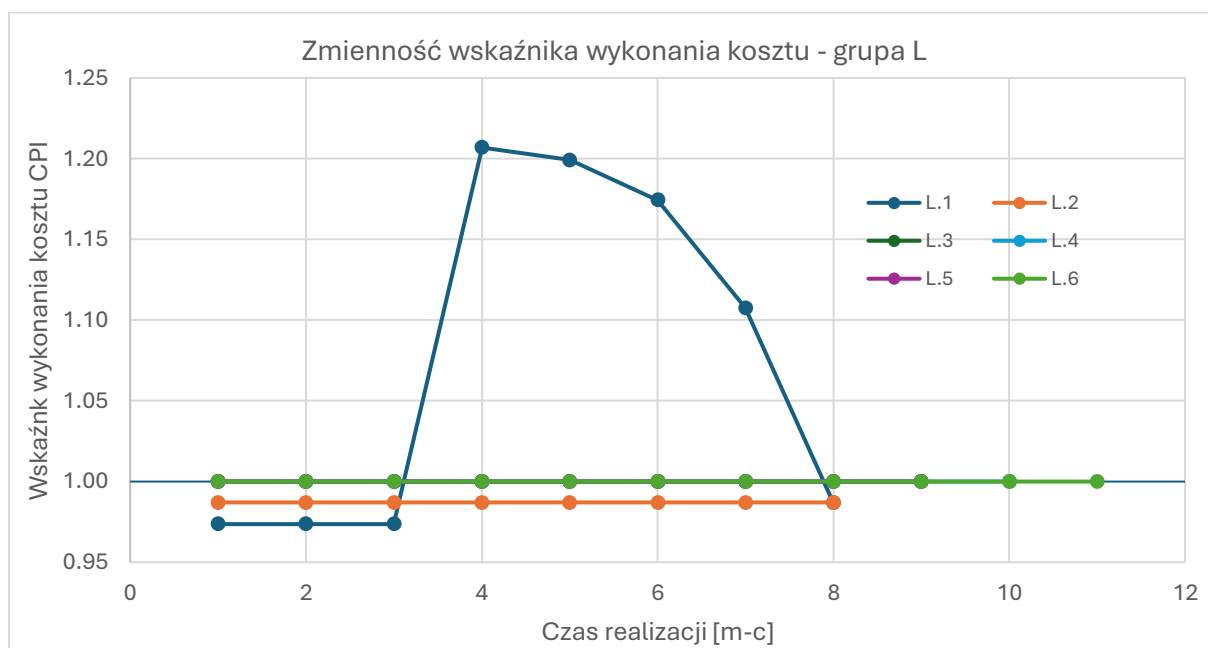
Dużym zróżnicowaniem wskaźnika odchylenia kosztu CPI charakteryzuje się grupa centrów handlowych, dla której wyniki zaprezentowano na rys. 5.19.



Rysunek 5.19. Zmienność wskaźnika wykonania kosztu inwestycji w grupie centrów handlowych (G).

Wszystkie przedsięwzięcia wykazały odchylenia wskaźnika CPI którego przebieg był mocno zróżnicowany pod względem wartości.

Ostatnia wydzielona grupa przedsięwzięć, centra logistyczne (L), charakteryzuje się najbardziej stabilnym przebiegiem wartości wskaźnika CPI (rys. 5.20.).



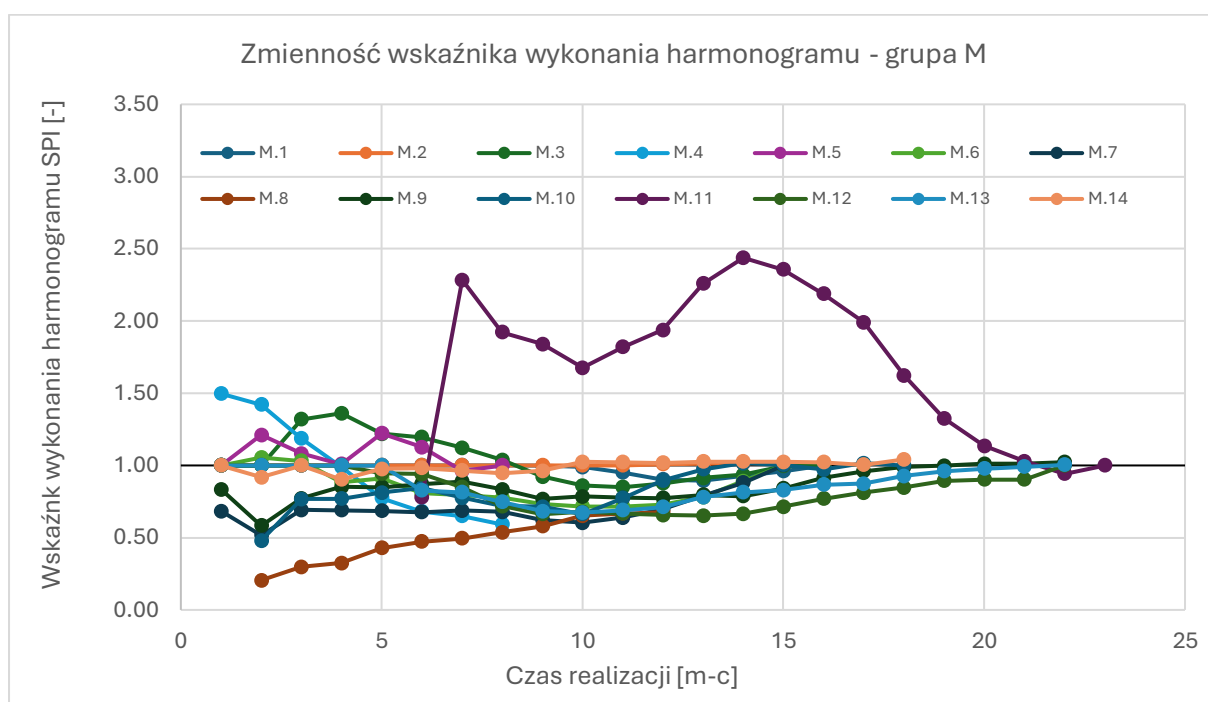
Rysunek 5.20. Zmienność wskaźnika wykonania kosztu inwestycji w grupie centrów logistycznych (L).

Ponad połowa analizowanych przedsięwzięć nie wykazała żadnych odchylen wskaźnika CPI w trakcie całej realizacji. Jedna inwestycja wykazała zmienny przebieg wartości CPI.

5.4.2. Obserwacje wskaźnika wykonania harmonogramu w zróżnicowanych przedsięwzięciach budowlanych

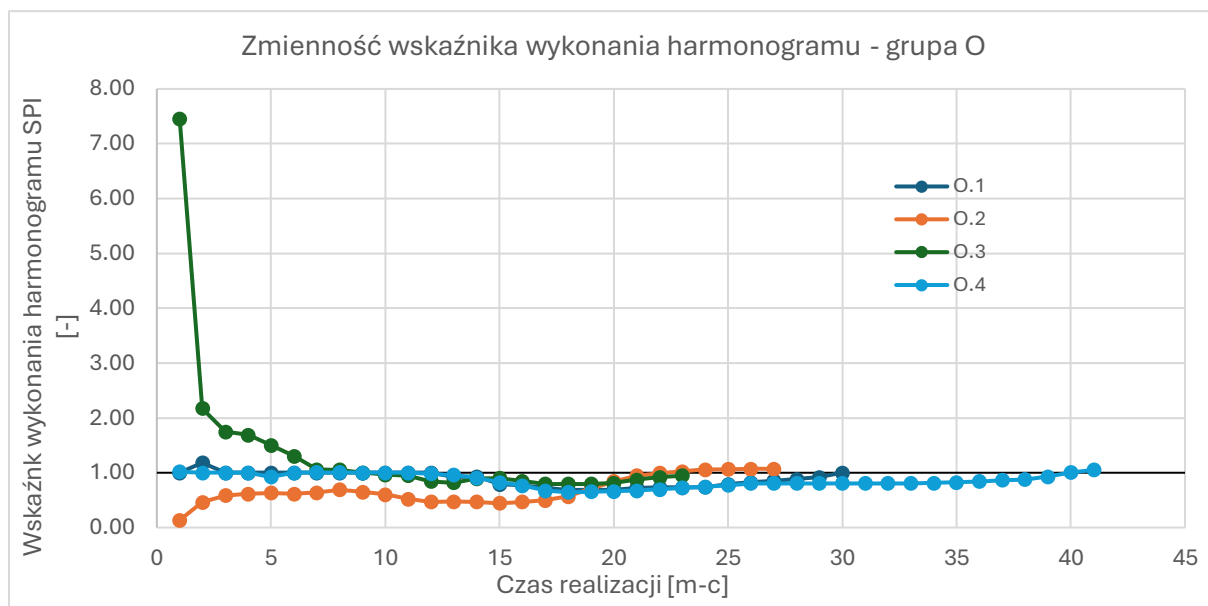
Zmienność wskaźnika wykonania harmonogramu SPI, analogicznie jak w przypadku wskaźnika wykonania kosztu, została przedstawiona na wykresach w zależności od czasu realizacji inwestycji. Wyniki również zostały przedstawione indywidualnie dla każdej grupy inwestycji zawartej w próbie badawczej.

Przebieg wskaźnika wykonania harmonogramu dla grupy budynków mieszkalnych (M) przedstawiono na rys. 5.21. Poza jedną inwestycją wyraźnie odstającą swoim przebiegiem od pozostałych z tej grupy, w początkowej fazie inwestycji obserwuje się zmienność wartości SPI w przedziale od 0,21 do 1,5. Wraz z postępem prac wartości wskaźnika sukcesywnie zdążają do 1. W około 30% przypadków odchylenia wartości wskaźnika przyjmują wartości mniejsze niż 1.



Rysunek 5.21. Zmienność wskaźnika wykonania harmonogramu inwestycji w grupie budynków mieszkalnych (M).

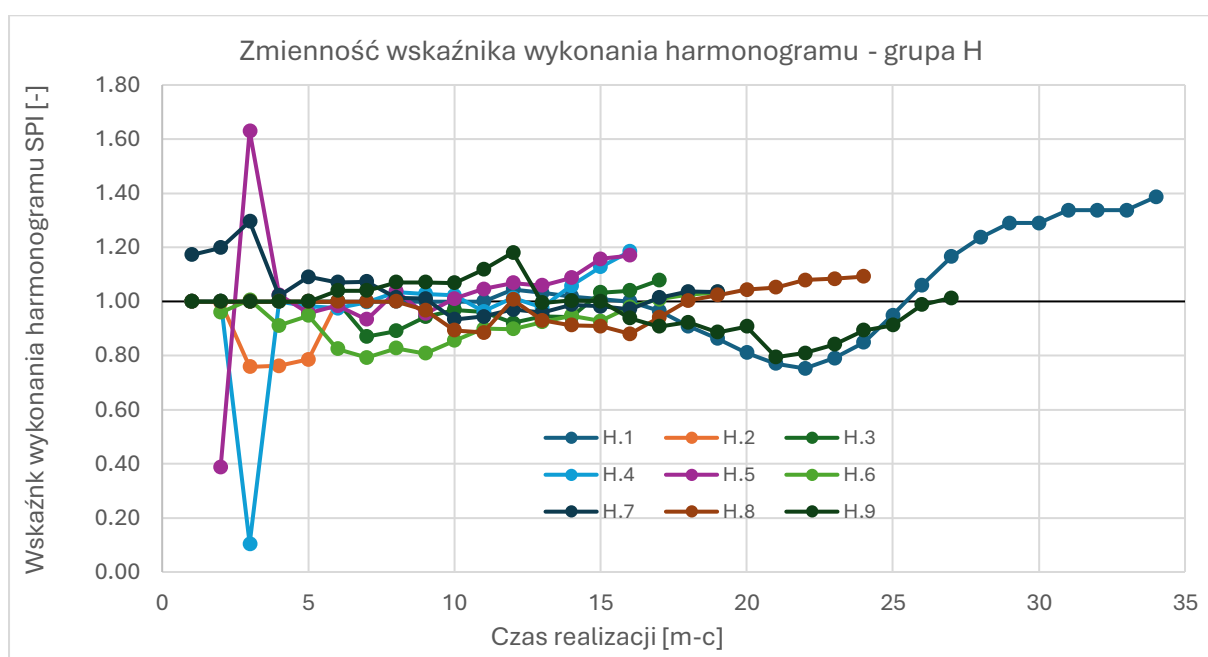
W grupie budynków biurowych, dla których wyniki obserwacji zmienności SPI zaprezentowano na rys. 5.22, również zaobserwowano zwiększone odchylenia w początkowym okresie inwestycji.



Rysunek 5.22. Zmienność wskaźnika wykonania harmonogramu inwestycji w grupie budynków biurowych (O).

Obserwacje dalszego przebiegu inwestycji i zmienności SPI wykazują ich stopniową zbieżność do wartości 1. Około 80% wszystkich wartości wskaźnika SPI wykazuje wartości mniejsze od 1.

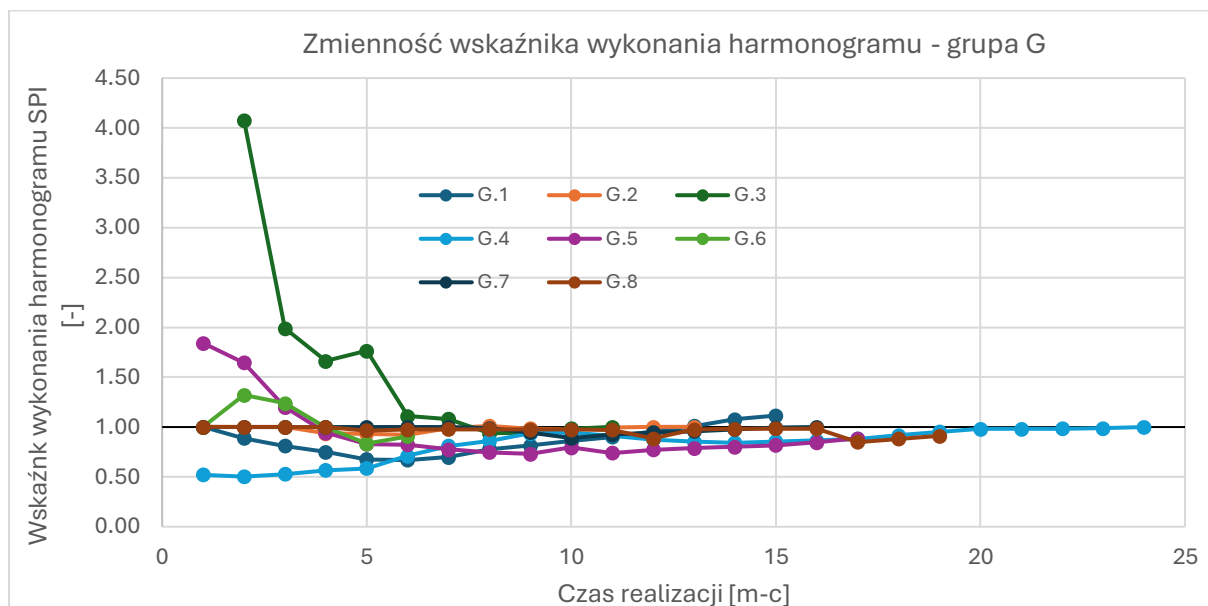
Grupa budynków hotelowych (H) charakteryzuje się największą zmiennością wskaźnika wykonania harmonogramu. Zaprezentowane na rys. 5.23. przebiegi zmienności SPI dla poszczególnych inwestycji wskazują na ich szeroki przedział wartości w początkowym okresie w zakresie od 0,1 do nawet 1,63.



Rysunek 5.23. Zmienność wskaźnika wykonania harmonogramu inwestycji w grupie budynków hotelowych (grupa H).

Po około 5 miesiącach szerokość przedziału stabilizuje się w zakresie pomiędzy 0,8 i 1,2. Widoczne są istotne różnice pomiędzy przebiegami wartości wskaźnika pomiędzy poszczególnymi inwestycjami.

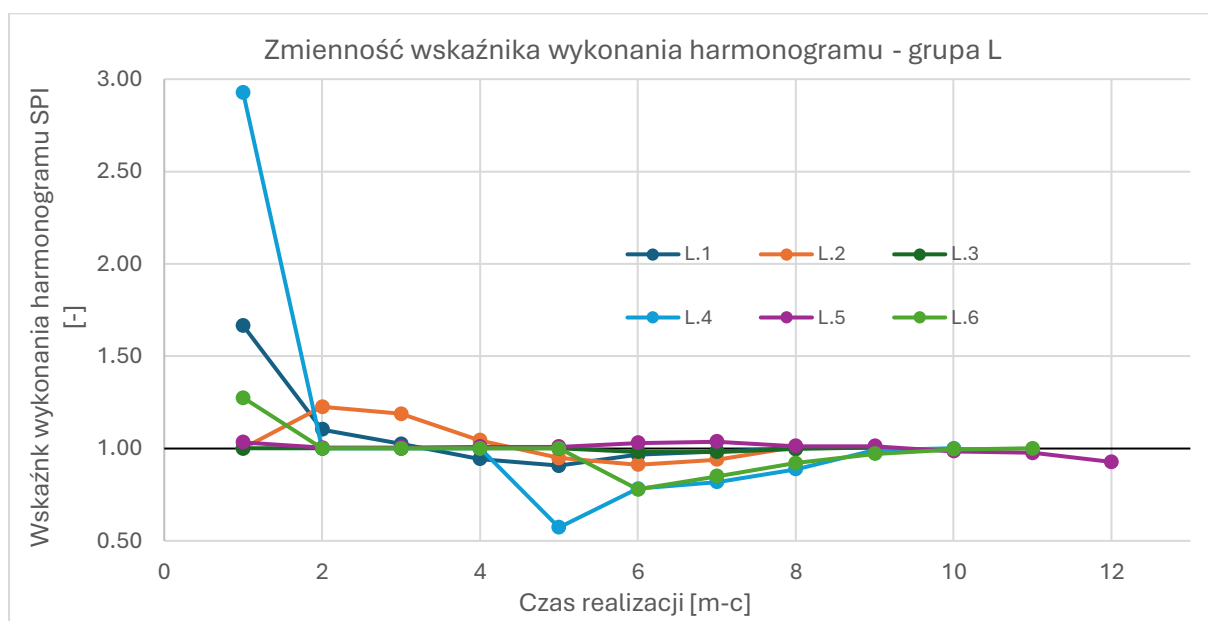
Centra handlowe (G) zebrane w kolejnej grupie będącej elementem próby badawczej charakteryzują się dużymi wartościami wskaźnika SPI w pierwszych pięciu miesiącach przebiegu inwestycji (rys. 5.24.)



Rysunek 5.24. Zmienność wskaźnika wykonania harmonogramu inwestycji w grupie centrów handlowych (G).

W pozostałym okresie wartości wskaźnika stabilizują się w okolicy wartości 1. Ich przebieg można uznać za jednostajny.

Ostatnią analizowaną grupą przedsięwzięć są centra logistyczne (L). Zakres zmienności wskaźnika SPI wraz z jego przebiegiem w czasie realizacji zostały przedstawione na rys. 5.25.



Rysunek 5.25. Zmienność wskaźnika wykonania harmonogramu inwestycji w grupie centrów logistycznych (L).

Początkowy okres trwania inwestycji wskazuje na występowanie istotnych odchyłeń wartości SPI, które w krótkim czasie stabilizują się osiągając przedział wartości od około 0,7 do 1,2. Pojedyncze odbiegające wartości wskaźnika w późniejszych miesiącach nie zaburzają widocznego trendu zbieżności do wartości 1.

5.4.3. Wnioski obserwacji zmienności wskaźników wykonania kosztu i terminu

Na podstawie obserwacji przebiegu zmienności wskaźników CPI i SPI w zróżnicowanych przedsięwzięciach budowlanych sformułowano następujące wnioski i spostrzeżenia:

- wskaźniki wykonania kosztu w poszczególnych grupach obiektów wykazują duże zróżnicowanie zarówno pod względem uzyskanych wartości jak i obserwowanego przebiegu;
- wartości wskaźnika wykonania kosztu charakteryzują się większą i bardziej chaotyczną dynamiką zmienności niż odpowiadające im wartości wskaźnika wykonania harmonogramu. Świadczy to o braku bezpośredniej zależności pomiędzy przekroczeniem kosztu i przekroczeniem terminu;
- przebieg wartości poszczególnych wskaźników przedstawiony na wykresach wskazuje wartości CPI lub SPI w danym, ściśle określonym momencie trwania inwestycji i nie świadczy bezpośrednio o ostatecznych przekroczeniach kosztu i terminu inwestycji;
- pomimo różnic w wartościach wskaźnika SPI obserwowanych w poszczególnych grupach zaobserwowano wyraźny trend w ich przebiegu wskazujący na spadek jego wartości wraz z postępowaniem robót.

5.5. Podsumowanie analiz przebiegu zmienności kosztu i terminu w zróżnicowanych przedsięwzięciach budowlanych

Kluczowym celem prowadzonych w niniejszym rozdziale obserwacji i analiz jest określenie relacji oraz przebiegu dwóch najważniejszych parametrów procesu inwestycyjnego jakimi są koszt i czas. Do tego celu wykorzystano w pierwszej kolejności metodę wyznaczania krzywych S. Choć jest prosta i oparta jedynie na harmonogramie rzeczowo – finansowym, przez co nie zawsze dokładna, w bardzo przystępny i czytelny sposób może zaprezentować przebieg wartości kosztowych i czasowych przedsięwzięć już zrealizowanych.

Na podstawie obserwacji przebiegu krzywych S potwierdzono słuszność podziału próby badawczej na grupy obiektów o różnych funkcjach. Zaobserwowano wyraźne różnice w obserwowanych wartościach i zróżnicowane trendy ich przebiegu.

Na uwagę zasługuje również fakt, że w każdej grupie występują przedsięwzięcia, w których w trakcie realizacji nastąpiło przekroczenie rzeczywistego kosztu lub terminu wykonania względem wartości planowanych.

Przedstawione na wykresach obwiednie krzywych S pozwoliły w kolejnym etapie określić pola wartości analizowanych parametrów. Przy założeniu, że bieżące wartości kosztu w danym terminie mieszczą się w polu krzywych można wnioskować, iż dalsze wartości również w tym obszarze zostaną utrzymane. Uzyskanie wartości wykraczających poza pole krzywych powinno być sygnałem o pojawiających się nieprawidłowościach w przebiegu

przedsięwzięcia oraz impulsem do wprowadzenia środków zaradczych mających na celu przywrócenie racjonalnego przebiegu realizacji prac.

Ostatnia grupa analiz przedstawionych w niniejszym rozdziale miała na celu przedstawienie przebiegu zmienności wskaźnika wykonania kosztu (CPI) i wykonania harmonogramu (SPI) na różnych etapach realizacji przedsięwzięć zawartych w próbie badawczej. Stwierdzono, że przebieg zmienności CPI miał złożony charakter i wykazywał duże zróżnicowanie nawet wewnątrz grup obiektów. Nie pozwala to na wyznaczenie jakiegokolwiek trendu. W przypadku wskaźnika SPI zaobserwowano wyraźny trend w którym duże wahania występujące w początkowej fazie realizacji ulegały stopniowemu zmniejszeniu wraz z postępem inwestycji.

Wnioski i spostrzeżenia uzyskane w toku przeprowadzonych analiz wskazują, że współzależność pomiędzy przekroczeniem kosztu i przekroczeniem terminu jest wątpliwa. W celu szerszego badania związku pomiędzy obydwoma cechami w czterech kolejnych rozdziałach rozprawy zostały przeprowadzone dalsze dogłębne badania, mające na celu ustalić charakter tej współzależności. W rozdziale VI przeprowadzono badania korelacji przekroczenia kosztu z przekroczeniem terminu w zróżnicowanych przedsięwzięciach budowlanych. rozdział VII zawiera badanie prawdopodobieństw warunkowych obu tych cech. Kolejne badania, związane z szacowaniem całkowitego kosztu i ostatecznego terminu zakończenia przedsięwzięcia, zostały zaprezentowane w rozdziale VIII. Odchylenia kosztu rzeczywistego od kosztu planowanego zbadano i opisano w rozdziale IX.

ROZDZIAŁ VI

Korelacje przekroczenia kosztu i terminu

6.1. Wstęp do badania współzależności pomiędzy przekroczeniem kosztu i przekroczeniem terminu w przedsięwzięciach budowlanych

Istnieje wiele metod, zarówno statystycznych jak i empirycznych, pozwalających na określenie współzależności lub wpływu zachowania określonych zjawisk na inne, z którymi mogą być potencjalnie powiązane. W zależności od charakteru powiązań łączących te zjawiska można wyróżnić trzy rodzaje relacji.

Pierwszym są zależności funkcyjne, w których jednej z badanych wartości przyporządkowana jest ściśle określona druga wartość. Można je opisać za pomocą prostych lub złożonych funkcji będących dokładnym odwzorowaniem tych zależności.

Drugim typem związków są związki stochastyczne, przypisujące jednej zmiennej rozkład drugiej zmiennej. Jedną z tych zmiennych określa się jako niezależną lub objaśnianą a drugą zmienną jako zależną lub objaśniającą. W uproszczeniu można stwierdzić, że o zależności stochastycznej można mówić w sytuacji gdy wartość zmiennej niezależnej determinuje prawdopodobieństwo zajścia zmiennej zależnej.

Trzecim rodzajem zależności są związki korelacyjne (korelacje), określane również mianem statystycznych. Wyróżniają się tym, że dla przyjętej wartości pierwszej cechy (zmiennej niezależnej) przyjmują przeciętną wartość drugiej cechy (zmiennej zależnej). Niektóre metody badania korelacji umożliwiają nie tylko wykazanie istnienia współzależności pomiędzy cechami, ale również określenie jej siły.

Badania prowadzone w niniejszej dysertacji opierają się na analizie zmiennych które są pochodnymi czasu i kosztu, a dokładniej są ich przekroczeniami. Należy je traktować jako cechy, ponieważ są to empiryczne, mierzalne właściwości w zgromadzonym pakiecie danych. Dla każdego ustalonego przedziału czasowego można określić wartości przekroczeń obu cech. Obserwacje i analizy przeprowadzone na materiale badawczym omówionym w rozdziale V wskazują, że dla wartości jednej cechy mogą być przyporządkowane różne wartości drugiej cechy, co skłania do przeprowadzenia dalszych badań w kierunku wykazania związków korelacyjnych pomiędzy przekroczeniem kosztu a przekroczeniem terminu.

Badanie korelacji zachodzących pomiędzy przekroczeniem kosztu a przekroczeniem terminu ma na celu wykazanie słuszności stwierdzenia zawartego w tezie nr 1 niniejszej dysertacji:

Przekroczenie kosztu i przekroczenie terminu realizacji przedsięwzięć budowlanych nie są cechami wzajemnie skorelowanymi.

Do przeprowadzenia analiz wykorzystane zostały trzy różne metody, które pozwoliły na szersze zbadanie korelacji. W pierwszej kolejności zastosowano metodę graficzną, która pozwoliła na wstępną ocenę współzależności. Następnie do badań wykorzystano korelację Pearsona, która pozwoliła na zbadanie występowania współzależności metodą analityczną. Ostatnim z wykorzystanych narzędzi była korelacja Spearmana, która również umożliwiła analizę powiązania przekroczenia kosztu z przekroczeniem terminu w sposób analityczny. Wyniki przeprowadzonych badań przedstawiono w dalszej części pracy.

6.2. Przegląd literatury dotyczący współzależności pomiędzy dwiema zmiennymi

Badania korelacji są powszechnie stosowane w analizach dotyczących zarządzania przedsięwzięciami budowlanymi w celu identyfikacji związków między różnymi czynnikami a wskaźnikami wydajności projektu. Ponadto przyczyniają się do analizy danych dotyczących zarządzania budową, zapewniając wgląd w relacje między różnymi zmiennymi. W badaniu dotyczącym wpływu zarządzania zasobami ludzkimi na organizacje budowlane, korelacja Pearsona została wykorzystana do analizy danych zebranych z badania ilościowego, ujawniając wpływ różnych czynników na zarządzanie i wyniki organizacyjne (Ngwenya i in., 2019). W innym badaniu korelacje Pearsona i Spearmana zostały wykorzystane do zidentyfikowania czynników przedprojektowych wpływających na wydajność projektów budowlanych, dostarczając cennych informacji dla zespołów zarządzających w celu oceny i usprawnienia procesu przedkonstrukcyjnego a tym samym zwiększenia wskaźników powodzenia projektu (Naji i in., 2021).

Jednym z ograniczeń testów korelacji w badaniach nad zarządzaniem przedsięwzięciami budowlanymi jest możliwość wystąpienia fałszywych korelacji. Jest to związane z tendencyjnością danych ankietowych powszechnie wykorzystywanych w metodach kontroli i zarządzania w analizie empirycznej. Około 90% artykułów wykorzystujących dane ankietowe w analizie empirycznej było prawdopodobnie dotkniętych tą wadą, co podkreśla potrzebę skutecznej kontroli proceduralnej i statystycznej w celu złagodzenia jej negatywnego wpływu (Zhang i in., 2022). Ponadto wykorzystanie analizy korelacji w roszczeniach budowlanych może spotkać się z krytyką ze względu na powiedzenie, że „korelacja nie jest związkiem przyczynowym”. Ustalenie związku przyczynowego przy pomocy badania korelacji w roszczeniach budowlanych może być subtelne i nieuchwytnie. Obecnie nie opracowano prawidłowo zdefiniowanej formuły udowadniania związku przyczynowego zatwierdzonej przez sądy lub komisje odwoławcze (Zhao, 2023). Współczynnik korelacji, powszechnie stosowany w analizach projektów budowlanych, nie jest w stanie rozróżnić różnych typów relacji między zmiennymi (Kanehira i in., 2021). Wpływ czynników związanych z projektem i organizacją na wyniki przedsięwzięcia różni się w zależności od grupy typologicznej i jego wielkości, co wskazuje na potrzebę elastycznego podejścia do analizy korelacji (Sekar i in., 2018).

Wyłaniający się trend w metodach testowania korelacji w badaniach nad zarządzaniem budową obejmuje wykorzystanie wielokrotnych testów bazowych jako obiecującej i realnej techniki eksperymentalnej do wyciągania ważnych wniosków przyczynowych i analizowania zmian, szczególnie gdy prawdziwe eksperymenty są niepraktyczne lub nieetyczne ze względu na przejściowy i dynamiczny charakter projektów budowlanych (Albert i in., 2015). Co więcej, badanie czasowych zależności między wiodącymi wskaźnikami, takimi jak Architecture Billings Index (ABI) i kosztami poniesionymi na budowę przy użyciu metod szeregów czasowych, okazało się cennym podejściem do identyfikacji i kwantyfikacji tych relacji.

Zapewniło to przedsiębiorstwom budowlanym wgląd w podejmowanie lepszych strategicznych decyzji biznesowych na niestabilnym rynku budowlanym (Abediniangerabi i in., 2017).

Test korelacji Pearsona jest powszechnie stosowany w badaniach nad zarządzaniem budową do pomiaru siły i kierunku związku liniowego między dwiema zmiennymi ciągłymi (Ngwenya i in., 2019) (Naji i in., 2021). Równie często do oceny siły i kierunku monotonicznych powiązań między zmiennymi wykorzystywany jest współczynnik korelacji Spearmana. Stosowany jest zwłaszcza wtedy, gdy dane mogą nie spełniać założeń korelacji Pearsona (Naji i in., 2021) (Hiyassat i in., 2016). Wśród szeregu opracowań dotyczących wykorzystania korelacji w badaniach różnych aspektów procesu budowlanego można doszukać się artykułów, które dokonują porównania korelacji z analizą regresji. Analiza korelacji jest narzędziem statystycznym stosowanym do oceny siły związku pomiędzy dwiema zmiennymi ilościowymi, podczas gdy analiza regresji liniowej modeluje związek między zmienną zależną a jedną lub większą liczbą zmiennych niezależnych (Franzese & Iuliano, 2018). Modelowanie równań strukturalnych poprzez rozszerzenie modelowania regresji, jest wykorzystywane do oszacowania związku przyczynowego między czynnikami w projektach budowlanych, zapewniając graficzną reprezentację relacji (Hameed Memon i in., 2013).

Do kluczowych zalet wynikających z badania korelacji należy identyfikacja współzależności analizowanych cech. Testy korelacji mogą ujawnić istotne związki pomiędzy różnymi zmiennymi projektu, takimi jak koszty, czas i zadowolenie klienta. Na przykład, badanie przeprowadzone przez zespół (Lowe i in., 2006) wykazało silne korelacje między kosztami budowy, kosztami klienta i wewnętrzną powierzchnią brutto, które można wykorzystać do opracowania dokładnych modeli kosztów. W zarządzaniu ryzykiem zrozumienie korelacji między fazami lub segmentami projektu może poprawić ramy analizy kosztów i ryzyka. Pomaga to w lepszym zarządzaniu kosztami projektu poprzez uwzględnienie niepewności i współzależności (Tran & Bypaneni, 2016). Analiza korelacji może zidentyfikować czynniki, które znacząco wpływają na wydajność projektu, takie jak odchylenie kosztów, odchylenie czasu i poziom satysfakcji. Pozwala to na opracowanie modeli predykcyjnych w celu poprawy wyników projektu (Koch & Shayboun, 2019). Badania korelacji mogą być również wykorzystane w procesach związanych z zarządzaniem roszczeniami. Testy mogą pomóc w ustaleniu związków przyczynowo – skutkowych w przypadku wystąpienia roszczeń budowlanych, pomagając zidentyfikować istotne przyczyny i ich wpływ na opóźnienia projektu i relacje kontraktowe (Kikwasi, 2023). Wykorzystując analizę korelacji, badacze mogą określić krytyczne czynniki sukcesu dla różnych ról organizacyjnych w ramach projektu, pomagając w jego lepszym zarządzaniu i wdrażaniu (Yay, 2022).

W ramach podsumowania przeglądu literatury dotyczącego wykorzystania analizy korelacji w badaniu zagadnień związanych z procesem budowlanym można stwierdzić, że testy korelacji są przydatnym i szeroko stosowanym narzędziem w badaniach procesu zarządzania budową jako wsparcie w zrozumieniu i optymalizacji relacji między różnymi cechami projektu. Potwierdzono, że wykorzystywanie narzędzi do badania korelacji ma istotny wpływ na uzyskiwanie lepszych wyników w projektach (Lowe i in., 2006, Tran & Bypaneni, 2016, Koch & Shayboun, 2019, Yay, 2022, Kikwasi, 2023).

6.3. Badanie współzależności pomiędzy przekroczeniem kosztu a przekroczeniem terminu w przedsięwzięciach budowlanych

Analizę współzależności rozpoczęto od sformułowania hipotezy. W przypadku badania współzależności pomiędzy przekroczeniem kosztu i przekroczeniem terminu w przedsięwzięciach budowlanych jako hipotezę postawiono założenie, że przekroczenie kosztu i przekroczenie terminu są zmiennymi zależnymi. Wynika ono z przytoczonego we wstępie do niniejszej dysertacji stwierdzenia, opartego na prostej logicznej dedukcji, że skoro przedsięwzięcie budowlane trwa dłużej niż pierwotnie zakładano, to z uwagi na ponoszone z tego tytułu nakłady, jego koszt również zostanie przekroczony. Drugim etapem analizy współzależności było doświadczalne potwierdzenie lub odrzucenie hipotezy. W oparciu o zgromadzony materiał badawczy, przy użyciu wspomnianych metod statystycznych próbowano podważyć postawioną hipotezę i jeśli doświadczenie jej nie potwierdzi – rozważono jej odrzucenie.

Wybór metody badawczej jest uzależniony od charakteru danych, które są do dyspozycji. Przekroczenie kosztu i przekroczenie terminu w próbie badawczej są opisane za pomocą wskaźników CPI i SPI, które przyjmują wartości liczbowe. Pozwoliło to na rozpoczęcie analizy od sporządzenia korelogramu - korelacyjnego wykresu rozrzutu. Uzyskany w ten sposób obraz umożliwił wstępnie ocenić czy pomiędzy współczynnikami występuje zależność, czy też nie. Aby ocenić jak silna jest współzależność pomiędzy badanymi parametrami wykorzystano narzędzie w postaci współczynnika Pearsona. W zależności od uzyskanych wyników i ich odpowiedniej interpretacji można było uzyskać cenne informacje na temat badanej współzależności. Cechą tej metody jest zbadanie liniowego charakteru korelacji. Aby ocenić szerszy charakter współzależności wykorzystano korelację Spearmana, polegającą na przypisaniu rang (numerów porządkowych) poszczególnym zmiennym. Ma ona zastosowanie w przypadkach w których poszczególne cechy są mierzone za pomocą skali porządkowej. Wiąże się to z koniecznością dostosowania analizowanych danych na potrzeby niniejszej metody. Umożliwiła ona jednak badanie współzależności o szerszym niż liniowy, charakterze monotonicznym. Obie korelacje są wystarczające do oceny związku pomiędzy przekroczeniem kosztu a przekroczeniem terminu. Powszechnie w takich badaniach oczekuje się korelacji liniowej lub zbliżonej do liniowej, ponieważ jest ona łatwa do interpretacji. Ponadto w wielu przypadkach relacje między zmiennymi mogą być wystarczająco dobrze przybliżone liniowo lub z zachowaniem ich monotonicznego charakteru. Modele takie są też prostsze i bardziej intuicyjne w analizie. Dlatego zastosowane korelacje Pearsona i Spearmana uznano jako wystarczające narzędzia do analizy badanych zależności.

6.3.1. Badanie korelacji przekroczenia kosztu i przekroczenia terminu z zastosowaniem korelacyjnego wykresu rozrzutu

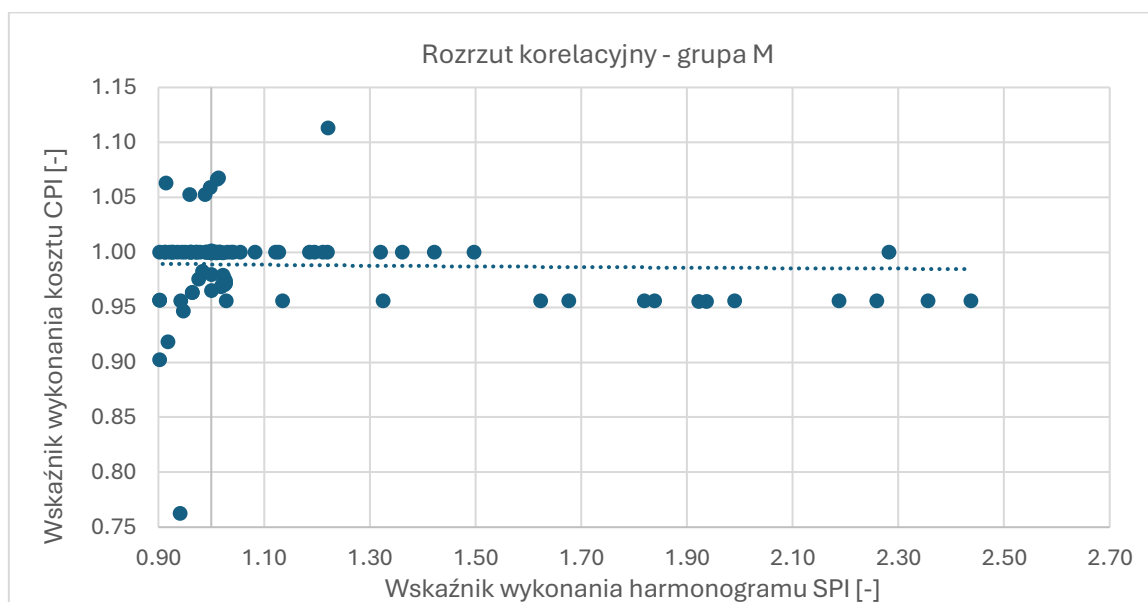
Korelacyjny wykres rozrzutu jest prostym narzędziem pozwalającym w sposób graficzny przedstawić zakres występowania badanych cech. W przypadku niniejszego opracowania takimi cechami są przekroczenie kosztu oraz przekroczenie terminu. Obie przyjmują określone badaniami wartości liczbowe pozwalające skonstruować wykres, w którym oś pionowa będzie reprezentować wartości CPI a oś pozioma SPI:

- CPI – wskaźnik wykonania kosztu; $CPI < 1$ reprezentuje cechę zmiennej zwaną przekroczeniem kosztu

- SPI – wskaźnik wykonania harmonogramu; $SPI < 1$ reprezentuje cechę zmiennej zwaną przekroczeniem terminu

Na podstawie danych wykorzystanych do sporządzenia korelogramu wyznaczono również linię trendu, która ma za zadanie ułatwić wskazanie kierunku korelacji. Wykresy zostały sporządzone dla wszystkich grup analizowanej próby badawczej.

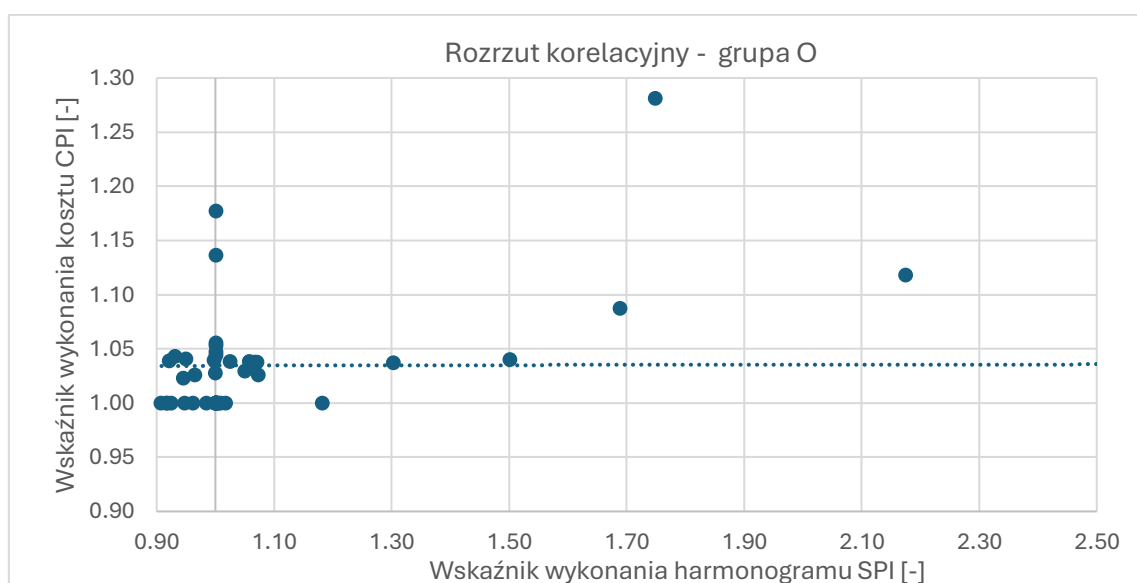
Wykres rozrzutu korelacyjnego dla grupy budynków mieszkalnych (M) (rys.6.1) został opracowany w oparciu o 224 pomiary wykonane na 14 inwestycjach.



Rysunek 6.1. Wykresy rozrzutu korelacyjnego dla grupy budynków mieszkalnych (M).

Widoczna jest duża koncentracja wartości obu wskaźników w okolicy wartości 1. Obserwuje się również większy zakres rozrzutu wartości SPI w porównaniu do CPI.

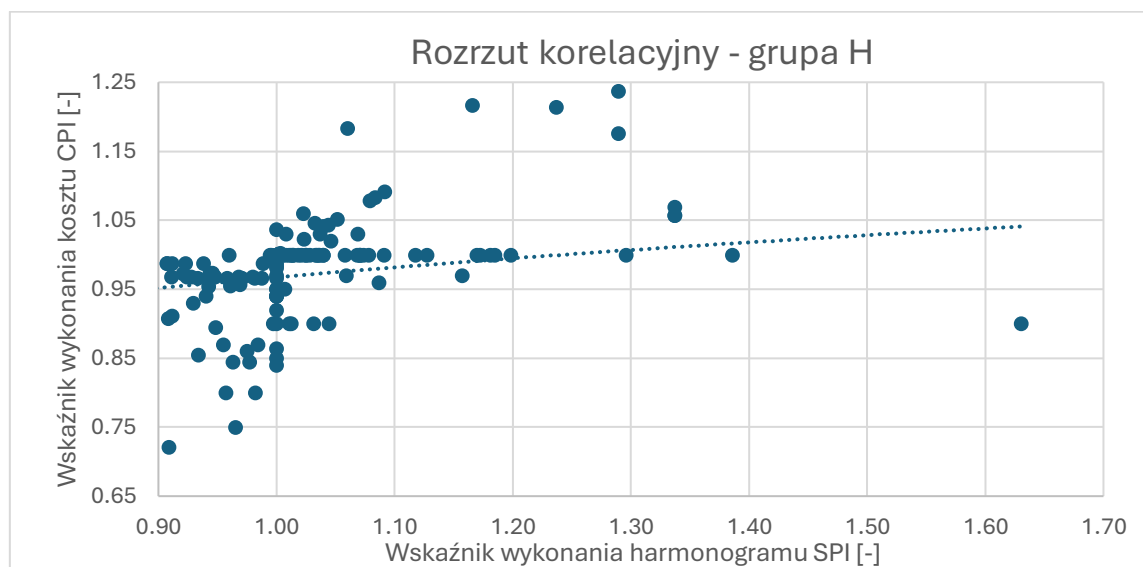
W grupie budynków biurowych (O) również obserwuje się dużą koncentrację wartości obu współczynników w okolicy wartości 1 (rys. 6.2). Podobnie jak w przypadku budynków mieszkalnych obserwuje się większy obszar rozrzutu wskaźnika SPI w porównaniu z CPI.



Rysunek 6.2. Wykresy rozrzutu korelacyjnego dla grupy budynków biurowych (O)

Do sporządzenia wykresu wykorzystano dane ze 106 pomiarów uzyskane z 4 inwestycji.

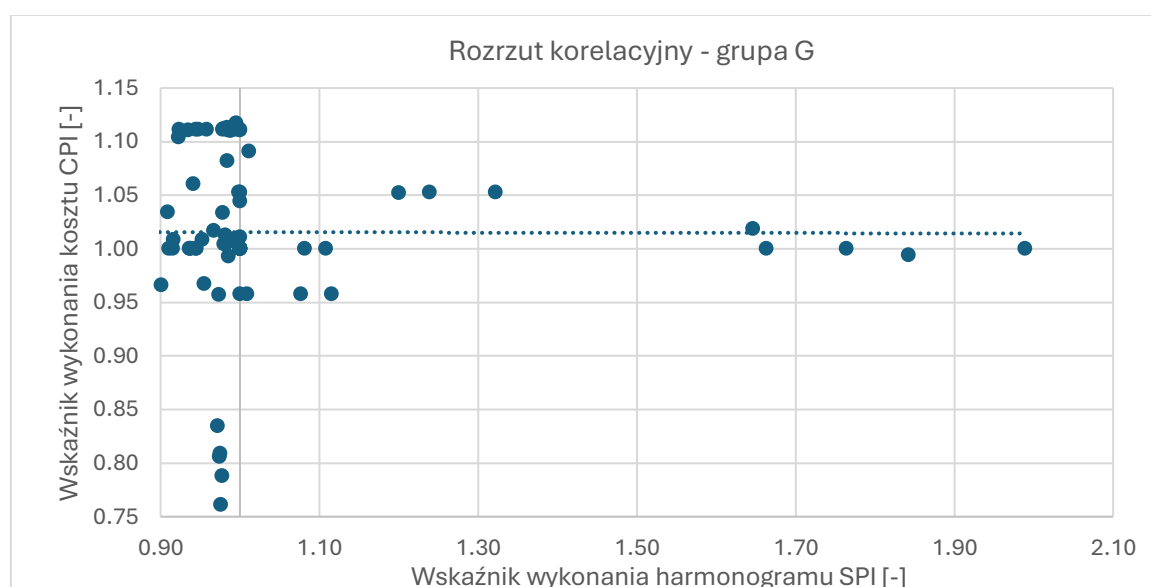
Na podstawie 176 pomiarów uzyskanych w trakcie kontroli 9 przedsięwzięć budowlanych związanych z budową budynków hotelowych (H) opracowano korelogram przedstawiający rozrzut wskaźnika przekroczenia kosztu i przekroczenia terminu (rys. 6.3.)



Rysunek 6.3. Wykresy rozrzutu korelacyjnego dla grupy budynków hotelowych (H)

Zaobserwowano istotną koncentrację wskaźnika CPI na wartości 1,0 (brak przekroczeń) oraz wskaźnika SPI w przedziale od około 0,9 do 1,1. Podobnie jak w poprzednich grupach inwestycji zaobserwowano kilkanaście wartości znacząco odbiegających od wyraźnie zarysowanego obszaru skupienia.

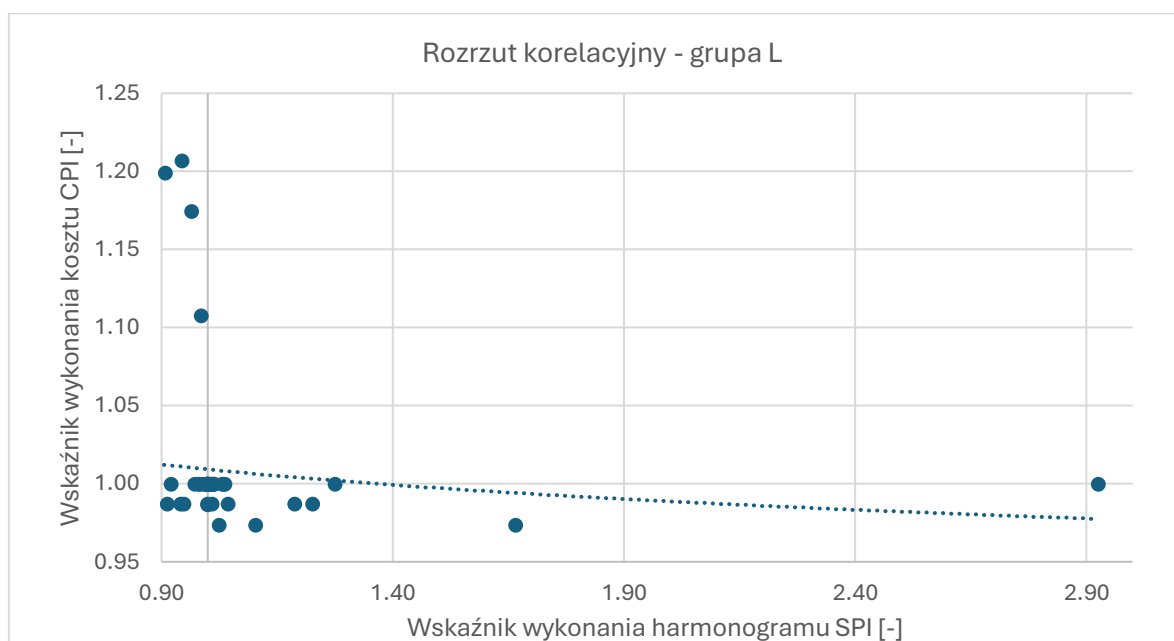
Grupa obiektów w której ujęto centra handlowe (G), w przeciwieństwie do wcześniej zaprezentowanych charakteryzuje się większym rozrzutem wartości CPI (rys. 6.4.). Jego największą koncentrację obserwuje się w przedziale pomiędzy 0,95 a 1,12. Rozrzut wskaźnika SPI jest natomiast skupiony w przedziale od 0,9 do około 1,0.



Rysunek 6.4. Wykresy rozrzutu korelacyjnego dla grupy centrów handlowych (G)

Podobnie jak w przypadku przedstawionych powyżej grup obiektów tak i w analizowanej grupie obserwuje się kilkanaście punktów odbiegających od wyraźnie zarysowanego obszaru skupienia. Analizę przeprowadzono w oparciu o 119 punktów pomiarowych uzyskanych z kontroli 8 inwestycji.

Rozrzut wartości wskaźników przekroczeń CPI i SPI w ostatniej badanej grupie obiektów wyraźnie odbiega od rozrzutów opracowanych dla pozostałych grup (rys. 6.5).



Rysunek 6.5. Wykresy rozrzutu korelacyjnego dla grupy centrów logistycznych (L)

Wykres rozrzutu korelacyjnego sporządzony w oparciu o 55 punktów pomiarowych uzyskanych z 6 inwestycji ujawnia duże skupienie wskaźnika CPI w obszarze wartości 1,0. Rozrzut wskaźnika SPI, podobnie jak we wcześniej analizowanych grupach, jest skupiony w przedziale pomiędzy 0,9 a około 1,1. Elementem wyróżniającym tą grupę od pozostałych w próbie badawczej jest spostrzeżenie, że nie stwierdzono żadnych oszczędności zarówno po stronie współczynnika CPI jak i SPI. Świadczy o tym brak punktów w pierwszej ćwiartce zaprezentowanego wykresu.

6.3.1.1. Wnioski z badania korelacji przekroczenia kosztu i przekroczenia terminu z zastosowaniem korelacyjnego wykresu rozrzutu

Przedstawione powyżej efekty analizy polegającej na sporządzeniu korelacyjnych wykresów rozrzutu wartości przekroczeń kosztu i terminu dla próby badawczej z której wydzielono pięć grup obiektów budowlanych pozwoliły na sformułowanie następujących wniosków:

- siła skupienia wskaźników przekroczenia kosztów CPI jest wyraźnie większa niż siła skupienia wskaźników przekroczenia terminu SPI. Wskazuje na to wyraźnie kumulacja CPI wokół wartości 1,0. Natomiast wartości SPI kumulują się w przedziale pomiędzy 0,9 a 1,1;
- na podstawie analizy wykresów zaobserwowano duże rozbieżności pomiędzy rozrzutem wartości obu analizowanych cech, wskazując na dużo większą zmienność przekroczenia terminu (SPI);

- przebieg linii trendu na korelogramach opracowanych dla grupy budynków mieszkaniowych (M), budynków biurowych (O) i centrów handlowych (G) wskazuje na dużą stabilność wskaźnika CPI względem wskaźnika SPI charakteryzującego się dużą zmiennością. Świadczy to o znikomej korelacji badanych cech;
- na podstawie linii trendu wyznaczonej dla korelogramu sporządzonego dla budynków hotelowych (H) obserwuje się niewielki trend wzrostowy mogący świadczyć o niewielkiej korelacji dodatniej badanych wskaźników;
- w przypadku grupy centrów logistycznych (L) przebieg linii trendu wskazuje na możliwość występowania niewielkiej korelacji ujemnej pomiędzy cechami CPI i SPI;
- wnikliwa obserwacja rozrzutu wskaźników CPI i SPI na wykresach pozwoliła na sformułowanie stwierdzenia, że wartości obu parametrów wpisują się w ramy rozkładu normalnego, skupiając się wokół określonych przedziałów. Pozwoliło to na wykorzystanie danych uzyskanych z próby badawczej do dalszej analizy polegającej na określeniu współczynnika korelacji współczynnikiem Pearsona.

6.3.2. Badanie korelacji przekroczenia kosztu i przekroczenia terminu z zastosowaniem współczynnika korelacji Pearsona

Współczynnik korelacji Pearsona, znany również jako współczynnik korelacji iloczynów częściowych Pearsona, jest statystyczną miarą służącą do oceny liniowej zależności między dwiema zmiennymi ilościowymi. Jest to jedno z najczęściej stosowanych narzędzi w analizie danych, używane w wielu dziedzinach nauki, w tym również w inżynierii. Korelacja Pearsona pozwala na zrozumienie, w jakim stopniu zmiany jednej zmiennej są związane ze zmianami drugiej zmiennej, co jest kluczowe w prawidłowej interpretacji wyników prowadzonych badań.

Wartości współczynnika korelacji Pearsona wahają się od „-1” do „1”. Wartość „1” oznacza doskonałą dodatnią korelację, gdzie wzrost jednej zmiennej jest ściśle związany ze wzrostem drugiej zmiennej. Wartość „-1” oznacza doskonałą ujemną korelację, gdzie wzrost jednej zmiennej jest ściśle związany ze spadkiem drugiej zmiennej. Wartość 0 oznacza brak liniowej zależności między zmiennymi, co sugeruje, że zmiany jednej zmiennej nie są związane z przewidywalnymi zmianami drugiej zmiennej.

6.3.2.1. Metoda wyznaczania współczynnika korelacji Pearsona

Współczynnik korelacji Pearsona jest definiowany jako iloraz kowariancji między dwiema zmiennymi a iloczynem ich odchyłeń standardowych (Krysicki W. i in., 2004). W celu jego wyznaczenia należy wykonać szereg operacji matematycznych poprzedzonych odpowiednim przygotowaniem danych. Jest on obliczany jako iloraz sumy iloczynów odchyłeń oraz pierwiastka z iloczynu sum kwadratów odchyłeń:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \cdot \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad [6.1.]$$

Uzyskany w ten sposób wynik zawiera się w przedziale wartości od „-1” do „1”. W zależności od wartości jaką uzyska współczynnik r dokonuje się odpowiedniej interpretacji:

- $r = 1$: Doskonała dodatnia korelacja liniowa. Wzrost jednej zmiennej jest ściśle związany ze wzrostem drugiej zmiennej.
- $r = -1$: Doskonała ujemna korelacja liniowa. Wzrost jednej zmiennej jest ściśle związany ze spadkiem drugiej zmiennej;
- $r = 0$: Brak liniowej zależności między zmiennymi. Zmiana jednej zmiennej nie jest związana z przewidywalną zmianą drugiej zmiennej;

Wartości pośrednie wskazują na stopień liniowej zależności, gdzie im bliżej wartości bezwzględnej 1, tym korelacja jest silniejsza.

Chociaż współczynnik korelacji Pearsona jest użytecznym narzędziem, ma pewne istotne ograniczenia, które należy uwzględnić podczas interpretacji wyników:

- założenie liniowości: Współczynnik korelacji Pearsona mierzy tylko zależność liniową między zmiennymi. Jeśli zależność między zmiennymi jest nieliniowa, współczynnik korelacji Pearsona może nie oddać prawdziwego charakteru tej zależności. W takich przypadkach stosowanie współczynnika Pearsona może prowadzić do błędnych wniosków;
- wrażliwość na wartości odstające: Wartości odstające, czyli obserwacje znacznie odbiegające od reszty danych, mogą znacząco wpłynąć na wartość współczynnika korelacji Pearsona. Nawet pojedyncza wartość odstająca może drastycznie zmienić wynik analizy, co prowadzi do błędnych interpretacji korelacji między zmiennymi;
- założenie normalności rozkładu: Współczynnik korelacji Pearsona zakłada, że obie zmienne mają rozkład normalny. Jeśli dane nie spełniają tego założenia, wyniki analizy mogą być niepoprawne. W takich przypadkach warto rozważyć użycie innych miar korelacji, które nie wymagają normalności rozkładu, takich jak współczynnik korelacji rang Spearmana;
- brak informacji o przyczynowości: Korelacja nie oznacza przyczynowości. Wysoki współczynnik korelacji Pearsona nie wskazuje, że jedna zmienna powoduje zmiany w drugiej zmiennej. Może istnieć trzecia zmienna, która wpływa na obie analizowane zmienne, co nazywane jest zmienną ukrytą lub konfundującą;
- jednostki pomiaru: Chociaż współczynnik korelacji Pearsona jest bezwzględny względem jednostek pomiaru zmiennych, interpretacja wyników może być trudna, jeśli zmienne mają różne jednostki. Należy zachować ostrożność podczas interpretacji wyników w kontekście jednostek, w których zmienne są mierzone. Różnice w jednostkach mogą prowadzić do niejasności w interpretacji siły i kierunku korelacji, dlatego ważne jest, aby zrozumieć kontekst danych i sposób, w jaki zostały zmierzone.

6.3.2.2. Wyniki badań korelacji współczynnikiem Pearsona

Z całej próby badawczej wyodrębniono pięć grup obiektów. Dla każdej z nich za pomocą formuły obliczeniowych metody EVM wyznaczono dwie zmienne jako cechy wskaźnika przekroczenia kosztu CPI oraz wskaźnika przekroczenia terminu SPI. Ponieważ każda z grup zawiera zróżnicowaną liczbę przedsięwzięć charakteryzujących się odmiennym czasem realizacji, współczynnik korelacji będzie wyliczany w oparciu o zróżnicowaną liczbę obserwacji. Poniższe zestawienie zawiera informacje na temat liczby przedsięwzięć w danej

grupie badawczej oraz liczby pomiarów badawczych na podstawie których przeprowadzono analizę (tab.6.1.)

Tabela 6.1. Liczebność próby badawczej

Lp.	Grupa inwestycji	Liczba przedsięwzięć	Liczba pomiarów
M	Budynki mieszkalne	14	224
O	Budynki biurowe	4	106
H	Budynki hotelowe	9	176
G	Centra handlowe	8	119
L	Centra logistyczne	6	55

Z uwagi na dużą liczbę danych, poniżej zaprezentowano przebieg wyznaczania współczynników Pearsona dla każdej grupy przedsięwzięć z tabelami danych przedstawionymi w skróconej formie. W pierwszej kolejności przedstawiono analizy dla grupy budynków mieszkalnych (M). (tab. 6.2.)

Tabela 6.2. Przebieg badania korelacji współczynnikiem Pearsona dla grupy budynków mieszkalnych (M)

Lp.	SPI	CPI	$X-X_{\text{sr}}$	$Y-Y_{\text{sr}}$	$(X-X_{\text{sr}})^2$	$(Y-Y_{\text{sr}})^2$	$(X-X_{\text{sr}})(Y-Y_{\text{sr}})$
1	1,00	1,00	0,05	0,01	0,00	0,00	0,00
2	1,00	1,00	0,05	0,01	0,00	0,00	0,00
3	0,77	1,00	-0,18	0,01	0,03	0,00	0,00
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
222	1,02	0,98	0,07	-0,01	0,01	0,00	0,00
223	1,00	1,00	0,06	0,01	0,00	0,00	0,00
224	1,04	1,00	0,09	0,01	0,01	0,00	0,00
	0,95	0,99		suma	22,93	0,30	-0,21
	średnie						

Współczynnik korelacji $r = -0,08178$

W tabeli 6.3. przedstawiono przebieg badania korelacji przeprowadzony dla budynków biurowych (O).

Tabela 6.3. Przebieg badania korelacji współczynnikiem Pearsona dla grupy budynków biurowych (O)

Lp.	SPI	CPI	$X-X_{\text{sr}}$	$Y-Y_{\text{sr}}$	$(X-X_{\text{sr}})^2$	$(Y-Y_{\text{sr}})^2$	$(X-X_{\text{sr}})(Y-Y_{\text{sr}})$
1	1,00	1,00	0,07	-0,03	0,01	0,00	0,00
2	1,18	1,00	0,25	-0,03	0,06	0,00	-0,01
3	1,00	1,00	0,07	-0,03	0,01	0,00	0,00
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
104	0,74	1,00	-0,19	-0,03	0,04	0,00	0,01
105	0,77	1,00	-0,16	-0,03	0,02	0,00	0,01
106	0,81	1,00	-0,12	-0,03	0,01	0,00	0,00
	0,93	1,03		suma	50,45	0,31	-0,01
	średnie						

Współczynnik korelacji $r = -0,00368$

Dla obiektów z grupy budynków hotelowych (H) badanie korelacji zamieszczono w tabeli 6.4:

Tabela 6.4. Przebieg badania korelacji współczynnikiem Pearsona dla grupy budynków hotelowych (H)

Lp.	SPI	CPI	$X-X_{\text{sr}}$	$Y-Y_{\text{sr}}$	$(X-X_{\text{sr}})^2$	$(Y-Y_{\text{sr}})^2$	$(X-X_{\text{sr}})(Y-Y_{\text{sr}})$
1	1,00	1,00	0,01	-0,01	0,00	0,00	0,00
2	1,00	1,00	0,01	-0,01	0,00	0,00	0,00
3	1,00	1,00	0,01	-0,01	0,00	0,00	0,00
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
174	0,91	1,00	-0,08	-0,01	0,01	0,00	0,00
175	0,99	1,00	0,00	-0,01	0,00	0,00	0,00
176	1,01	1,00	0,02	-0,01	0,00	0,00	0,00
	0,99	1,01		suma	3,64	0,26	0,95
	średnie						

Współczynnik korelacji $r = 0,37408$

Kolejną grupą dla której przebieg analizy został przedstawiony poniżej w tabeli 6.5. są centra handlowe (G):

Tabela 6.5. Przebieg badania korelacji współczynnikiem Pearsona dla centrów handlowych (G)

Lp.	SPI	CPI	$X-X_{\text{sr}}$	$Y-Y_{\text{sr}}$	$(X-X_{\text{sr}})^2$	$(Y-Y_{\text{sr}})^2$	$(X-X_{\text{sr}})(Y-Y_{\text{sr}})$
1	1,00	1,00	0,09	0,00	0,01	0,01	0,00
2	0,89	0,89	-0,02	-0,11	0,00	0,00	0,00
3	0,81	0,91	-0,10	-0,09	0,01	0,01	0,01
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
117	0,85	1,06	-0,06	0,06	0,00	0,00	0,00
118	0,88	1,03	-0,03	0,03	0,00	0,00	0,00
119	0,91	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	0,95	1,02		suma	5,87	5,87	0,04
	średnie						

Współczynnik korelacji $r = 0,007444$

Ostatnią grupą w próbie badawczej są centra logistyczne (L). Badanie korelacji współczynnikiem Pearsona zaprezentowano w tabeli 6.6.:

Tabela 6.6. Przebieg badania korelacji współczynnikiem Pearsona dla centrów logistycznych (L)

Lp.	SPI	CPI	$X-X_{\text{sr}}$	$Y-Y_{\text{sr}}$	$(X-X_{\text{sr}})^2$	$(Y-Y_{\text{sr}})^2$	$(X-X_{\text{sr}})(Y-Y_{\text{sr}})$
1	1,67	0,97	0,63	-0,04	0,40	0,00	-0,02
2	1,10	0,97	0,07	-0,04	0,01	0,00	0,00
3	1,02	0,97	-0,01	-0,04	0,00	0,00	0,00
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
53	0,97	1,00	-0,06	-0,01	0,00	0,00	0,00
54	0,99	1,00	-0,04	-0,01	0,00	0,00	0,00
55	1,00	1,00	-0,03	-0,01	0,00	0,00	0,00
	1,03	1,01		suma	4,66	0,12	-0,08
	średnie						

Współczynnik korelacji $r = -0,10236$

W ramach podsumowania w tabeli 6.7. przedstawiono zbiorcze zestawienie wartości współczynników korelacji wyznaczonych omawianą metodą dla każdej grupy obiektów. Tabela zawiera również informację na temat interpretacji uzyskanego wyniku.

Tabela 6.7. Zbiorcze zestawienie wyników badania współczynnika korelacji Pearsona

Lp.	Grupa inwestycji	Wartość współczynnika korelacji	Interpretacja	Ocena istotności testu
M	Budynki mieszkalne	- 0,08178	Brak związku liniowego	nieistotny
O	Budynki biurowe	- 0,00368	Brak związku liniowego	nieistotny
H	Budynki hotelowe	0,37408	Słaba zależność	istotny
G	Centra handlowe	0,007444	Brak związku liniowego	nieistotny
L	Centra logistyczne	- 0,10236	Brak związku liniowego	nieistotny

6.3.2.3. Wnioski z badań korelacji współczynnikiem Pearsona

Badania współzależności współczynnikiem korelacji Pearsona pozwoliły na sformułowanie następujących wniosków:

- niska wartość współczynnika korelacji dla grupy budynków mieszkalnych (M) wyznaczona w oparciu o 224 pomiary odchyłek wskazuje na brak współzależności pomiędzy przekroczeniem kosztu i przekroczeniem terminu w tej grupie inwestycji;
- budynki biurowe (O) charakteryzują się również niskim współczynnikiem korelacji wyznaczonym w oparciu o 106 pomiarów wskazującym na brak współzależności pomiędzy badanymi cechami;
- jedynie współczynnik korelacji oraz istotność testu uzyskane w analizie grupy budynków hotelowych (H) wskazują na słabą korelację pomiędzy przekroczeniem kosztu i przekroczeniem czasu. Potwierdza to słuszność podziału próby badawczej na poszczególne grupy obiektów;
- na wynik badania w grupie budynków hotelowych (H) niewątpliwym wpływ miał brak przekroczenia kosztu w niemal wszystkich punktach pomiarowych każdej badanej inwestycji oraz odrzucenie wartości znacząco odstających;
- wynik badania współzależności przekroczenia kosztu i przekroczenia terminu w grupie centrów handlowych (G) wskazuje na brak korelacji pomiędzy badanymi cechami;
- w ostatniej grupie obiektów poddanej badaniu, centrach logistycznych (L), uzyskano niski współczynnik korelacji, co również świadczy o braku współzależności pomiędzy przekroczeniem kosztu i terminu;
- brak korelacji liniowej świadczy o braku współzależności pomiędzy badanymi cechami, która - jak wskazuje zależność funkcyjna w postaci krzywej S - też powinna być liniowa.

Wyniki uzyskane w badaniu przeprowadzonym z wykorzystaniem korelacji Pearsona wskazują jedynie na występowanie istotnej współzależności przekroczenia kosztu i przekroczenia terminu w przypadku grupy budynków hotelowych (H). W celu zbadania korelacji w szerszym zakresie, w dalszej części pracy, przeprowadzono analizę współzależności badanych cech współczynnikiem korelacji Spearmana.

6.3.3. Badanie korelacji przekroczenia kosztu i przekroczenia terminu z zastosowaniem współczynnika korelacji Spearmana

Współczynnik korelacji Spearmana jest nieparametrycznym miernikiem statystycznym stosowanym do oceny siły i kierunku monotonicznego związku między dwiema zmiennymi. Metoda ta jest szczególnie użyteczna, gdy dane nie spełniają założeń normalności rozkładu lub gdy relacja między zmiennymi jest nieliniowa, ale monotoniczna. Współczynnik korelacji Spearmana mierzy stopień, w jakim wartości zmiennych można wyrazić jako monotonicznie rosnące lub malejące funkcje jednej zmiennej względem drugiej.

6.3.3.1. Metodyka wyznaczania współczynnika korelacji Spearmana

Współczynnik korelacji rang Spearmana jest obliczany na podstawie rang danych, a nie ich wartości bezwzględnych. Proces obliczania tego współczynnika obejmuje przekształcenie oryginalnych danych na rangi oraz zastosowanie wzoru na współczynnik korelacji rang (Krysicki W. i in., 2004).

Podobnie jak w przypadku badania współczynnika korelacji Pearsona, pierwszym krokiem jest przygotowanie dwóch zestawów danych, które mają być analizowane. Zakłada się, dwie zmienne X i Y , każda z n obserwacjami. W przypadku niniejszej analizy są to przekroczenie kosztu i przekroczenie terminu.

Następnie każdej wartości zmiennych X i Y przypisuje się odpowiednią rangę. W przypadku danych o tych samych wartościach przypisuje się im średnią rangę. Na przykład, jeśli dwie obserwacje mają taką samą wartość, przypisuje się im średnią z rang, które zajmują.

W dalszej kolejności, dla każdej pary obserwacji oblicza się różnicę między rangą zmiennej X a rangą zmiennej Y :

$$d_i = R(X_i) - R(Y_i) \quad [6.2.]$$

gdzie: $R(X_i)$ i $R(Y_i)$ to rangi odpowiadające obserwacjom X_i i Y_i

Każda z wyliczonych różnic rang jest podnoszona do kwadratu, a następnie przeprowadza się ich sumowanie. Tak przygotowane dane pozwolą w kolejnym kroku obliczyć wartość współczynnika korelacji rang Spearmana:

$$\rho = 1 - \frac{6 \sum d_i^2}{n(n^2 - 1)} \quad [6.3.]$$

gdzie: d_i to różnice rang między zmiennymi X i Y , n to liczba obserwacji.

Współczynnik korelacji rang Spearmana, podobnie jak współczynnik korelacji Pearsona, przyjmuje wartości od „-1” do „1”. W zależności od uzyskanych wartości wyniki należy interpretować według przedstawionych poniżej wytycznych:

- $\rho = 1$: doskonała dodatnia korelacja rang. Wzrost jednej zmiennej jest ściśle związany ze wzrostem drugiej zmiennej.
- $\rho = -1$: doskonała ujemna korelacja rang. Wzrost jednej zmiennej jest ściśle związany ze spadkiem drugiej zmiennej.

- $\rho = 0$: brak monotonicznej zależności między zmiennymi. Zmiana jednej zmiennej nie jest związana z przewidywalną zmianą drugiej zmiennej.

Wartości pośrednie wskazują na stopień monotonicznej zależności, gdzie im bliżej wartości bezwzględnej 1, tym silniejsza jest korelacja rang.

Podobnie jak każda metoda statystyczna, współczynnik korelacji rang Spearmana ma pewne ograniczenia, które należy uwzględnić podczas interpretacji wyników:

- założenie monotoniczności: Współczynnik korelacji Spearmana mierzy jedynie zależność monotoniczną między zmiennymi. Jeśli relacja między zmiennymi nie jest monotoniczna, wyniki analizy mogą być niepoprawne. W przypadku zależności nieliniowych, które nie są monotoniczne, współczynnik Spearmana może nie oddać prawdziwego charakteru relacji;
- wrażliwość na wartości odstające: Chociaż współczynnik Spearmana jest mniej wrażliwy na wartości odstające niż współczynnik Pearsona, nadal wartości odstające mogą wpływać na wynik analizy. Wartości odstające mogą zaburzyć rangi danych, co może prowadzić do błędnych wniosków;
- założenie ciągłości danych: Badanie korelacji współczynnikiem Spearmana zakłada, że dane mają charakter ciągły. W przypadku danych dyskretnych lub rang, które nie mają pełnej ciągłości, może wystąpić spłaszczenie wyników, co może wpływać na dokładność analizy;
- brak informacji o przyczynowości: Podobnie jak współczynnik Pearsona, korelacja uzyskana współczynnikiem Spearmana nie wskazuje na przyczynowość. Wysoki współczynnik korelacji Spearmana nie oznacza, że jedna zmienna powoduje zmiany w drugiej zmiennej. Może istnieć trzecia zmienna, która wpływa na obie analizowane zmienne, co nazywane jest zmienną ukrytą lub konfundującą;
- rangi związane: W przypadku danych, gdzie występuje wiele tych samych wartości, rangi są związane (ang. tied ranks), co może wpływać na wynik analizy. Współczynnik Spearmana wymaga uwzględnienia takich sytuacji i odpowiedniego dostosowania wzoru, aby dokładnie oszacować korelację rang;

W celu oceny, czy wyznaczony współczynnik korelacji rang Spearmana jest istotny statystycznie, przeprowadzono test istotności. Jeden z powszechnie stosowanych testów opiera się na zastosowaniu statystyki t -Studenta, obliczanej na podstawie współczynnika Spearmana:

$$t = \frac{\rho\sqrt{n-2}}{\sqrt{1-\rho^2}} \quad [6.4.]$$

gdzie: ρ – wyznaczony współczynnik korelacji rang Spearmana, n – liczba obserwacji.

Statystyka t jest porównywana z wartością krytyczną z rozkładu t -Studenta dla $n-2$ stopni swobody. Jeśli obliczona wartość t jest większa od wartości krytycznej, współczynnik korelacji można uznać za istotny statystycznie, co oznacza, że istnieje wystarczający dowód na monotoniczną zależność między zmiennymi w populacji, z której pochodzi próba.

6.3.3.2. Wyniki badań korelacji rang współczynnikiem Spearmana

W analizie korelacji rang Spearmana wykorzystano ten sam zestaw danych co w analizie współczynnika Pearsona, pochodzący w pięciu wyodrębnionych grup obiektów budowlanych. Poszczególnym wartościom zostały przydzielone odpowiednie rangi, na których przeprowadzono szereg operacji matematycznych pozwalających wyznaczyć współczynnik korelacji. Z uwagi na dużą liczbę danych, podobnie jak w przypadku wcześniejszej analizy, zaprezentowano przebieg wyznaczania współczynnika Spearmana dla każdej grupy przedsięwzięć z tabelami danych przedstawionymi w skróconej formie.

W pierwszej kolejności zaprezentowano analizy dla grupy budynków mieszkalnych (M). (tab. 6.8.):

Tabela 6.8. Przebieg badania korelacji współczynnikiem Spearmana dla budynków mieszkalnych (M)

Lp.	Przekroczenie terminu (X_i)	Przekroczenie kosztu (Y_i)	Ranga $R(X_i)$	Ranga $R(Y_i)$	$(R(X_i) - R(Y_i))^2$
1	1,00	1,00	152,0	136,5	240,3
2	1,00	1,00	152,0	136,5	240,3
3	1,00	1,00	152,0	136,5	240,3
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
222	1,02	0,98	187,0	50,5	18632,3
223	1,00	1,00	152,0	136,5	240,3
224	1,04	1,00	196,5	136,5	3600,0
			Suma		1581558,0

Współczynnik korelacji $R = 0,155692$

Przebieg badania korelacji na budynków biurowych (O) przedstawiono poniżej w tabeli 6.9.

Tabela 6.9. Przebieg badania korelacji współczynnikiem Spearmana dla budynków biurowych (O)

Lp.	Przekroczenie terminu (X_i)	Przekroczenie kosztu (Y_i)	Ranga $R(X_i)$	Ranga $R(Y_i)$	$(R(X_i) - R(Y_i))^2$
1	0,13	1,00	0,13	1,00	1,0
2	0,44	1,09	0,44	1,09	2,0
3	0,46	1,00	0,46	1,00	3,0
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
104	1,75	1,28	1,75	1,28	104,0
105	2,17	1,12	2,17	1,12	105,0
106	7,45	1,00	7,45	1,00	106,0
			Suma		193632,5

Współczynnik korelacji $R = 0,02445$

Kolejną grupą obiektów dla których przebieg analizy został przedstawiony w tabeli 6.10. są budynki hotelowe (H).

Tabela 6.10. Przebieg badania korelacji współczynnikiem Spearmana dla budynków hotelowych (H)

Lp.	Przekroczenie terminu (X_i)	Przekroczenie kosztu (Y_i)	Ranga $R(X_i)$	Ranga $R(Y_i)$	$(R(X_i) - R(Y_i))^2$
1	1,00	1,00	1,00	1,00	92,0
2	1,00	1,00	1,00	1,00	92,0
3	1,00	1,00	1,00	1,00	92,0
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
174	0,91	1,00	0,91	1,00	32,0
175	0,99	1,00	0,99	1,00	70,0
176	1,01	1,00	1,01	1,00	117,5
			Suma		289705,5

Współczynnik korelacji $R = 0,681152$

Badania korelacji dla grupy centrów handlowych (G) zaprezentowano poniżej w tabeli 6.11.:

Tabela 6.11. Przebieg badania korelacji współczynnikiem Spearmana dla centrów handlowych (G)

Lp.	Przekroczenie terminu (X_i)	Przekroczenie kosztu (Y_i)	Ranga $R(X_i)$	Ranga $R(Y_i)$	$(R(X_i) - R(Y_i))^2$
1	1,00	1,00	1,00	1,00	94,5
2	0,89	0,89	0,89	0,89	40,0
3	0,81	0,91	0,81	0,91	21,0
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
117	0,85	1,06	0,85	1,06	29,5
118	0,88	1,03	0,88	1,03	37,0
119	0,91	1,00	0,91	1,00	44,0
			Suma		260129,3

Współczynnik korelacji $R = 0,07375$

Dla ostatniej grupy obiektów – centrów logistycznych (L) – skrócony przebieg badania korelacji współczynnikiem Spearmana został przedstawiony w tabeli 6.12.:

Tabela 6.12. Przebieg badania korelacji współczynnikiem Spearmana dla centrów logistycznych (L)

Lp.	Przekroczenie terminu (X_i)	Przekroczenie kosztu (Y_i)	Ranga $R(X_i)$	Ranga $R(Y_i)$	$(R(X_i) - R(Y_i))^2$
1	1,00	1,00	1,00	1,00	92,0
2	1,00	1,00	1,00	1,00	92,0
3	1,00	1,00	1,00	1,00	92,0
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
53	0,97	1,00	0,97	1,00	13,5
54	0,99	1,00	0,99	1,00	18,0
55	1,00	1,00	1,00	1,00	28,5
			Suma		30136,0

Współczynnik korelacji $R = -0,08716$

W celu zbiorczego przedstawienia wyników uzyskanych w toku analiz wszystkie wartości współczynników zestawiono w poniższej tabeli (tab. 6.13.). Zaprezentowano wartości współczynników dla poszczególnych grup obiektów wraz z oceną istotności testu.

Tabela 6.13. Zbiorcze zestawienie wyników badania korelacji współczynnikiem Spearmana

Lp.	Grupa inwestycji	Wartość współczynnika korelacji	Interpretacja	Ocena istotności testu
M	Budynki mieszkalne	0,155692	Brak zależności monotonicznej	istotny
O	Budynki biurowe	0,024448	Brak zależności monotonicznej	nieistotny
H	Budynki hotelowe	0,795495	Silna współzależność	istotny
G	Centra handlowe	0,073746	Brak zależności monotonicznej	nieistotny
L	Centra logistyczne	- 0,08716	Brak zależności monotonicznej	nieistotny

6.3.3.3. Wnioski z badań korelacji współczynnikiem Spearmana

Na podstawie wyników analizy korelacji rang współczynnikiem Spearmana sformułowano poniższe wnioski:

- w wyniku przeprowadzonej analizy uzyskano wartość współczynnika Spearmana, które wykluczając występowanie współzależności pomiędzy przekroczeniem kosztu i przekroczeniem terminu w grupie budynków mieszkalnych (M);
- analiza korelacji pomiędzy przekroczeniem kosztu a przekroczeniem terminu w obszarze budynków biurowych (O) wykazała brak współzależności pomiędzy badanymi cechami;
- wartość współczynnika korelacji wynosząca około 0,79, uzyskana z wyniku analizy grupy budynków hotelowych (H) wskazała na silną współzależność pomiędzy przekroczeniem kosztu i przekroczeniem terminu. Porównanie z współczynnikiem Pearsona, który co prawda wykazał niewielką współzależność, potwierdza że w tej grupie występuje korelacja badanych cech;
- w grupie centrów handlowych (G) uzyskano niską wartość współczynnika korelacji co świadczy o braku powiązania pomiędzy przekroczeniem kosztu i przekroczeniem terminu w obszarze tego typu inwestycji;
- brak współzależności badanych cech wykazano również analizując dane uzyskane w grupie centrów logistycznych (L);

6.4. Podsumowanie analiz korelacji przekroczenia kosztu i przekroczenia terminu

6.4.1. Ogólne podsumowanie badania korelacji

Poszukiwanie współzależności pomiędzy przekroczeniem kosztu i przekroczeniem terminu w zróżnicowanych przedsięwzięciach budowlanych poprzez wielowariantową analizę korelacji wykazało dużą zbieżność wyników uzyskanych trzema wykorzystanymi narzędziami badawczymi. Zróżnicowane wartości współczynnika korelacji uzyskane współczynnikiem Pearsona i współczynnikiem Spearmana wynikają z różnego podejścia do analizowanych danych. W pierwszej metodzie zmierzono liniową zależność między zmiennymi. Jeżeli zależność między zmiennymi jest liniowa, współczynnik korelacji Pearsona dokładnie odzwierciedla siłę tej zależności. Drugą metodą zmierzono monotoniczną zależność między zmiennymi. Jeżeli zależność między zmiennymi jest monotoniczna (czyli wzrost jednej zmiennej zawsze powoduje wzrost lub spadek drugiej zmiennej, ale niekoniecznie w sposób liniowy), współczynnik korelacji Spearmana będzie odzwierciedlał siłę tej zależności.

Na różnicę w wynikach uzyskanych obu typów korelacji bezpośredni wpływ miały również analizowane dane dla których uzyskane wartości współczynnika korelacji Pearsona i Spearmana mogą się od siebie istotnie różnić. Takie wyniki uzyskano w przypadku budynków hotelowych (H). Ponieważ dane zawierają wartości odstające, współczynnik korelacji Pearsona może być znacząco zniekształcony przez te wartości, podczas gdy współczynnik Spearmana pozostanie bardziej stabilny. Tłumaczy to różnicę pomiędzy uzyskanymi w obu metodach wartościami współczynników korelacji. W grupach budynków mieszkalnych (M), budynków biurowych (O), centrach handlowych (G) i centrach logistycznych (L) wyznaczone wartości

współczynników oraz rozrzut wartości przekroczeń na korelogramach wskazują, że korelacja jest nieistotna, a to oznacza, że pomiędzy badanymi cechami współzależność nie występuje.

6.4.2. Podsumowanie badania korelacji w odniesieniu do tezy nr 1

Analiza korelacji pomiędzy przekroczeniem kosztu i przekroczeniem terminu przeprowadzona z wykorzystaniem metody Pearsona i metody Spearmana oraz wsparta obrazem graficznym w postaci korelogramów miała na celu wykazanie słuszności sformułowanej na wstępie tezy nr 1:

Przekroczenie kosztu i przekroczenie terminu realizacji przedsięwzięć budowlanych nie są cechami wzajemnie skorelowanymi.

Analiza korelacji jest pierwszym z zaplanowanych w niniejszej dysertacji badań cech, które zostały określone na wstępie współzależności przekroczeń kosztu i przekroczenia terminu. Wyniki uzyskane dla poszczególnych grup obiektów budowlanych zarówno w pierwszej jak i drugiej metodzie cechują niskie wartości współczynników korelacji zawierające się w przedziałach $(-0,102 \div 0,007)$ dla badania wskaźnika Pearsona i $(-0,09 \div 0,15)$ w przypadku analizy wskaźnika Spearmana. Zgodnie z założeniami obu metod mówiącymi, że jeżeli współczynnik korelacji jest mniejszy niż 0,2 współzależność pomiędzy badanymi cechami nie zachodzi, należy uznać brak występowania współzależności pomiędzy przekroczeniem kosztu i przekroczeniem terminu w grupie budynków mieszkalnych (M), budynkach biurowych (O), centrach handlowych (G) oraz centrach logistycznych (L). Wyjątkiem są jedynie budynki hotelowe, stanowiące około 20% ogólnej liczby obiektów w próbie badawczej, dla których wartość współczynnika korelacji Pearsona wyniosła 0,37 a wartość współczynnika Spearmana wyniosła 0,79, co świadczy o słabej (Pearson) lub istotnej (Spearman) współzależności. Przeprowadzona w niniejszym rozdziale analiza korelacji wyraźnie pokazała, że przekroczenia terminu w zestawieniu z przekroczeniami kosztu charakteryzują się nieregularną zmiennością wartości. W związku z powyższym należy stwierdzić, że korelacje cech przekroczenia kosztu i terminu nie wykazują istotnych związków liniowych ani monotonicznych.

Stwierdzenie to skłania autora do przeprowadzenia dalszych rozważań z użyciem innych metod wykorzystujących prawdopodobieństwo warunkowe (rozdział VII) oraz szacowanie kosztu i terminu przedsięwzięcia oparte na metodzie EVM (rozdział VIII), mających na celu szersze zbadanie związków pomiędzy badanymi cechami.

ROZDZIAŁ VII

Prawdopodobieństwa warunkowe przekroczenia kosztu i terminu

7.1. Wstęp do badania współzależności przekroczenia kosztu i terminu jako prawdopodobieństwa warunkowego

Przeprowadzone w poprzednim rozdziale badania współzależności pomiędzy przekroczeniem kosztu a przekroczeniem terminu w zróżnicowanych przedsięwzięciach budowlanych wykazały, że w grupie budynków mieszkalnych (M), budynkach biurowych (O), centrach handlowych (G) i centrach logistycznych (L) związek pomiędzy badanymi cechami nie występuje. Jedynie w przypadku budynków hotelowych (H) badanie korelacji wykazało istotną współzależność pomiędzy przekroczeniami. Jednak z uwagi na charakter rozrzutu przekroczenia kosztu uzyskany wynik może być niemiarodajny. Pomimo braku wyraźnego związku warto zbadać, czy wystąpienie przekroczenia jednego z nich wpłynie na wielkość drugiego. Intuicja podpowiada, że skoro oba parametry odpowiadają za przebieg przedsięwzięcia, to zapewne istnieje prawdopodobieństwo ich wspólnego oddziaływania na siebie. Takie stwierdzenie skłoniło autora do sformułowania następujących pytań:

- Jak jest prawdopodobieństwo przekroczenia kosztu pod warunkiem przekroczenia terminu realizacji przedsięwzięcia budowlanego?
- Jak jest prawdopodobieństwo przekroczenia terminu realizacji pod warunkiem przekroczenia kosztu realizacji przedsięwzięcia budowlanego?

Uzyskane wyniki skłaniają więc do szerszej analizy zależności obu parametrów z wykorzystaniem innych narzędzi.

W zawiązku z powyższym, w niniejszym rozdziale rozprawy doktorskiej autor próbował udowodnić zasadność tezy nr 2, której treść jest ściśle powiązana z badaniem współzależności pomiędzy przekroczeniem kosztu a przekroczeniem terminu w zróżnicowanych przedsięwzięciach budowlanych:

Prawdopodobieństwa warunkowe cech, określonych jako przekroczenie kosztu i terminu realizacji, nie są stale współzależne w czasie przebiegu przedsięwzięcia budowlanego.

Aby uzyskać odpowiedzi na postawione pytania oraz wykazać słuszność postawionej tezy wykorzystano narzędzie w postaci prawdopodobieństwa warunkowego, które zostanie szczegółowo omówione w dalszej części pracy (rozdział VIII, pkt. 8.3.). Za jego pomocą można również w specyficznych warunkach określić, czy pomiędzy badanymi parametrami występuje współzależność czy też nie.

7.2. Przegląd literatury związanej z analizą prawdopodobieństwa warunkowego

Prawdopodobieństwo warunkowe jest uniwersalnym narzędziem statystycznym o szerokim spektrum zastosowań. Może być z powodzeniem wykorzystywane w wielu gałęziach nauki i gospodarki oferując szeroki wachlarz możliwości od analizy danych badawczych po wsparcie procesów zarządzania. Z uwagi na swoją prostotę oraz możliwe do uzyskania korzyści, jest chętnie wykorzystywana tam, gdzie zachodzi potrzeba określenia relacji dwóch różnych parametrów. W zarządzaniu przedsięwzięciami budowlanymi takimi parametrami są koszt i czas. W przeszłości badacze z całego świata przeprowadzili szereg analiz obu tych parametrów w wieloaspektowym ujęciu. W swojej pracy wykorzystywali również prawdopodobieństwo warunkowe. Analizując zastosowanie prawdopodobieństwa warunkowego w zagadnieniach związanych z tematyką kosztu i czasu w zarządzaniu procesem budowlanym można wyróżnić cztery obszary tematyczne:

7.2.1. Korelacja kosztu z czasem

Przeanalizowane pozycje literatury podkreślają znaczenie uwzględnienia korelacji między harmonogramem przedsięwzięcia a kosztem, a także wpływu niepewności na oba te czynniki jednocześnie. Artykuł (Mawlana & Hammad, 2015) wskazuje na potrzebę uwzględniania współzależności między wskaźnikami wydajności w modelach symulacyjnych. Autorzy przedstawiają nową metodę, która pozwala na kwantyfikację wpływu niepewności na projekt, obliczanie warunkowego prawdopodobieństwa kosztu i harmonogramu, oraz generowanie reprezentatywnego harmonogramu. Wzrost ograniczeń dla przedsiębiorstw budowlanych w związku z kryzysem finansowym wymaga bardziej realistycznego i wydajnego podejścia do planowania i monitorowania projektów (Purnus & Bodea, 2014). Metoda Monte Carlo i analiza korelacji między parametrami czasu, kosztów i zasobów mogą poprawić podejmowanie decyzji. W celu zademonstrowania korzyści z proponowanego podejścia wykorzystano oprogramowanie Spider Project w którym przeanalizowano przykładowy projekt budowlany. Aby uwzględnić stochastyczną zależność między kosztami i czasem budowy został opracowany stochastyczny model rozkładu Natafa (Xiao i in., 2018). Testy dopasowania potwierdziły, że dane pasują do modelu, co pozwala na prognozowanie kosztów przy określonym czasie trwania i budżecie. Model ten pozwala na podjęcie decyzji z uwzględnieniem ryzyka oraz aktualizować prawdopodobieństwo na podstawie nowych informacji o projekcie.

Trudności związane z uwzględnianiem korelacji w szacowaniu probabilistycznym, w kontekście kosztów budowy zostały omówione w ramach propozycji nowej metodologii, pozwalającej uwzględnić efekt korelacji w procesie szacowania kosztów budowy (Touran, 1993). Zauważono, że obliczenie dokładnych wartości współczynników korelacji między zmiennymi losowymi jest trudne i często niemożliwe. Proponowana metodologia polega na przypisaniu subiektywnych miar korelacji między zmiennymi oraz dostosowaniu macierzy kowariancji, nawet jeśli szacunki korelacji są niedokładne.

7.2.2. Prawdopodobieństwo warunkowe z analizą ryzyka

Wykorzystanie probabilistycznych metod obliczeniowych, takich jak symulacje Monte Carlo, ma na celu określenie ilościowego wpływu niepewności na koszt i czas trwania przedsięwzięcia a także włączenie analizy ryzyka do procesów decyzyjnych. Obliczanie kosztów i czasu budowy jest ważnym zadaniem, ale wymaga aktualnych danych i obliczeń

(Kummer, 2017). Wykazano, że zastosowanie metod probabilistycznych, które pozwalają na uwzględnienie zmienności i niepewności w danych wejściowych, pozwala na zadowalające oszacowanie wskaźnika pracochłonności dla prac szalunkowych.

Zarządzanie kosztami w projekcie budowlanym jest trudne ze względu na brak znajomości dokładnych kosztów i ryzyka (Liu i in., 2024). W związku z tym zaproponowano nowatorski algorytm oparty na modelowaniu informacji o budynku (BIM), który pomaga ocenić i zidentyfikować główne przyczyny odchyleń kosztowych. Eksperymenty wykazały, że algorytm ten może być dostosowany do różnych projektów.

W celu przewidzenia kosztów projektów budowlanych zaproponowano model oparty na sieciach bayesowskich, który uwzględnia skomplikowane relacje między czynnikami wpływającymi na koszty (Xu & Liu, 2024). Wyniki analizy pokazują, że koszty cząstkowe i koszty całkowite uzyskane przez warunkowe prawdopodobieństwa sieci Bayesa są zasadniczo zgodne z kosztami budżetowymi pierwotnego planu. Model ten wykazał swoją praktyczną użyteczność, dokładność oraz pozwalał na zmniejszenie ryzyka pojawienia się niespodziewanych kosztów przedsięwzięcia.

Szacowanie kosztów w projektach budowlanych jest trudne ze względu na wpływ czynników ryzyka. Tradycyjne podejście do szacowania jest niewystarczające, dlatego zaproponowano nowy model analizy ryzyka kosztów (CCRAM), który uwzględnia korelację między kosztami i czynnikami ryzyka (Ökmen & Öztas, 2010). Porównanie modelu CCRAM z metodą symulacji Monte Carlo (MCS) przy użyciu tych samych danych hipotetycznych wykazało jego lepszą efektywność. Uzyskane wyniki pokazują, że CCRAM jest skutecznym narzędziem do prognozowania kosztów budowy.

7.2.3. Model sieciowy Bayesa

Propozycje modeli oceny ryzyka portfela projektów oparte na wykorzystaniu sieci bayesowskiej w celu oceny prawdopodobieństwa i oczekiwanych wartości opóźnień harmonogramu i przekroczeń kosztów w projektach budowlanych, wyraźnie kwantyfikują niepewność kosztów i czasu (Xu & Liu, 2024). Ponieważ projekty budowlane są narażone na straty i zagrożenia, dlatego zarządzanie ryzykiem ma kluczowe znaczenie w niwelowaniu problemów związanych z kosztami i terminami (Namazian & Yakhchali, 2018). W związku z tym, zaprezentowano model oceny ryzyka oparty na sieci bayesowskiej. Potwierdził on wystąpienie opóźnień w projektach rozwojowych na polu naftowym w Iranie spowodowanych niedoborem zasobów, działaniami i problemami finansowymi wykonawców.

W oparciu o teorię sieci bayesowskiej zaproponowano metodę analizy zarządzania ryzykiem budowlanym (Yu & Zi, 2018). Polega ona na identyfikacji głównych czynników wpływających na zarządzanie ryzykiem budowlanym i utworzeniu topologii sieci bayesowskiej ryzyka bezpieczeństwa. Następnie wykorzystuje się wnioskowanie bayesowskie, aby przewidzieć prawdopodobieństwo wystąpienia ryzyka związanego z bezpieczeństwem na budowie w różnych sytuacjach oraz analizuje przyczyny ryzyka poprzez wnioskowanie wstecz. Wyniki wskazują na 3,36% prawdopodobieństwo wystąpienia jego wystąpienia jako największego czynnika problemowego w budownictwie.

Do interesujących wniosków doprowadziły analizy kosztu i czasu prowadzone na danych pochodzących z kilku projektów autostradowych (Moghayedi & Windapo, 2021). Badanie wykazało, że tradycyjne metody szacowania kosztów i czasu nie uwzględniają

występowania korelacji między różnymi działaniami w projekcie. W celu dokładniejszego szacowania kosztów i czasu zastosowano model probabilistyczny. Wyniki badań pokazały, że zwiększenie korelacji między kosztami i terminami prowadzi do większego odchylenia standardowego całkowitego kosztu i czasu. Ponadto, im większa liczba skorelowanych kosztów i terminów, tym większe przekroczenia budżetu i czasu w projekcie. Badanie sugeruje, że należy uwzględnić korelacje w szacowaniach kosztów i czasu projektów autostradowych, aby uniknąć nadmiernego przekroczenia budżetu i czasu.

W celu zbadania związku między zarządzaniem czasem przedsięwzięcia budowlanego – CTM a czynnikami wpływającymi na jego koszt – CTF opracowano dynamiczny model sieci bayesowskiej – DBN (Nwadigo i in., 2021). Aby zademonstrować skuteczność modelu wykorzystano studium przypadku projektu poprawy stanu dróg. Badanie wykazało, że CTF mają wpływ na strategię CTM i mogą pomóc przywrócić wydajność czasową po zakłóceniach. Pomimo ograniczeń wynikających z konieczności posiadania danych z wielu projektów i procesu eksploracji danych w celu wygenerowania prawdopodobieństw warunkowych, model ten zapewnia metodę oceny relacji między CTM i CTF, co może poprawić praktykę zarządzania czasem przedsięwzięcia budowlanego.

7.2.4. Praktyczne zastosowanie metod probabilistycznych

Istotnym aspektem większości przywołanych powyżej publikacji dotyczących wykorzystania prawdopodobieństwa warunkowego w obszarze zarządzania procesem budowlanym było powiązanie badań z rzeczywistymi przedsięwzięciami (Purnus & Bodea, 2014), (Xiao i in., 2018), (Liu i in., 2024), (Xu & Liu, 2024), (Nwadigo i in., 2021). Współczesne projekty budowlane, charakteryzują się złożonością i różnorodnością czynników wpływających na ich przebieg (Plebankiewicz i in., 2016). Czynniki te mogą się ujawnić w dowolnym momencie oraz z różną intensywnością. Ich wystąpienie będzie miało wpływ na dwa podstawowe parametry zarządzania inwestycjami – koszt i czas (termin) (Czarnigowska, 2009), (Przywara & Rak, 2021b). W zarządzaniu budową pomocny jest szereg dostępnych narzędzi które umożliwiają monitorowanie bieżącego oraz prognozowanie przyszłego przebiegu robót (Przywara & Rak, 2021b), jednak nie uwzględnia charakterystyki innych, podobnych inwestycji. Taka wiedza pozwalałaby menadżerom projektu choćby na wcześniejszą korektę planów finansowych i harmonogramu w celu minimalizacji późniejszych przekroczeń kosztów lub terminów, albo jednych i drugich, na poszczególnych etapach prac.

Analiza prawdopodobieństwa warunkowego to narzędzie powszechnie stosowane w opracowywaniu i obróbce danych badawczych (Konior & Stachoń, 2021). Jest to narzędzie pozwalające na ocenę wpływu jednego z obserwowanych parametrów na drugi, a w określonych przypadkach umożliwia wykazanie współzależności pomiędzy nimi.

Zagadnienia związane z przekroczeniem kosztu i terminu oraz jego wpływem na przebieg inwestycji były poruszane między innymi w artykule (Konior & Szóstak, 2020a). Trudno jednak doszukać się opracowań w których do badań wykorzystano próbę badawczą uzyskaną w wyniku obserwacji prowadzonych na rzeczywistych przedsięwzięciach budowlanych według jednakowych kryteriów.

7.3. Badanie przekroczenie kosztu i terminu jako zdarzeń warunkowych

Podejmując temat przekroczenia kosztu i terminu w przedsięwzięciach budowlanych warto przyrzeć się relacjom pomiędzy nimi. Szczególnie interesujący z punktu widzenia osoby zarządzającej procesem budowlanym może być wpływ przekroczenia kosztu realizacji na termin jej zakończenia oraz na odwrót – jak wydłużenie terminu inwestycji wpłynie na przekroczenie planowanego kosztu.

Na każdym etapie realizacji inwestycji można określić czy przebiega ona zgodnie z zaplanowanym harmonogramem i w ramach założonych kosztów. Informują o tym wartości współczynników CPI (wskaźnik wykonania kosztu) oraz SPI (wskaźnik wykonania harmonogramu) uzyskane każdorazowo w trakcie pomiaru postępu realizacji robót budowlanych. Wnioski z ich obserwacji pozwalają na wytypowanie czterech możliwych przypadków, po dwa dla każdego współczynnika:

- (A1) – przypadek polegający na przekroczeniu kosztu
- (A2) – przypadek polegający na nieprzekroczeniu kosztu
- (B1) – przypadek polegający na przekroczeniu terminu
- (B2) – przypadek polegający na nieprzekroczeniu terminu

Ponieważ w każdym punkcie pomiarowym uzyskane zostaną informacje dotyczące zarówno przekroczenia kosztu jak i terminu, to można przyjąć, że z każdego takiego pomiaru uzyskana zostanie para przypadków:

$$\omega = (A_i, B_j), \quad i, j \in (1,2)$$

Można ją określić mianem zdarzenia elementarnego. Zbiór wszystkich możliwych zdarzeń elementarnych występujących w analizowanej próbie tworzy przestrzeń zdarzeń elementarnych Ω :

$$\Omega = \{\omega_k\}, \quad k \in (1,2,3,4)$$

W takim przypadku przestrzeń zdarzeń elementarnych zawiera cztery możliwe wyniki, reprezentujące wszystkie możliwe kombinacje przekroczenia / nieprzekroczenia kosztu inwestycji oraz przekroczenia / nieprzekroczenia terminu inwestycji. Tak sformułowane założenia pozwalają na zastosowanie w analizie narzędzi statystycznych a ściślej prawdopodobieństwa warunkowego.

Analiza dwóch zdarzeń losowych za pomocą prawdopodobieństwa warunkowego stanowi popularne narzędzie w dziedzinie statystyki i teorii prawdopodobieństwa. Pozwala ona między innymi na badanie wzajemnych zależności między zmiennymi oraz prognozowanie zachowań jednej zmiennej przy uwzględnieniu innej. W kontekście analizy dwóch zmiennych losowych, prawdopodobieństwo warunkowe pozwala odpowiedzieć na pytanie, jakie jest prawdopodobieństwo wystąpienia pewnego zdarzenia z jednej zmiennej, gdy już wystąpiło inne zdarzenie związane z drugą zmienną. Formalnie, prawdopodobieństwo warunkowe $P(A|B)$ definiowane jest jako prawdopodobieństwo zdarzenia A, pod warunkiem, że zdarzenie B już wystąpiło.

Ponieważ dotrzymanie terminów i kosztów inwestycji skutkuje jej planowym zakończeniem, w dalszej części pracy szerszej analizie zostały poddane zdarzenia w których

przekroczono koszt i termin (A1, B1). Ich zaistnienie jest sytuacją najbardziej niepożądaną i może wiązać się różnego rodzaju konsekwencjami zarówno dla inwestora jak i wykonawcy.

Dysponując szeroką bazą danych opisaną w rozdziale VI dla każdej inwestycji ustalono wartości przekroczeń w obszarze kosztu (CPI) i terminu (SPI) dla każdego miesiąca ich realizacji. Wartości mniejsze od „1” świadczą o przekroczeniach, natomiast większe od „1” informują o nieprzekroczeniu terminu i oszczędnościach w poniesionych kosztach. Współzależność przekroczenia kosztu i terminu jako cech zmiennych przekształcono do wartości wskaźnikowych w których wartość „0” oznacza przekroczenie cechy a „1” jej nieprzekroczenie.

Do analizy tak przygotowanego pakietu danych wykorzystano wybrane zagadnienia rachunku prawdopodobieństwa (Krysicki W. i in., 2004). Pierwszym etapem było określenie prawdopodobieństwa wystąpienia określonego typu zdarzeń:

$$P(A) = \frac{m}{n} \quad [7.1.]$$

Gdzie: m – liczba zdarzeń sprzyjających, n - liczba wszystkich zdarzeń

Kolejnym krokiem było ustalenie liczby przypadków w których doszło zarówno do przekroczenia terminu jak i kosztu. W tym celu obliczono iloczyn zdarzeń A1 i B1 ($A1 \cap B1$) oraz jego prawdopodobieństwo $P(A1 \cap B1)$.

Następnie oszacowano prawdopodobieństwo wystąpienia zdarzenia polegającego na przekroczeniu kosztu (A1) pod warunkiem, że przekroczony został termin (B1):

$$P(A|B) = \frac{P(A \cap B)}{P(B)} \quad [7.2.]$$

Przyjmuje się, że jest to prawdopodobieństwo wystąpienia A1 liczone w sytuacji pewności wystąpienia zdarzenia B1.

W ostatnim etapie, wykorzystując regułę Bayesa, obliczono prawdopodobieństwo przekroczenia terminu B1 pod warunkiem, że przekroczony został koszt A1:

$$P(B|A) = \frac{P(A|B) \cdot P(B)}{P(A)} \quad [7.3.]$$

W obliczeniach wykorzystuje się $P(B)$ będące prawdopodobieństwem hipotetycznego zdarzenia B1 oraz $P(A)$ będące prawdopodobieństwem całkowitym zdarzenia A1.

Szczegółowe określenie ilości poszczególnych zdarzeń i odpowiadające im prawdopodobieństwa jest uzależnione od kierunku analizy i zostanie omówione szczegółowo w dalszej części pracy.

7.3.1. Prawdopodobieństwo przekroczenia kosztu pod warunkiem przekroczenia terminu

Korzystając z definicji prawdopodobieństwa warunkowego zagadnienie przekroczeń zbadano dwuetapowo. W pierwszej kolejności, dla każdej inwestycji ustalono z jakim prawdopodobieństwem zostanie przekroczony jej koszt pod warunkiem, że nastąpi przekroczenie terminu. W drugim etapie wyliczono przedmiotowe prawdopodobieństwa w interwałach wynoszących 1/10 okresu realizacji. Przyjmując wcześniejsze założenia określono

prawdopodobieństwa wystąpienia przekroczenia kosztu $P(A1)$ i terminu $P(B1)$ w oparciu o dane uzyskane z każdego miesięcznego raportu. Następnie ustalono liczbę zdarzeń, w których przekroczeniu uległ zarówno koszt jak i termin ($A1 \cap B1$) oraz wyznaczono prawdopodobieństwo ich wystąpienia. Kolejnym krokiem było obliczenie poszukiwanego prawdopodobieństwa warunkowego $P(A1|B1)$.

Z uwagi na zróżnicowaną długość poszczególnych inwestycji, wyniki analiz przedstawiono na wykresach zestawiając zmienność prawdopodobieństwa z długością trwania inwestycji. Wartości uzyskane w drodze obliczeń przedstawiono w tabeli 7.1

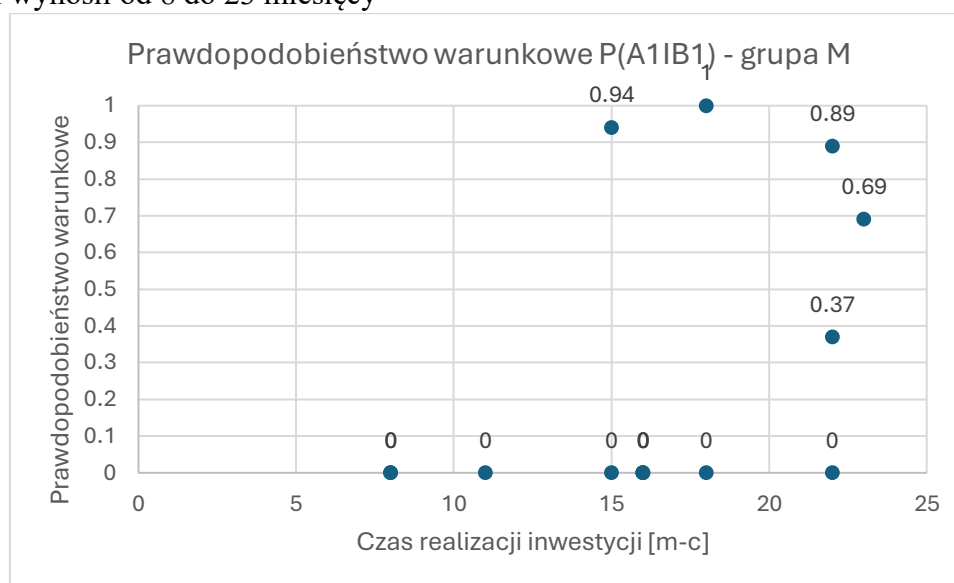
Tabela 7.1. Szczegółowe wartości danych do wyznaczenia prawdopodobieństw warunkowych przekroczenia kosztu przedsięwzięcia pod warunkiem przekroczenia jego terminu.

Nr	Symbol	Liczba pomiarów	Liczba przekroczeń CPI	Liczba przekroczeń SPI	P(A1)	P(B1)	Liczba przekroczeń A1 i B1	P(A1∩B1)	P(A1 B1)
1	M.1	16	0	7	0	0,44	0	0	0
2	M.2	16	9	0	0,56	0	0	0	0
3	M.3	16	0	7	0	0,44	0	0	0
4	M.4	8	0	5	0	0,63	0	0	0
5	M.5	8	0	1	0	0,13	0	0	0
6	M.6	15	0	11	0	0,73	0	0	0
7	M.7	15	14	14	0,93	0,93	13	0,87	0,94
8	M.8	11	0	12	0	1,09	0	0	0
9	M.9	22	8	19	0,36	0,86	7	0,32	0,37
10	M.10	17	0	14	0	0,78	0	0	0
11	M.11	23	16	3	0,7	0,13	2	0,09	0,69
12	M.12	22	17	18	0,77	0,82	16	0,73	0,89
13	M.13	22	0	16	0	0,73	0	0	0
14	M.14	18	14	7	0,78	0,39	7	0,39	1
15	O.1	30	0	18	0	0,6	0	0	0
16	O.2	27	8	22	0,3	0,81	8	0,3	0,37
17	O.3	23	0	15	0	0,65	0	0	0
18	O.4	41	19	29	0,46	0,71	19	0,46	0,65
19	H.1	34	22	16	0,65	0,47	14	0,41	0,87
20	H.2	6	1	4	0,17	0,67	0	0	0
21	H.3	17	9	10	0,53	0,59	8	0,47	0,8
22	H.4	16	8	8	0,5	0,5	7	0,44	0,88
23	H.5	15	10	6	0,67	0,4	5	0,33	0,83
24	H.6	18	13	14	0,72	0,78	13	0,72	0,92
25	H.7	19	7	7	0,37	0,37	7	0,37	1
26	H.8	24	15	8	0,63	0,33	8	0,33	1
27	H.9	27	11	14	0,41	0,52	11	0,41	0,79
28	G.1	15	10	11	0,67	0,73	7	0,47	0,64
29	G.2	13	0	8	0	0,62	0	0	0
30	G.3	11	7	3	0,64	0,27	3	0,27	1
31	G.4	24	1	23	0,04	0,96	1	0,04	0,04
32	G.5	17	3	14	0,18	0,82	2	0,12	0,15
33	G.6	6	0	3	0	0,5	0	0	0
34	G.7	16	0	9	0	0,56	0	0	0
35	G.8	19	8	19	0,42	1	8	0,42	0,42
36	L.1	8	4	4	0,5	0,5	0	0	0
37	L.2	8	8	3	1	0,38	3	0,38	1
38	L.3	9	0	3	0	0,33	0	0	0
39	L.4	10	0	5	0	0,5	0	0	0
40	L.5	9	0	3	0	0,33	0	0	0
41	L.6	11	0	6	0	0,55	0	0	0

7.3.1.1. Prawdopodobieństwo przekroczenia kosztu pod warunkiem przekroczenia terminu różnorodnych przedsięwzięć budowlanych

Prezentowane w formie punktów wyniki analiz przedstawiają prawdopodobieństwa warunkowe przekroczenia kosztu pod warunkiem przekroczenia terminu dla poszczególnych inwestycji, względem czasu jej realizacji w odniesieniu miesięcznym. Zostały one policzone w oparciu o dane dotyczące przekroczeń obu parametrów uzyskane z comiesięcznych raportów opracowanych w ramach BIN. Zmienna skala osi poziomej wynika z różnej długości trwania inwestycji w poszczególnych grupach obiektów.

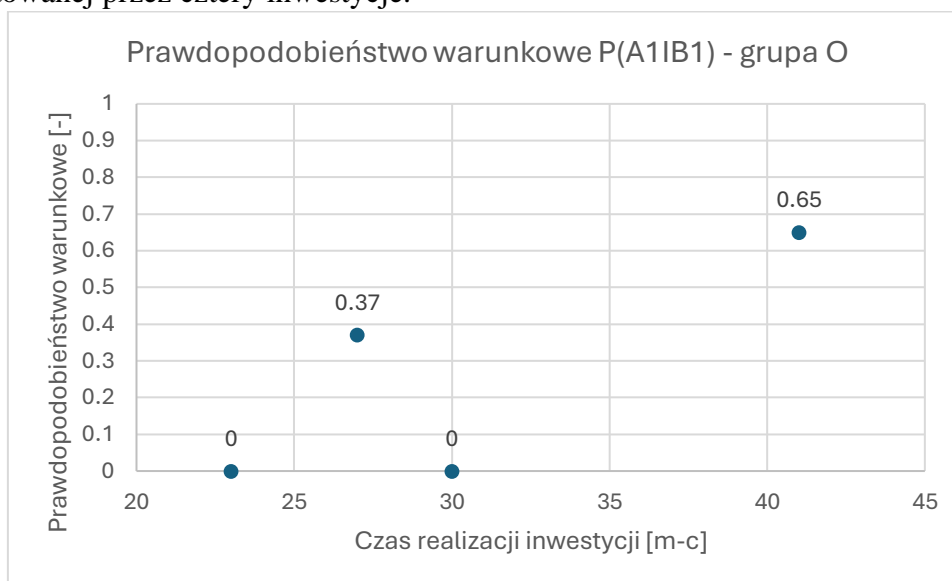
W grupie budynków mieszkalnych (M) sklasyfikowano 14 obiektów których czas realizacji wynosił od 8 do 23 miesięcy



Rysunek 7.1. Prawdopodobieństwa przekroczenia kosztu pod warunkiem przekroczenia terminu w czasie realizacji budynków mieszkaniowych (M).

Na wykresie zaobserwowano duże rozbieżności prawdopodobieństwa przekroczenia kosztu pod warunkiem, że przekroczy się termin. W pięciu przedsięwzięciach prawdopodobieństwo przekracza 0,37 a w pozostałych wynosi 0,00. Czas realizacji nie odgrywa tu znaczącej roli, ponieważ w niektórych przypadkach, pomimo zbliżonego czasu trwania, szansa na przekroczenie była bliska zeru, a w innych graniczyła niemal z pewnością, że przekroczenia wystąpią.

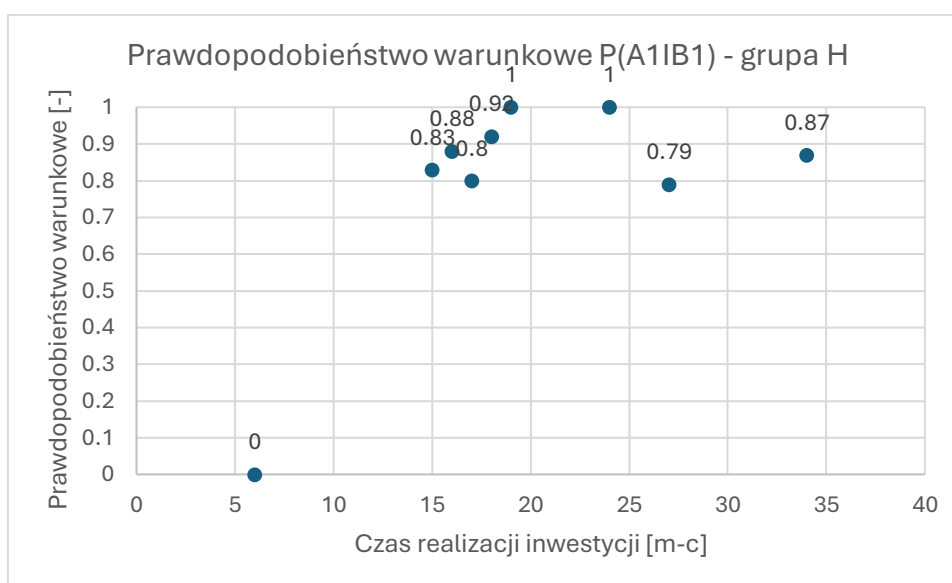
Nieco inaczej sytuacja wygląda w przypadku grupy inwestycji biurowych (O), reprezentowanej przez cztery inwestycje.



Rysunek 7.2. Prawdopodobieństwa przekroczenia kosztu pod warunkiem przekroczenia terminu w czasie realizacji budynków biurowych (O).

W połowie wszystkich kontrolowanych obiektów w tej grupie, przy zróżnicowanej długości inwestycji prawdopodobieństwo przekroczenia kosztu pod warunkiem przekroczenia terminu wyniosło „0”. W dwóch przypadkach uzyskało wyższe wartości, które wskazywały, że im dłuższe przedsięwzięcie, tym prawdopodobieństwo przekroczenia kosztu pod warunkiem przekroczenia terminu wzrastało. Pomimo, iż analizy dla tej grupy przeprowadzono jedynie dla czterech inwestycji, to ich wyniki opierają się na informacjach uzyskanych aż ze 121 raportów. Można zatem uznać wyniki za wiążące.

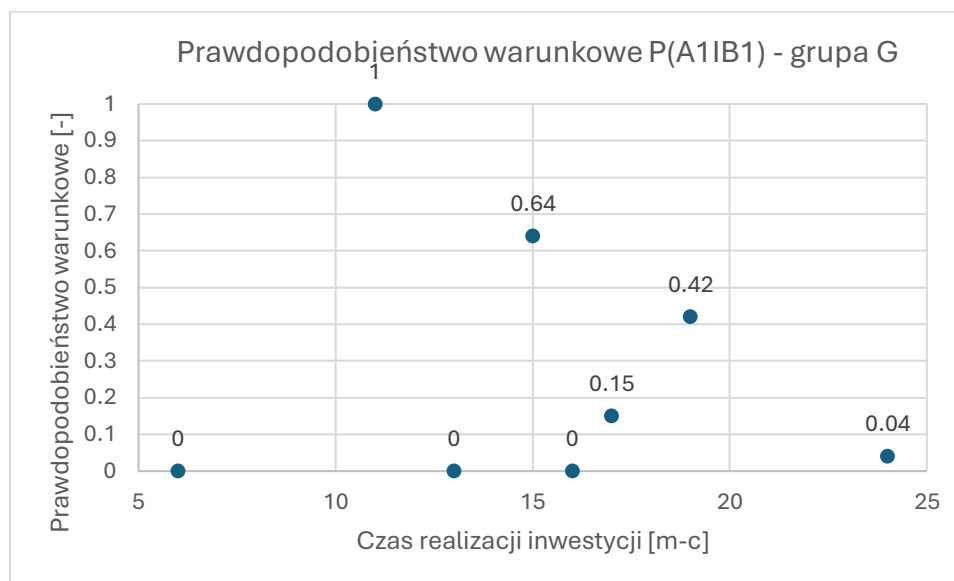
W grupie budynków hotelowych (H) prawdopodobieństwo przekroczenia kosztu pod warunkiem przekroczenia terminu dla około 90% przedsięwzięć uzyskało wartość większą niż 0,8.



Rysunek 7.3. Prawdopodobieństwa przekroczenia kosztu pod warunkiem przekroczenia terminu w czasie realizacji budynków hotelowych (H).

Trend ten zaobserwowano dla inwestycji których czas realizacji przekraczał 15 miesięcy. Inwestycje hotelowe charakteryzują się bardzo dużą różnorodnością – od małych obiektów o przeciętnym standardzie do dużych, ekskluzywnych ośrodków. Ich realizacja może zatem wymagać zupełnie innych terminów realizacji na wykonanie wszystkich robót. Prezentowane wyniki analiz (rys. 7.3) wskazują, że prawdopodobieństwo przekroczenia kosztu pod warunkiem przekroczenia terminu dla przedsięwzięć trwających dłużej niż 15 miesięcy będzie dość wysokie.

Analiza prawdopodobieństwa dla poszczególnych inwestycji w grupie centrów handlowych (G) wykazuje duże zróżnicowanie.

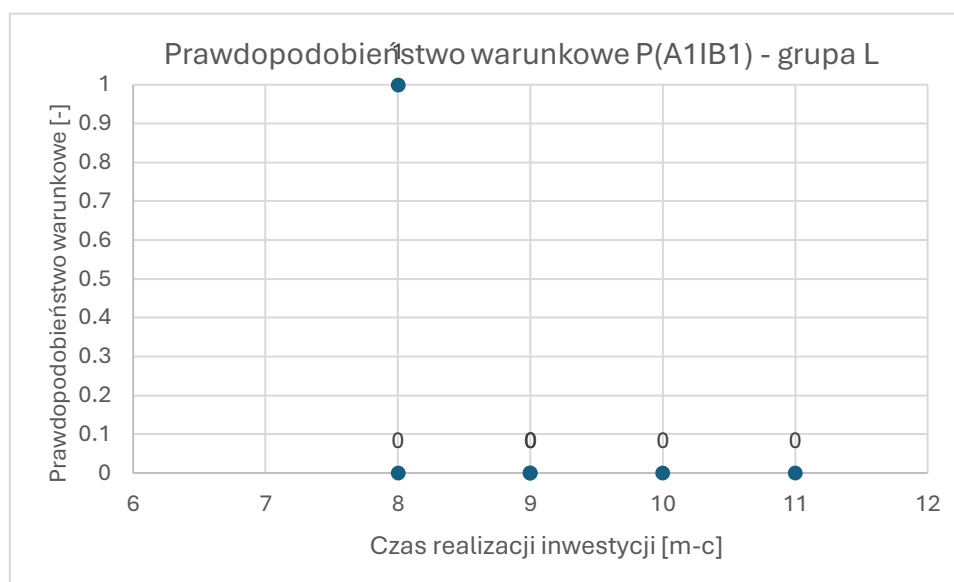


Rysunek 7.4. Prawdopodobieństwa przekroczenia kosztu pod warunkiem przekroczenia terminu w czasie realizacji centrów handlowych (G).

Z wyjątkiem jednej inwestycji prawdopodobieństwo przekroczenia kosztu pod warunkiem, że zostanie przekroczony termin uzyskuje wartości z przedziału około 0,00 – 0,64. Podobnie jak we wcześniej analizowanych grupach, nie obserwuje się zależności prawdopodobieństwa warunkowego względem czasu realizacji tego rodzaju przedsięwzięć budowlanych.

Na podstawie wykresu (rys. 7.4.) można wnioskować, że w tej grupie obiektów w około 87% inwestycji prawdopodobieństwo przekroczenia kosztu pod warunkiem że przekroczony zostanie termin nie przekroczy 65%.

Ostatnia analizowana grupa inwestycji to centra logistyczne (L). Charakteryzują się zazwyczaj prostą konstrukcją i wymagają zbliżonego nakładu pracy na ich realizację. Odzwierciedleniem tego są uzyskane w toku analizy wartości prawdopodobieństwa, które niemal w każdym przypadku wynoszą 0,00.



Rysunek 7.5. Prawdopodobieństwa przekroczenia kosztu pod warunkiem przekroczenia terminu w czasie realizacji centrów logistycznych (L).

Pomimo niewielkiej próby badawczej (6 obiektów), przy tak jednoznacznych wynikach obliczeń uzyskanych z 55 raportów BIN, można wnioskować, że jest niemal pewne, iż utrzymanie terminu realizacji utrzyma koszt inwestycji w planowanym budżecie, bez względu na czas jej trwania.

7.3.1.2. Wnioski z badania prawdopodobieństwa przekroczenia kosztu pod warunkiem przekroczenia terminu

W wyniku przeprowadzonych badań zaobserwowano szereg spostrzeżeń wynikających z analizy przekroczenia kosztu pod warunkiem przekroczenia terminu realizacji różnorodnych grup inwestycji:

- zaobserwowano dużą zmienność wartości prawdopodobieństwa warunkowego uzyskanych w grupach budynków mieszkaniowych oraz centrów handlowych;
- w grupie budynków hotelowych stwierdzono wysokie prawdopodobieństwo przekroczenia kosztu pod warunkiem przekroczenia terminu w niemal wszystkich analizowanych przedsięwzięciach;
- pojawiające się w niektórych przypadkach zerowe wartości prawdopodobieństwa warunkowego świadczą jedynie o braku występowania przekroczeń obu parametrów jednocześnie. Jednak częstym przypadkiem jest sytuacja w której przekroczony jest tylko jeden z nich;

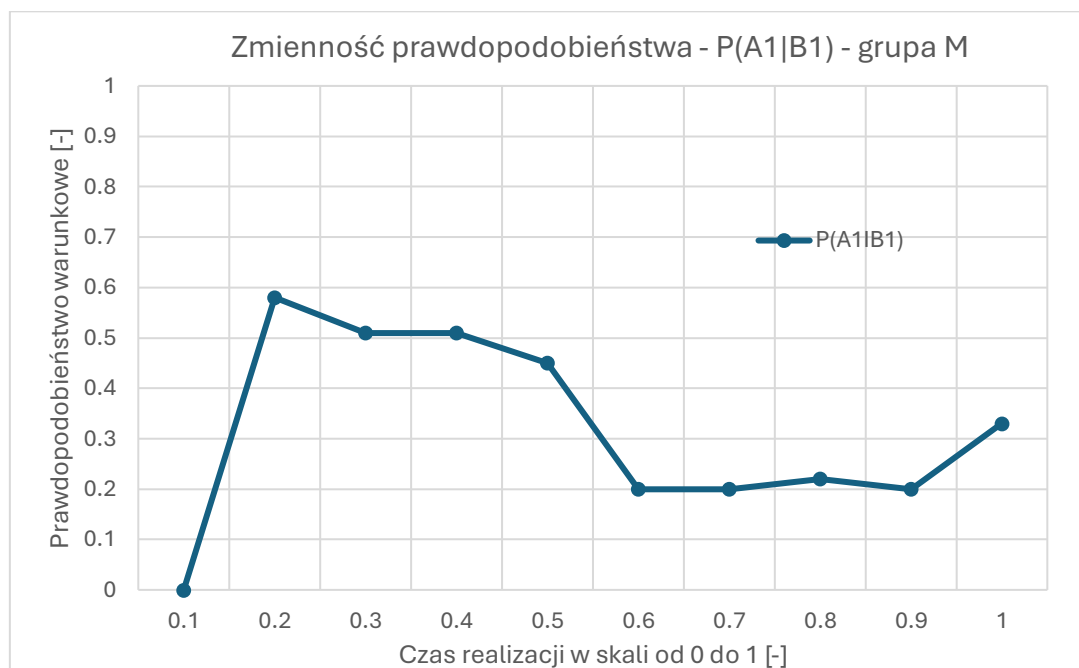
- we wszystkich grupach, dla około 70% przypadków, wartości prawdopodobieństwa przekraczają 0,70. Około 30% uzyskanych wartości prawdopodobieństwa warunkowego nie przekracza 0,70, co pozwala stwierdzić, że prawdopodobieństwo przekroczenia kosztu pod warunkiem niedotrzymania terminu jest dość wysokie;
- opóźnienia w realizacji robót budowlanych mają zatem istotny wpływ na wzrost kosztów.

7.3.1.3. Zmienność prawdopodobieństwa przekroczenia kosztu pod warunkiem przekroczenia terminu w skali czasu realizacji 0 – 1

Każda inwestycja charakteryzuje się indywidualnym czasem realizacji oraz ograniczonymi nakładami finansowymi. Przyglądając się próbie badawczej można stwierdzić, że zawiera ona przedsięwzięcia trwające od kilku do nawet kilkudziesięciu miesięcy. Analizowanie danych w wybranym miesiącu, nawet w przypadku inwestycji tego samego typu, może być obciążone dużym błędem ponieważ mogą one znajdować się na różnym etapie zaawansowania. W związku z tym dla każdego przedsięwzięcia wyznaczono współczynniki CPI i SPI w interwałach co 1/10 długości przebiegu inwestycji redukując czas do skali 0 – 1. Tak pogrupowane dane pozwalają na obserwację przekroczeń dla zbliżonego etapu zaawansowania prac budowlanych bez względu na czas trwania przedsięwzięcia budowlanego.

Analiza prawdopodobieństwa warunkowego zdarzeń polegających na przekroczeniu kosztu pod warunkiem przekroczenia terminu prowadzona była z podziałem na typ obiektów, wykorzystując dane uzyskane w określonych punktach czasu realizacji.

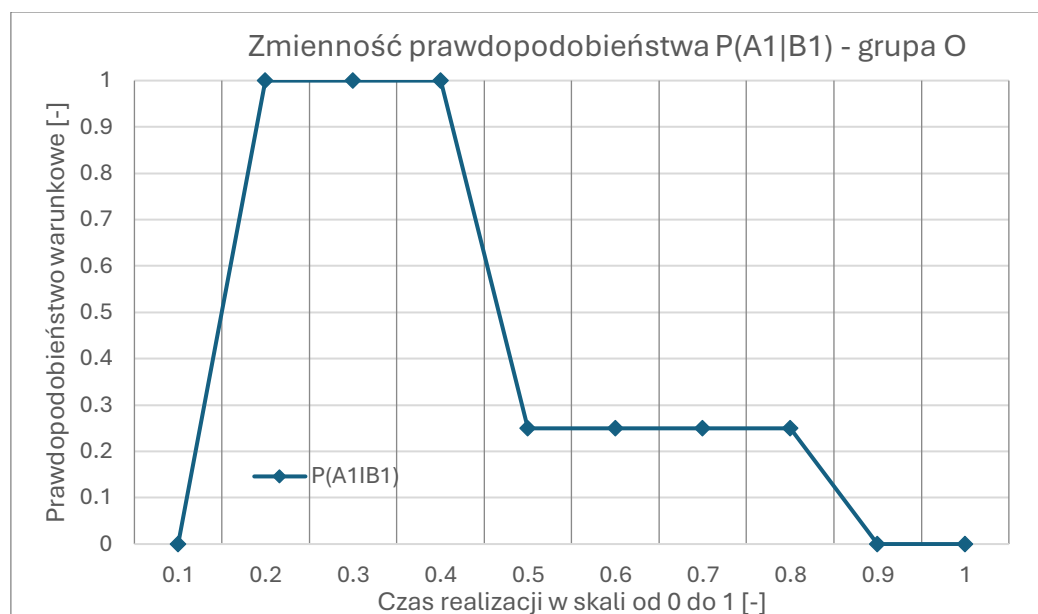
Analizując prawdopodobieństwa uzyskane dla grupy budynków mieszkalnych (M) widoczny jest wzrost w drugim przedziale do poziomu 0,58. Następnie obserwuje się powolny spadek do 0,6 przedziału do wartości 0,20 (rys. 7.6.). Pomiędzy przedziałem 0,60 a 0,99 następuje stabilizacja wartości prawdopodobieństwa w okolicy 0,20.



Rysunek 7.6. Zmienność prawdopodobieństwa przekroczenia kosztu pod warunkiem przekroczenia czasu w grupie budynków mieszkalnych (M) w skali czasu realizacji 0 – 1.

Następnie, do końca trwania przedsięwzięcia badane prawdopodobieństwo wzrasta do 0,33. Taka zmienność prawdopodobieństwa wynika z faktu pojawiania się opóźnień w początkowej fazie inwestycji, a następnie ich powolnego spadku do około 60% zaawansowania. Stabilizacja w przedziale 0,60 – 0,90 postępu na poziomie 20% związana jest z wejściem budowy w kolejny etap, który nie generuje przekroczeń, a nawet pozwala na niewielkie odrobienie przekroczeń powstałych wcześniej. Od 90% zaawansowania ponownie pojawia się tendencja wzrostowa prawdopodobieństwa przekroczeń związana z ostatnim etapem robót.

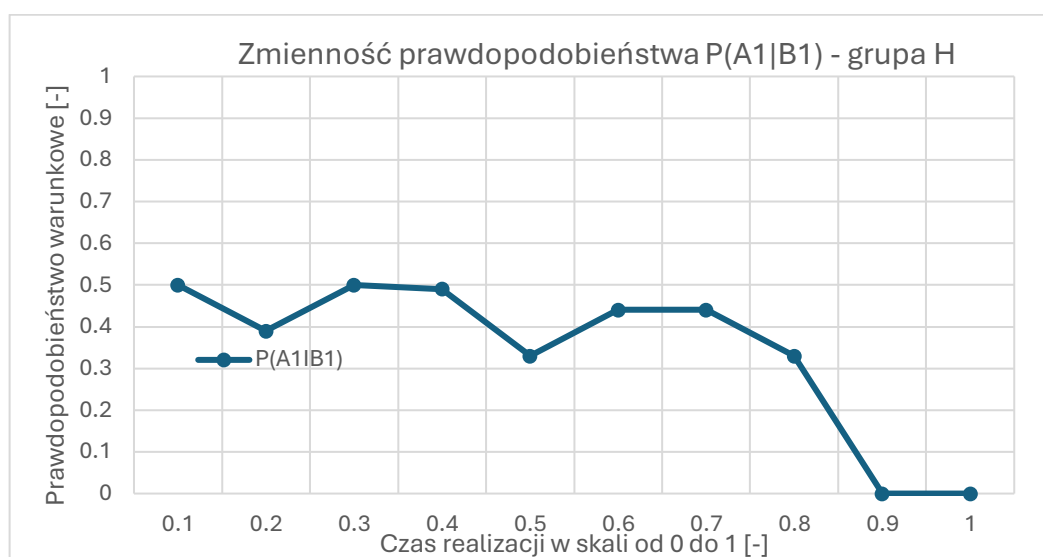
W grupie budynków biurowych (O) stwierdzono wysokie prawdopodobieństwo przekroczenia kosztu pod warunkiem, że przekroczony zostanie termin w przedziale 20 – 40% zaawansowania robót. W późniejszym okresie uległo ono stabilizacji na poziomie 0,25 do około 80% czasu realizacji, uzyskując wartość 0,00 na końcu.



Rysunek 7.7. Prawdopodobieństwa przekroczenia kosztu pod warunkiem przekroczenia czasu w grupie budynków biurowych (O) w skali czasu realizacji 0 – 1.

Taki przebieg zmienności wskazywał na zróżnicowane występowanie jednoczesnego przekroczenia zarówno kosztu jak i terminu osiągając wysokie wartości w początkowej fazie realizacji, które następnie ulegały znaczącemu zmniejszeniu na końcu.

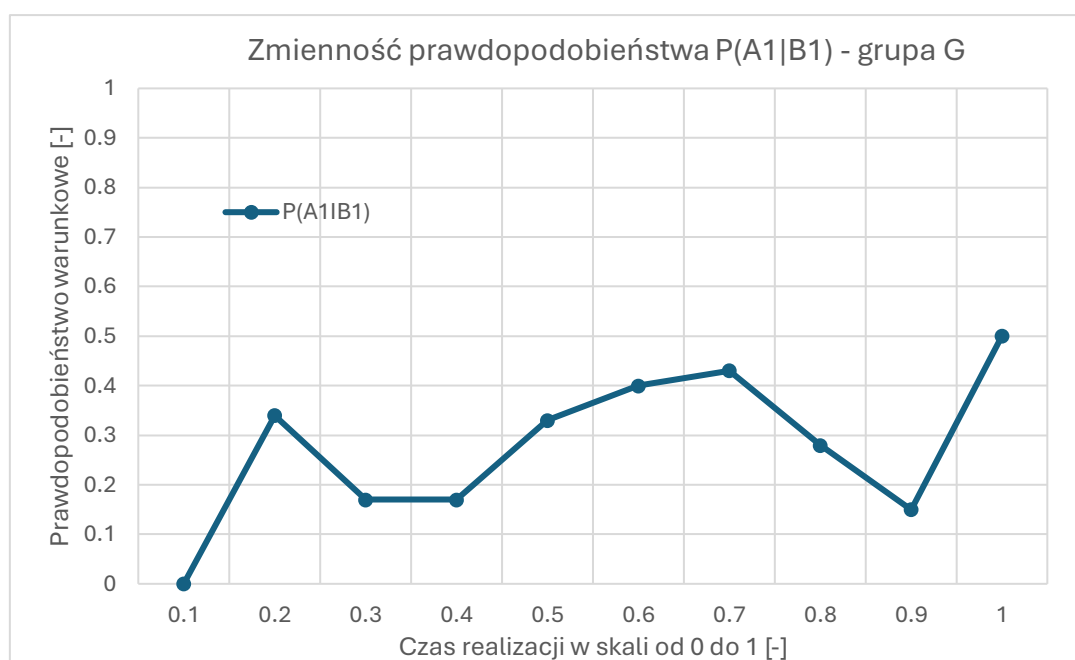
Odmierna sytuacja wystąpiła w grupie budynków hotelowych (H) (rys. 7.8.).



Rysunek 7.8. Zmienność prawdopodobieństwa przekroczenia kosztu pod warunkiem przekroczenia czasu w grupie budynków hotelowych (H) w skali czasu realizacji 0 – 1.

Od samego początku inwestycji prawdopodobieństwo przekroczenia kosztu pod warunkiem przekroczenia terminu osiągała wartość 0,50. Następnie wahało się w przedziale około 0,30 – 0,50 do 80% zaawansowania. W ostatnim etapie zaobserwowano tendencję spadkową do wartości 0,00 w 9/10 zaawansowania inwestycji, utrzymującą się na tym poziomie aż do końca. Jest to kolejna grupa w której w końcowej fazie przedsięwzięcia prawdopodobieństwo przekroczenia kosztu pod warunkiem przekroczenia terminu nie występuje.

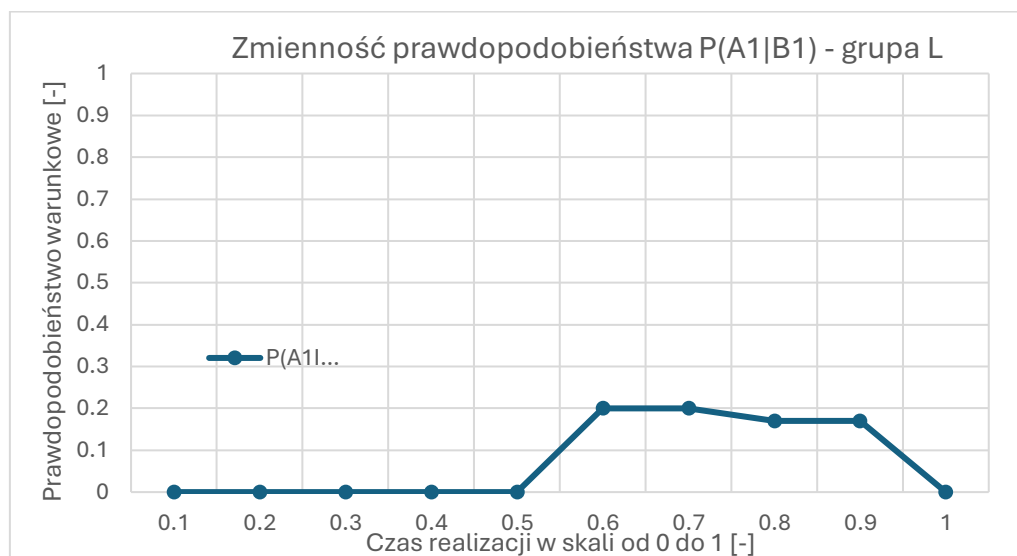
W grupie centrów handlowych (G) prawdopodobieństwo przekroczenia kosztu pod warunkiem przekroczenia terminu przebiega skokowo i w przeważającym okresie zawiera się w przedziale około 0,15 – 0,4. (rys. 7.9.).



Rysunek 7.9. Prawdopodobieństwo przekroczenia kosztu pod warunkiem przekroczenia czasu w grupie centrów handlowych (G) w skali czasu realizacji 0 – 1.

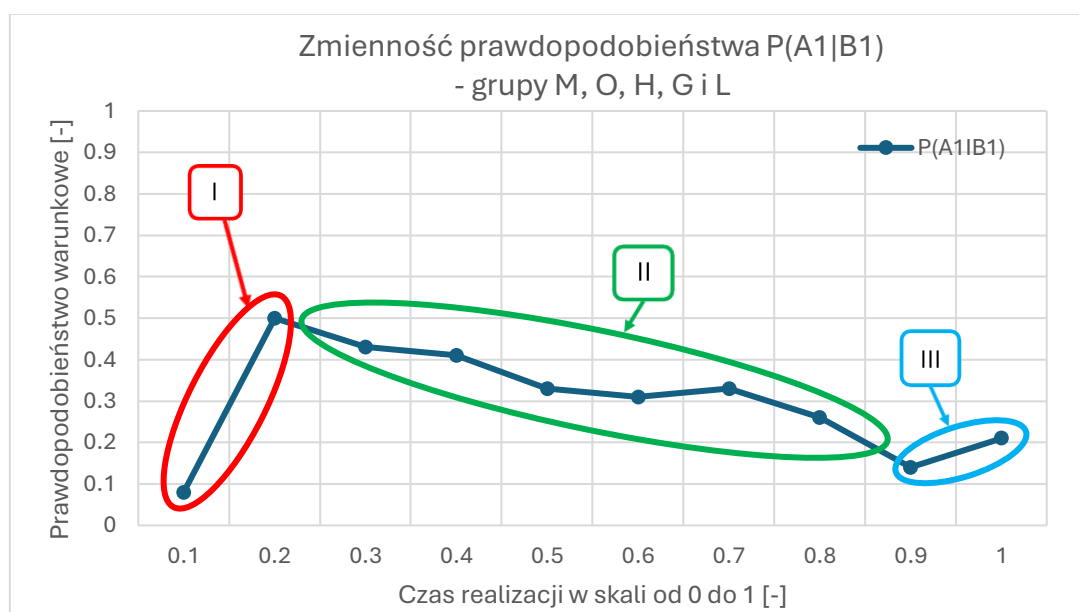
Podobnie jak w przypadku wcześniej omawianych grup inwestycji obserwuje się w przyrost prawdopodobieństwa w pierwszym przedziale zaawansowania robót. W ostatnim przedziale czasowym (0,90 – 1,00) obserwuje się znaczący przyrost z poziomu 0,15 do wartości 0,50.

W ostatniej badanej grupie obiektów – centrach logistycznych (L) – prawdopodobieństwo przekroczenia kosztu pod warunkiem przekroczenia terminu w pierwszej połowie inwestycji nie występuje, osiągając wartość 0,00 (rys. 7.10.). Następnie wzrasta do wartości 0,20 i utrzymuje się na tym poziomie do 90% zaawansowania. W ostatnim przedziale czasu ponownie redukuje się do wartości 0,00.



Rysunek 7.10. Prawdopodobieństwo przekroczenia kosztu pod warunkiem przekroczenia czasu w grupie centrów logistycznych (L) w skali czasu realizacji 0 – 1.

W celach porównawczych przeprowadzono analizę zmienności prawdopodobieństwa dla całej próby badawczej, bez podziału na grupy. Wyniki analizy zaprezentowano w formie wykresu zmienności prawdopodobieństwa względem postępu inwestycji (rys. 7.11.).



Rysunek 7.11. Prawdopodobieństwo przekroczenia kosztu pod warunkiem przekroczenia terminu $P(A1|B1)$ dla całej próby badawczej składającej się z grup obiektów M, O, H, G i L.

Uzyskane wartości prawdopodobieństwa wahały się w przedziale 0,00 – 0,55. W około 20% do 90% zaawansowania przebiegu inwestycji obserwowano tendencję spadkową wartości prawdopodobieństwa do poziomu 0,14. W ostatnich 10% czasu realizacji zarysowała się tendencja wzrostowa do około 0,20. Wyróżniono również trzy charakterystyczne obszary zmienności prawdopodobieństwa, które z istotnym podobieństwem można wyróżnić w niemal każdej badanej grupie analizowanych przedsięwzięć.

7.3.1.4. Wnioski z badania zmienności prawdopodobieństwa przekroczenia kosztu pod warunkiem przekroczenia terminu w skali czasu realizacji 0 – 1

Przeprowadzone powyżej analizy prawdopodobieństwa warunkowego przekroczenia kosztu pod warunkiem, że zostanie przekroczony termin pozwoliły na sformułowanie następujących wniosków:

- nie zaobserwowano znaczącego wpływu długości trwania inwestycji na wartość prawdopodobieństwa przekroczenia kosztu pod warunkiem przekroczenia terminu;
- obserwując zmienność prawdopodobieństwa przekroczenia kosztu pod warunkiem przekroczenia terminu, odniesioną do przebiegu inwestycji w podziale na 10 okresów cząstkowych dla przedsięwzięć pogrupowanych pod względem typu obiektu obserwuje się zróżnicowanie wartości w poszczególnych okresach ich przebiegu;
- w przypadku niemal wszystkich typów obiektów wartość prawdopodobieństwa w początkowym okresie („I” – rys. 7.11.) (do 20 % zaawansowania) wykazuje wzrost do pewnej wartości, a następnie regularny spadek;
- wyjątkiem jest grupa centrów logistycznych (L) w których prawdopodobieństwo warunkowe przekroczenia kosztu pod warunkiem przekroczenia terminu jest równe 0 do około 50% zaawansowania;
- środkowa faza („II” – rys. 7.11.) inwestycji charakteryzowała się spadkiem wartości badanego prawdopodobieństwa do około 90% zaawansowania. Wyjątkiem była grupa centrów handlowych (H), gdzie po spadku do wartości 0,17 przy 30% zaawansowania nastąpił regularny wzrost do wartości 0,43 przy 70% zaawansowania robót;
- grupa budynków biurowych (O) wyróżniała się na tle pozostałych z uwagi na uzyskane wartości prawdopodobieństwa warunkowego, które były istotnie wyższe niż w pozostałych grupach. Jednak ich przebieg wpisuje się w poszczególne fazy wydzielone na wykresie zbiorczym;
- w ostatniej fazie realizacji („III” – rys. 7.11.), przebieg wartości prawdopodobieństwa w zależności od grupy przyjmuje różne charakterystyki – w dwóch grupach obserwuje się wzrost prawdopodobieństwa, w jednej spadek, a w kolejnych dwóch stabilizację na poziomie wartości 0;
- w ostatnim przedziale zaawansowania zbiorczy trend nie jest tożsamy z niektórymi grupami przedsięwzięć. Jest to spowodowane specyfiką inwestycji, w których w tym okresie następuje wzrost prawdopodobieństwa, oraz ich ilością w całej próbie badawczej;
- z uwagi na zróżnicowany charakter analizowanych grup przedsięwzięć w takim porównaniu bardziej istotny jest trend przebiegu zmienności prawdopodobieństw niż ich

wartości, gdyż pokazuje analogie w przebiegu procesu inwestycyjnego na poszczególnych etapach pomimo różnic występujących między poszczególnymi grupami.

7.3.2. Podsumowanie badania prawdopodobieństwa przekroczenia kosztu pod warunkiem przekroczenia terminu w zróżnicowanych przedsięwzięciach budowlanych

Wykorzystanie prawdopodobieństwa warunkowego jako narzędzia do opisu relacji pomiędzy dwiema zmiennymi pozwoliło na wykreowanie obrazu rozkładu prawdopodobieństwa badanych parametrów jakimi są przekroczenie kosztu i przekroczenie terminu na dwóch płaszczyznach. Pierwszą płaszczyzną jest obserwacja zależności prawdopodobieństwa przekroczenia kosztu pod warunkiem przekroczenia terminu od długości czasu realizacji poszczególnych przedsięwzięć. Drugą płaszczyzną jest przebieg zmienności prawdopodobieństwa przekroczenia kosztu pod warunkiem przekroczenia terminu w stałych przedziałach czasu realizacji inwestycji.

Zaprezentowane we wcześniejszych punktach wyniki analiz mają na celu uzyskanie odpowiedzi na jedno z postawionych we wstępie pytań:

Jakie jest prawdopodobieństwo przekroczenia kosztu pod warunkiem przekroczenia terminu realizacji przedsięwzięcia budowlanego?

Ujęte w punkcie 3.1.2.1. wnioski z badań pozwalają na sformułowanie kilku spostrzeżeń, mających powiązanie z postawionym na wstępie pytaniem:

- obserwuje się pewien trend w przebiegu rozkładu prawdopodobieństwa warunkowego przekroczenia kosztu pod warunkiem przekroczenia terminu w niemal wszystkich analizowanych grupach inwestycji. Wyjątkiem jest tylko grupa budynków biurowych (O);
- rosnące prawdopodobieństwo przekroczenia kosztu pod warunkiem przekroczenia terminu w początkowej fazie („I” – rys. 7.11.) inwestycji wynika z charakteru i zakresu robót prowadzonych w tym czasie. Opóźnienia w obszarze robót ziemnych czy fundamentowych, uniemożliwiające rozpoczęcie kolejnych, wynikają bardzo często z konieczności wykonania dodatkowych, nieprzewidzianych harmonogramem prac, wymagających poniesienia dodatkowych kosztów;
- obserwowany w dalszej części przebiegu inwestycji systematyczny spadek wartości prawdopodobieństwa wynikał z wejścia inwestycji w kolejny etap, który charakteryzuje się szerokim frontem robót. Był on spowodowany większą elastycznością w prowadzeniu robót, pozwalającą na łatwiejsze i skuteczniejsze reagowanie w sytuacji wystąpienia problemów w danym obszarze oraz dającą możliwość nadrobienia powstałych opóźnień z uwagi na czas pozostały do zakończenia inwestycji;
- ostatni obserwowany okres wykazywał zróżnicowaną tendencję przebiegu wartości prawdopodobieństwa lub jego utrzymanie na stałym poziomie w zależności od badanej grupy inwestycji. Było to spowodowane zbliżającym się zakończeniem budowy powiązanych z realizowanymi w tym czasie pracami wykończeniowymi. W przypadku niektórych grup obiektów (budynki mieszkalne (M) i centra handlowe (G)) etap ten charakteryzował się częstymi zmianami zakresu robót. Takie postępowanie jest dość częste i jest ono główną przyczyną powstających opóźnień (Czarnigowska A. & Sobotka

A., 2010), (Leśniak A., 2012). Inne grupy obiektów, jak budynki hotelowe (H) czy budynki biurowe (O), ze względu na swoją specyfikę, nie generowały konieczności wprowadzania zmian, czego odzwierciedleniem jest zerowe prawdopodobieństwo przekroczenia kosztu pod warunkiem przekroczenia terminu w ostatniej fazie realizacji.

7.3.3. Prawdopodobieństwo przekroczenia terminu inwestycji pod warunkiem przekroczenia jej kosztu

Dla inwestora, lub bezpośrednio dla menedżera projektu, równie interesujące co prawdopodobieństwo przekroczenia kosztu pod warunkiem przekroczenia terminu, może być prawdopodobieństwo w odwrotnej kolejności – przekroczenia terminu pod warunkiem, że przekroczony zostanie koszt przedsięwzięcia budowlanego. Pozwala to ocenić wpływ ewentualnego wydłużenia czasu trwania inwestycji w sytuacji gdy przekroczony zostanie jej planowany koszt. Tabela 7.2. prezentuje szczegółowe wartości danych oraz kolejne etapy, począwszy do wyodrębnienia zdarzeń sprzyjających ze wszystkich zdarzeń będących efektem pomiarów, poprzez wyznaczenie prawdopodobieństwa ich wystąpienia, mające na celu wyznaczenie prawdopodobieństw warunkowych przekroczenia terminu przedsięwzięcia pod warunkiem przekroczenia jego kosztu. Analizę przeprowadzono dla każdego przedsięwzięcia.

Tabela 7.2. Szczegółowe wartości danych do wyznaczenia prawdopodobieństw warunkowych przekroczenia terminu przedsięwzięcia pod warunkiem przekroczenia jego kosztu.

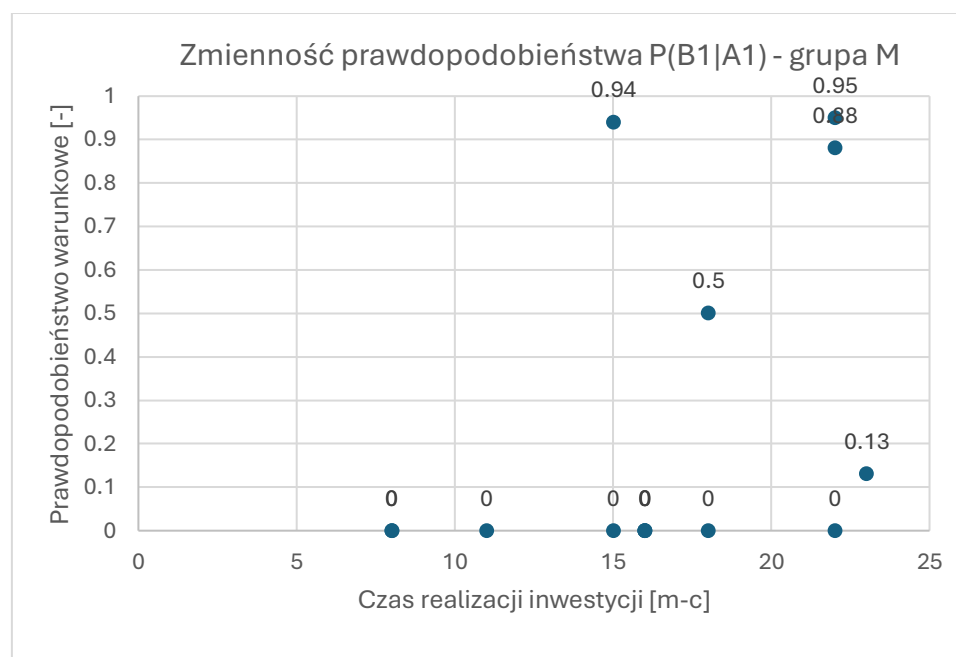
Nr	Symbol	Liczba pomiarów	Ilość przekroczeń CPI	Ilość przekroczeń SPI	P(A1)	P(B1)	Ilość przekroczeń A1 i B1	P(A1∩B1)	P(B1 A1)
1	M.1	16	0	7	0	0,44	0	0	0
2	M.2	16	9	0	0,56	0	0	0	0
3	M.3	16	0	7	0	0,44	0	0	0
4	M.4	8	0	5	0	0,63	0	0	0
5	M.5	8	0	1	0	0,13	0	0	0
6	M.6	15	0	11	0	0,73	0	0	0
7	M.7	15	14	14	0,93	0,93	13	0,87	0,94
8	M.8	11	0	12	0	1,09	0	0	0
9	M.9	22	8	19	0,36	0,86	7	0,32	0,88
10	M.10	17	0	14	0	0,78	0	0	0
11	M.11	23	16	3	0,7	0,13	2	0,09	0,13
12	M.12	22	17	18	0,77	0,82	16	0,73	0,95
13	M.13	22	0	16	0	0,73	0	0	0
14	M.14	18	14	7	0,78	0,39	7	0,39	0,5
15	O.1	30	0	18	0	0,6	0	0	0
16	O.2	27	8	22	0,3	0,81	8	0,3	1
17	O.3	23	0	15	0	0,65	0	0	0
18	O.4	41	19	29	0,46	0,71	19	0,46	1
19	H.1	34	22	16	0,65	0,47	14	0,41	0,63
20	H.2	6	1	4	0,17	0,67	0	0	0
21	H.3	17	9	10	0,53	0,59	8	0,47	0,89
22	H.4	16	8	8	0,5	0,5	7	0,44	0,88
23	H.5	15	10	6	0,67	0,4	5	0,33	0,5
24	H.6	18	13	14	0,72	0,78	13	0,72	1
25	H.7	19	7	7	0,37	0,37	7	0,37	1
26	H.8	24	15	8	0,63	0,33	8	0,33	0,52
27	H.9	27	11	14	0,41	0,52	11	0,41	1
28	G.1	15	10	11	0,67	0,73	7	0,47	0,7
29	G.2	13	0	8	0	0,62	0	0	0
30	G.3	11	7	3	0,64	0,27	3	0,27	0,42

31	G.4	24	1	23	0,04	0,96	1	0,04	0,96
32	G.5	17	3	14	0,18	0,82	2	0,12	0,68
33	G.6	6	0	3	0	0,5	0	0	0
34	G.7	16	0	9	0	0,56	0	0	0
35	G.8	19	8	19	0,42	1	8	0,42	1
36	L.1	8	4	4	0,5	0,5	0	0	0
37	L.2	8	8	3	1	0,38	3	0,38	0,38
38	L.3	9	0	3	0	0,33	0	0	0
39	L.4	10	0	5	0	0,5	0	0	0
40	L.5	9	0	3	0	0,33	0	0	0
41	L.6	11	0	6	0	0,55	0	0	0

7.3.3.1. Prawdopodobieństwo przekroczenia terminu pod warunkiem przekroczenia kosztu różnorodnych przedsięwzięć budowlanych

Analogicznie jak w punkcie 7.3.1, wyniki zaprezentowane są w formie wykresów punktowych i przedstawiają zmienność obserwowanego prawdopodobieństwa względem czasu realizacji inwestycji oznaczonego w miesiącach. Zmienna skala osi poziomej wynika z różnej długości trwania inwestycji poszczególnych obiektów.

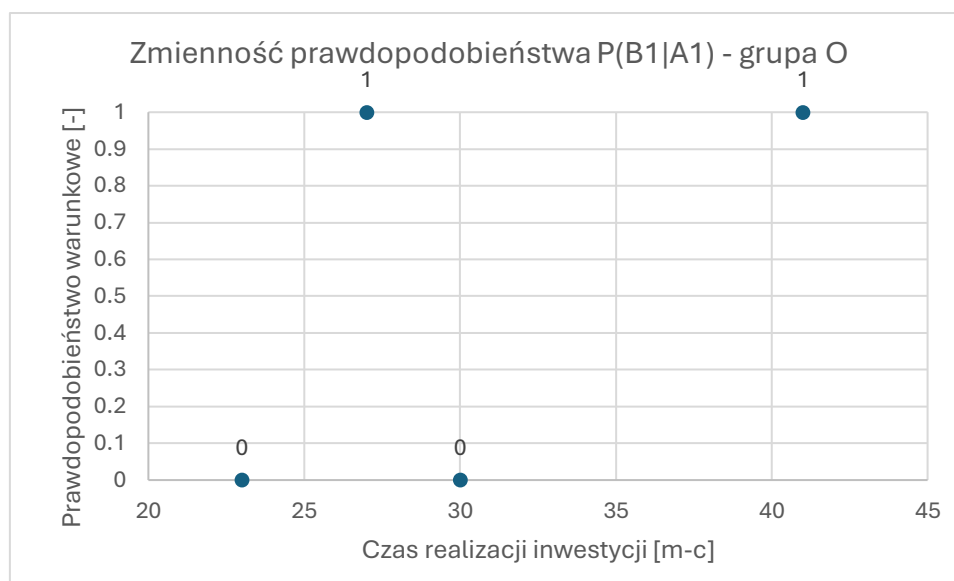
W grupie budynków mieszkalnych (M) sklasyfikowano 14 obiektów których czas realizacji wynosił od 8 do 23 miesięcy. Zmienność prawdopodobieństwa warunkowego dla tej grupy przedsięwzięć przedstawiono na rys. 7.12.



Rysunek 7.12. Prawdopodobieństwa przekroczenia terminu pod warunkiem przekroczenia kosztu w czasie realizacji budynków mieszkalnych (M).

W grupie tej zaobserwowano duże rozbieżności pomiędzy wartościami uzyskanymi dla poszczególnych inwestycji. Dla ponad 80% z nich prawdopodobieństwo nie przekroczyło wartości 0,15. Nie zaobserwowano jednak wpływu długości inwestycji na rozkład prawdopodobieństwa.

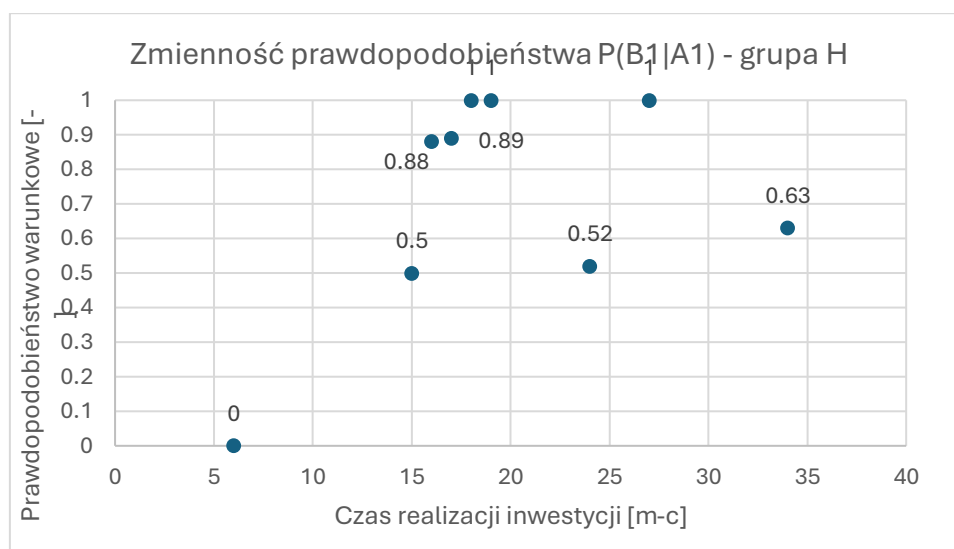
W grupie budynków biurowych (O) tylko w przypadku jednej inwestycji przekroczenie kosztu inwestycji pociągało za sobą również przekroczenie terminu (rys. 7.13.)



Rysunek 7.13. Prawdopodobieństwa przekroczenia terminu pod warunkiem przekroczenia kosztu w czasie realizacji budynków biurowych (O).

Prawdopodobieństwo przekroczenia terminu pod warunkiem, że przekroczony został koszt w połowie przypadków wynosi 0,00. Podobnie jak w przypadku budownictwa mieszkaniowego, nie zaobserwowano wpływu czasu trwania inwestycji na rozkład prawdopodobieństwa.

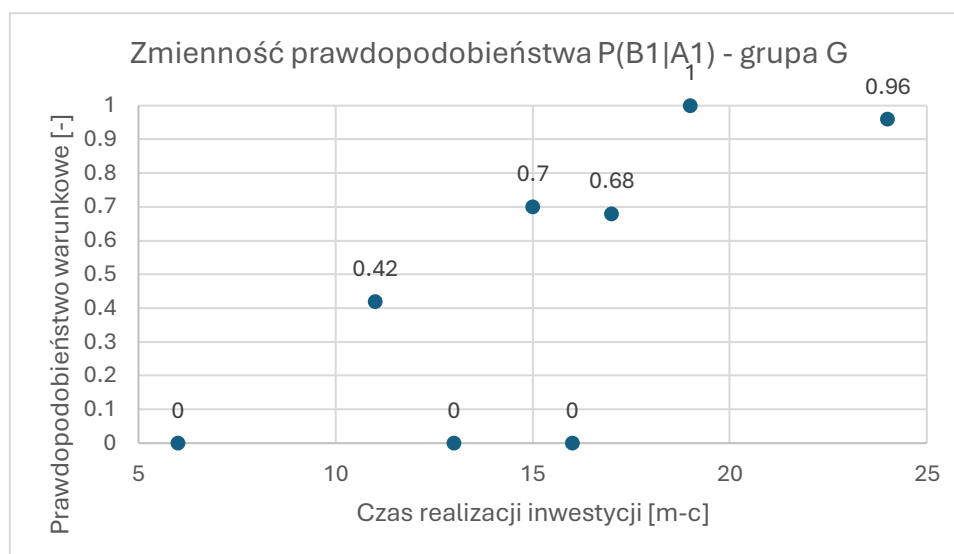
W grupie budynków hotelowych (H), liczącej 9 inwestycji, również zaobserwowano zróżnicowane prawdopodobieństwo przekroczenia terminu pod warunkiem przekroczenia kosztu (rys. 7,14).



Rysunek 7.14. Prawdopodobieństwa przekroczenia kosztu pod warunkiem przekroczenia terminu w czasie realizacji budynków hotelowych (H).

Pomimo dwóch wyjątków w których dla czasu wynoszącego 16 i 17 miesięcy prawdopodobieństwo osiągnęło wartości odpowiednio 0,88 i 0.89 oraz 18 i 19 miesięcy z prawdopodobieństwem równym 1, ostatecznie stwierdzono, że czas realizacji nie ma istotnego wpływu na wartość prawdopodobieństwa. Zauważono jednak, że wartości prawdopodobieństwa dla poszczególnych przedsięwzięć wahają się w przedziale 0,50 – 1,00 bez względu na czas ich realizacji.

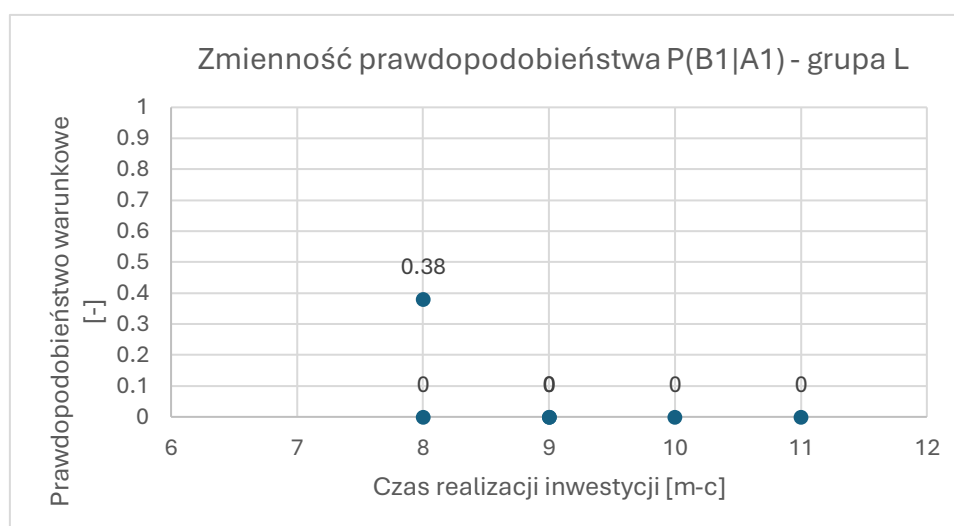
Analizując zmienność prawdopodobieństwa warunkowego $P(B1|A1)$ przekroczenia terminu pod warunkiem przekroczenia kosztu w grupie centrów handlowych (G) zaobserwowano trend wzrostowy wraz z wydłużaniem czasu realizacji.



Rysunek 7.15. Prawdopodobieństwa przekroczenia terminu pod warunkiem przekroczenia kosztu w czasie realizacji centrów handlowych (G).

Dotyczy to około 75% przedsięwzięć budowlanych w tej grupie. W przypadku pozostałych 25% wartości prawdopodobieństwa nie zaobserwowano powiązania z czasem realizacji (rys. 7.15.).

W grupie centrów logistycznych (L) przeanalizowano 5 inwestycji, których czas realizacji zawierał się w przedziale 8 – 11 miesięcy (rys. 7.16).



Rysunek 7.16. Prawdopodobieństwa przekroczenia terminu pod warunkiem przekroczenia kosztu w czasie realizacji centrów logistycznych (L).

Wartości prawdopodobieństwa warunkowego $P(B1|A1)$ w niemal wszystkich przypadkach wyniosły 0,00, bez względu na czas realizacji przedsięwzięć.

7.3.3.2. Wnioski z badania prawdopodobieństwa przekroczenia terminu pod warunkiem przekroczenia kosztu

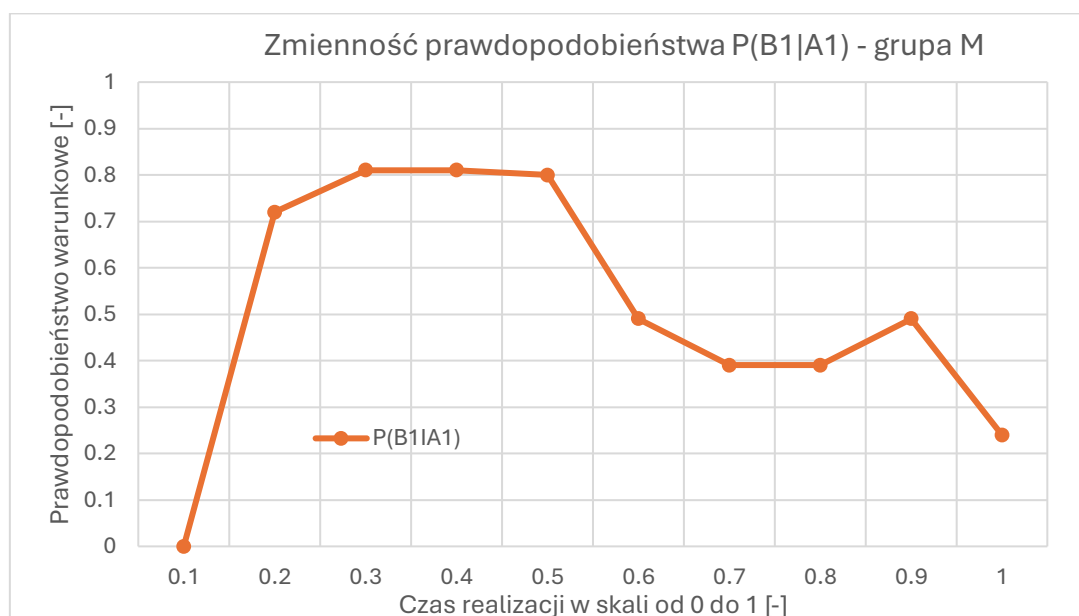
Badając zależność prawdopodobieństwa przekroczenia terminu pod warunkiem przekroczenia kosztu od długości realizacji przedsięwzięcia dokonano następujących spostrzeżeń:

- w grupie centrów handlowych (G) zaobserwowano tendencję polegającą na wzroście prawdopodobieństwa przekroczenia terminu pod warunkiem przekroczenia kosztu wraz z wydłużaniem czasu realizacji przedsięwzięć;
- w około 60% przypadków prawdopodobieństwo $P(B1|A1)$ osiągnęło wartości przekraczające 0,50;
- poza grupą centrów handlowych (G) nie stwierdzono zależności prawdopodobieństwa $P(B1|A1)$ od czasu przebiegu inwestycji;
- zaobserwowane na tle czasowym wartości prawdopodobieństwa warunkowego w grupie budynków mieszkalnych (M) wskazały, że dla przedsięwzięć dłuższych niż 15 miesięcy prawdopodobieństwo przekroczenia terminu pod warunkiem przekroczenia kosztu może wystąpić znacznie częściej, choć trudno jednoznacznie ocenić jaką wartość wtedy uzyska.

7.3.3.3. Zmienność prawdopodobieństwa przekroczenia terminu pod warunkiem przekroczenia kosztu w skali czasu realizacji [0 – 1]

Kolejnym zagadnieniem poddanym analizie było prawdopodobieństwo przekroczenia terminu pod warunkiem, że przekroczony został koszt. Próba badawcza została podzielona na pięć grup obiektów. Prawdopodobieństwo warunkowe zostało wyznaczone w interwałach 1/10 postępu inwestycji a wyniki przedstawiono dla każdej z grup na wykresach (rys. 7.17 – 7.22).

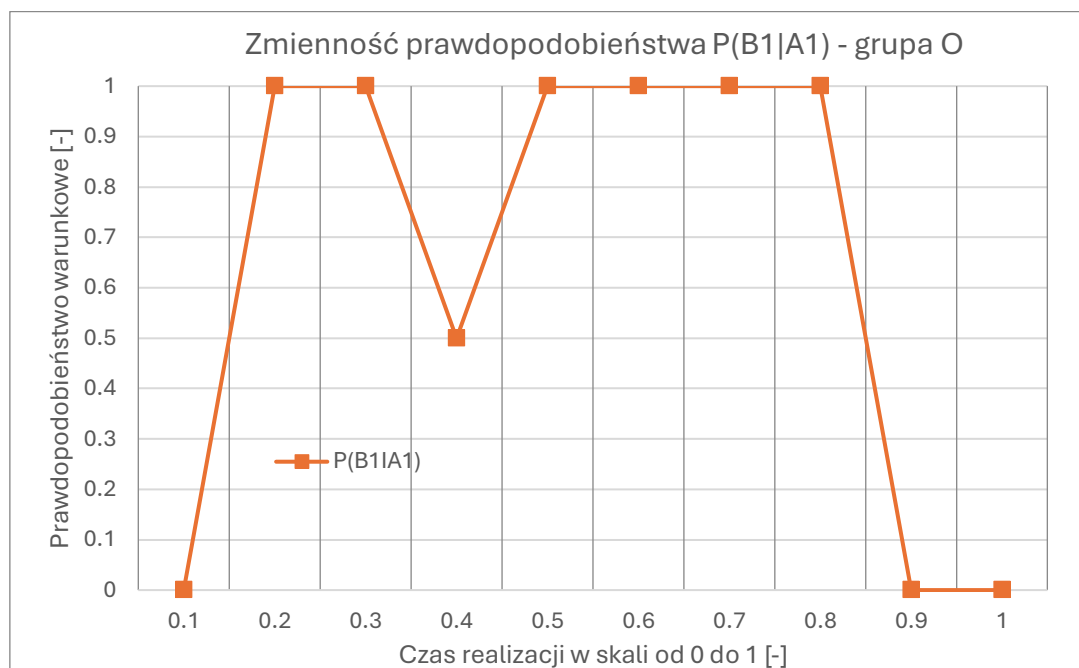
W analizowanej grupie budynków mieszkalnych (M) widoczny jest skokowy wzrost prawdopodobieństwa w pierwszym przedziale czasu do wartości 0,8 (rys. 7.17.).



Rysunek 7.17. Prawdopodobieństwo przekroczenia terminu pod warunkiem przekroczenia kosztu w grupie budynków mieszkalnych (M) w skali czasu realizacji 0 – 1.

Następnie do około połowy inwestycji utrzymuje się ono na tym samym poziomie. W kolejnych trzech przedziałach czasowych (6/10 – 8/10) obserwuje się spadek prawdopodobieństwa do wartości około 0,39. W ostatnich dwóch przedziałach czasowych obserwuje się początkowo wzrost prawdopodobieństwa do około 0,50 a następnie spadek do 0,24.

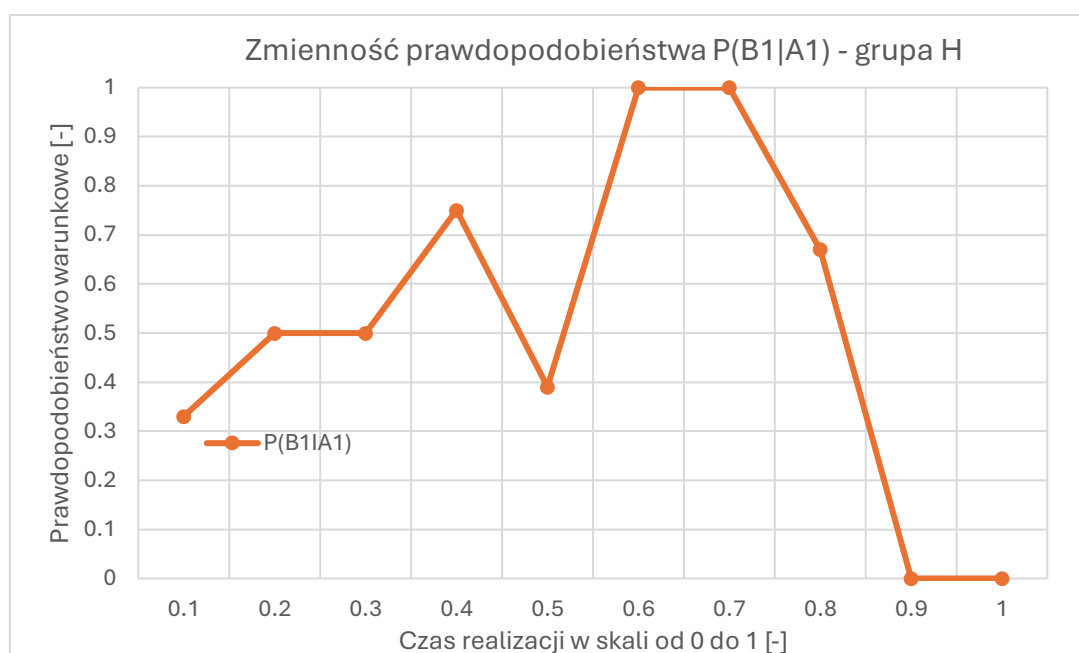
Przebieg zmienności prawdopodobieństwa przekroczenia terminu pod warunkiem przekroczenia kosztu w przypadku budynków biurowych (O) charakteryzuje się skokową zmiennością wartości (rys. 7.18.).



Rysunek 7.18. Prawdopodobieństwo przekroczenia terminu pod warunkiem przekroczenia kosztu w grupie budynków biurowych (O) w skali czasu realizacji 0 – 1.

W pierwszych 10% postępu inwestycji nastąpił wzrost z poziomu 0,00 do 1,00. Następnie zaobserwowano spadek do wartości 0,50 w 40% zaawansowania oraz powrót do wartości 1,00 utrzymujący się w przedziale 50 – 80%. W ostatniej fazie ponownie nastąpił spadek do poziomu 0,00, który utrzymał się do końca czasu realizacji. Grupa budynków biurowych (O) obarczona jest większym ryzykiem wystąpienia dodatkowych, nieprzewidywanych harmonogramem zdarzeń, mogących powodować przekroczenie kosztu a w konsekwencji również czasu. Na podstawie przeprowadzonych analiz można stwierdzić, że prawdopodobieństwo przekroczenia terminu pod warunkiem przekroczenia kosztu jest wysokie.

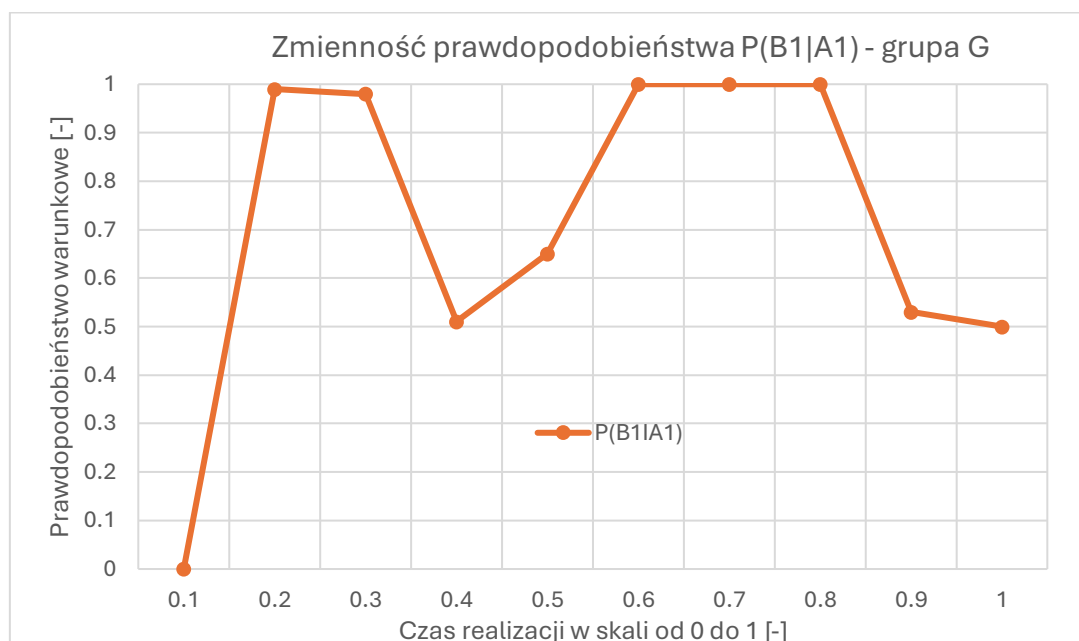
Analiza zmienności prawdopodobieństwa w grupie budynków hotelowych (H) wykazała tendencję wzrostową od początku do około 60% zaawansowania. Następnie od około 70% zaawansowania zaobserwowano spadek wartości prawdopodobieństwa do wartości 0,00, która utrzyma się do zakończenia inwestycji (rys. 7.19.).



Rysunek 7.19. Prawdopodobieństwo przekroczenia terminu pod warunkiem przekroczenia kosztu w grupie budynków hotelowych (H) w skali czasu realizacji 0 – 1.

Zmienny trend prawdopodobieństwa obserwowany w tej grupie obiektów wynikał z jej specyfiki charakteryzującej się częstymi zmianami zakresu dokonywanymi w różnych okresach realizacji inwestycji.

Prawdopodobieństwo przekroczenia terminu pod warunkiem przekroczenia kosztu inwestycji w grupie centrów handlowych (G) przyrastało intensywnie w początkowej fazie do wartości 0,99 (rys. 7.20.).

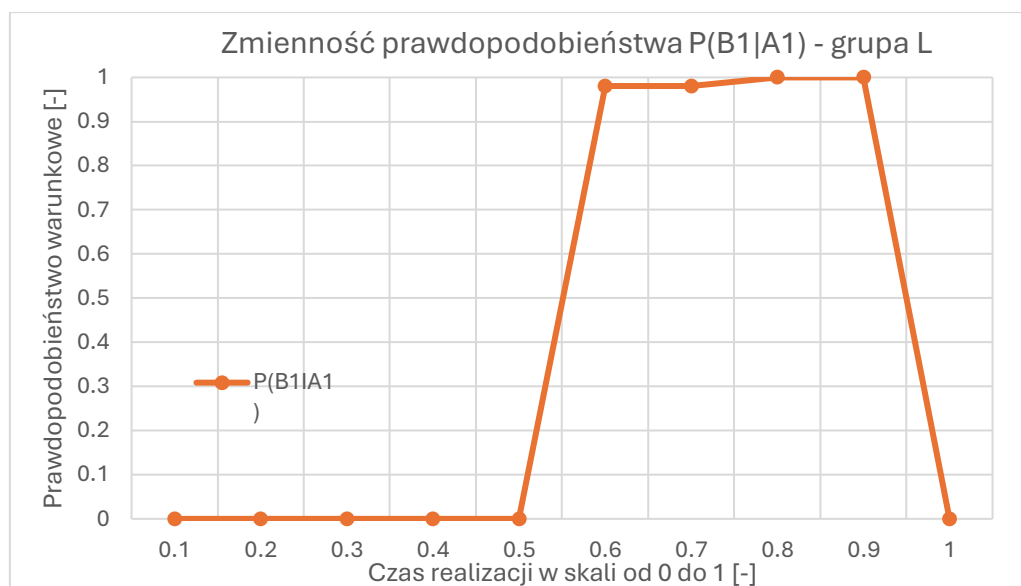


Rysunek 7.20. Prawdopodobieństwo przekroczenia terminu pod warunkiem przekroczenia kosztu w grupie centrów handlowych (G) w skali czasu realizacji 0 – 1.

Następnie, w przedziale 30 – 60%, wykazało spadek do wartości 0,50 a następnie wzrost do 1,00. Wysokie prawdopodobieństwo przekroczenia kosztów w tym okresie było

efektem prac dodatkowych lub nieprzewidzianych komplikacji spowodowanych dużym zakresem i skomplikowaniem robót. Istotnie wpływały one na przekroczenie wyznaczonych terminów. W ostatnich dwóch przedziałach czasowych obserwowano spadek prawdopodobieństwa do poziomu 0,50.

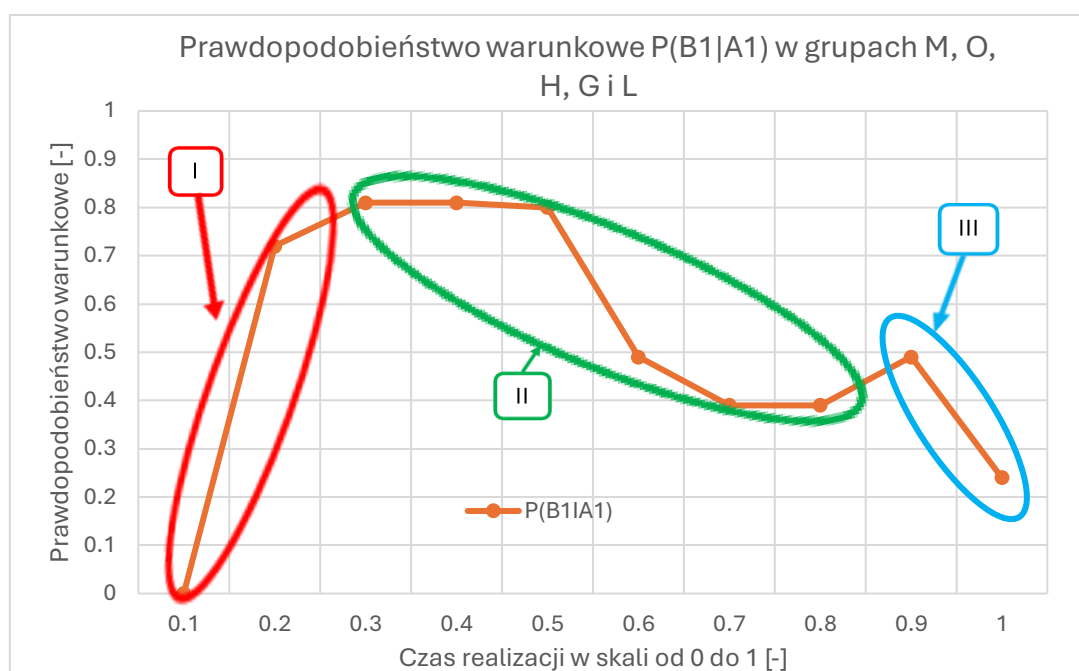
W ostatniej analizowanej grupie centrów logistycznych (L) obserwuje brak prawdopodobieństwa przekroczenia terminu pod warunkiem przekroczenia kosztu do połowy przebiegu inwestycji (rys. 7.21.).



Rysunek 7.21. Prawdopodobieństwo przekroczenia terminu pod warunkiem przekroczenia kosztu w grupie centrów logistycznych (L) w skali czasu realizacji 0 – 1.

W początkowym okresie inwestycji związanych z budową centrów logistycznych (L) prawdopodobieństwo przekroczenia terminu z powodu przekroczenia kosztu nie występuje aż do połowy czasu realizacji. W przedziale 6/10 – 9/10 czasu realizacji wartości prawdopodobieństwa utrzymują się na maksymalnym poziomie. Ostatni interwał postępu inwestycji wykazuje spadek prawdopodobieństwa wynikający ze zbliżającego się zakończenia budowy i trwających prac wykończeniowych, których ilość i zakres w tego typu obiektach jest znacząco mniejsza w stosunku do innych grup. Ewentualne przekroczenia występujące w tym okresie nie będą miały istotnego wpływu na zakończenie inwestycji.

Badając zmienność prawdopodobieństwa przekroczenia terminu pod warunkiem przekroczenia kosztu w poszczególnych grupach przeanalizowano ją również dla całej próby badawczej. Wyniki przedstawiono na wykresie prezentując zmienność prawdopodobieństwa w odniesieniu do postępu inwestycji mierzonego w 10% interwałach czasowych (rys. 7.22).



Rysunek 7.22. Prawdopodobieństwo przekroczenia terminu pod warunkiem przekroczenia kosztu w całej próbie badawczej, w grupach M, O, H, G i L.

Widoczna jest płynna zmienność prawdopodobieństwa wraz postępem inwestycji. Obserwuje się początkowy przyrost prawdopodobieństwa do poziomu około 0,80 w połowie zaawansowania przedsięwzięć a następnie spadek do wartości około 0,25 na końcu czasu realizacji.

7.3.3.4. Wnioski z badania zmienności prawdopodobieństwa przekroczenia terminu pod warunkiem przekroczenia kosztu

W wyniku badań przebiegu zmienności prawdopodobieństwa przekroczenia terminu pod warunkiem przekroczenia kosztu inwestycji sformułowano poniższe wnioski:

- analiza wyników uzyskanych dla prawdopodobieństwa przekroczenia terminu pod warunkiem, że przekroczonego kosztu wskazuje na istotne różnice w przebiegu prawdopodobieństwa w poszczególnych przedziałach czasowych pomiędzy grupami obiektów;
- trend przebiegu zmienności prawdopodobieństwa przekroczenia terminu pod warunkiem przekroczenia kosztu wykazał pewne podobieństwo pomiędzy poszczególnymi grupami obiektów. W początkowej fazie („I” – rys. 7.22.) (wyjątek stanowi grupa centrów logistycznych (L)) zaobserwowano wzrost wartości prawdopodobieństwa charakteryzujący się zróżnicowaną dynamiką w poszczególnych grupach. Następnie, w kolejnej fazie („II” – rys. 7.22), pomimo zróżnicowanego przebiegu, prawdopodobieństwo utrzymywało się w przedziale 0,5 – 1,0. Faza trzecia („III” – rys. 7.22) charakteryzowała się widocznym wyraźnym spadkiem wartości;
- wyraźne podobieństwo zmienności prawdopodobieństwa warunkowego $P(B1|A1)$ uzyskanego dla całej próby badawczej zaobserwowano w porównaniu z grupą budynków mieszkalnych (M);

- przebieg prawdopodobieństwa warunkowego $P(B1|A1)$ w grupie budynków hotelowych (H) i centrów logistycznych (L), znacząco odbiega w fazie I od trendu uzyskanego dla całej próby badawczej;
- w grupie centrów logistycznych (L) przyrost od wartości 0,00 prawdopodobieństwa warunkowego następuje dopiero w połowie czasu przebiegu inwestycji. W dalszej części czasu przebieg jest tożsamy z przebiegiem wyznaczonym dla całej próby badawczej;
- wraz z postępem prac (faza II) obserwuje się zmienny przebieg prawdopodobieństwa widoczny zarówno na wykresie zbiorczym jak i wykresach w poszczególnych grupach. Charakter tego przebiegu jest zbliżony w określonych przedziałach czasowych, jednak występują duże rozbieżności w uzyskanych wartościach;
- ostatnia zaobserwowana faza inwestycji (faza III) charakteryzuje się wyraźnym spadkiem prawdopodobieństwa na tle wartości obserwowanych w fazie II.

7.3.4. Podsumowanie badania prawdopodobieństwa warunkowego przekroczenia terminu pod warunkiem przekroczenia kosztu w różnorodnych przedsięwzięciach budowlanych

Korzystając z narzędzia statycznego w postaci prawdopodobieństwa warunkowego przeprowadzono analizę parametrów przekroczenia terminu i czasu wykorzystując opisany we wstępie do niniejszego rozdziału wzór Bayesa. Jego zastosowanie pozwoliło na przeprowadzenie analizy prawdopodobieństwa warunkowego umożliwiającej poszukiwanie odpowiedzi na postawione na wstępie niniejszego rozdziału pytanie:

Jakie jest prawdopodobieństwo przekroczenia terminu realizacji pod warunkiem przekroczenia kosztu realizacji przedsięwzięcia budowlanego

Uzyskane w toku przeprowadzonych obliczeń wyniki przedstawione w punktach 7.3.1. i 7.3.3. wykazały występowanie trendu w zmienności przebiegu analizowanego prawdopodobieństwa w odniesieniu do czasu realizacji przedsięwzięcia. Charakter tego trendu wskazuje na pewne cechy wspólne pomiędzy poszczególnymi grupami przedsięwzięć

- obserwowany w początkowej fazie („I”) wysoki przyrost prawdopodobieństwa przekroczenia terminu pod warunkiem przekroczenia kosztu w niemal wszystkich grupach inwestycji świadczy o dużym wpływie poniesionych w tym okresie kosztów na termin realizacji robót. Jedynie w przypadku grupy centrów logistycznych (L) obserwowany wzrost wartości prawdopodobieństwa następuje dopiero w połowie inwestycji;
- w kolejnej fazie („II”) obserwuje się względną stabilizację wartości prawdopodobieństwa na podobnym poziomie. W niektórych grupach (M, O, L) wartość utrzymuje się na jednym poziomie w innych ulega wahaniom (H oraz G). Na tym etapie przedsięwzięć, w przedziale 20 – 80% czasu realizacji inwestycji, prawdopodobieństwo utrzymywało się na podobnym, dość wysokim poziomie wynoszącym około 0,8 – 1,0 co świadczyło o wysokim wpływie ewentualnego przekroczenia kosztów na przekroczenie terminu w danym interwale czasowym. Wynikało to z charakteru przeprowadzanych w tym okresie prac, w których pojawienie się ewentualnych przekroczeń kosztu, wynikających z wprowadzenia np. zmian w konstrukcji, będzie pociągało za sobą przekroczenie założonych terminów realizacji;

- ostatnia faza obserwowanego trendu („III”) charakteryzowała się wyraźną tendencją spadkową wartości prawdopodobieństwa. Spadek prawdopodobieństwa w tym przedziale czasowym pokazuje, że na etapie prac wykończeniowych pojawienie się ewentualnych dodatkowych kosztów nie będzie miało znaczącego wpływu na terminowość wykonanych prac;
- ustalono, że w przeważającej liczbie inwestycji prawdopodobieństwo przekroczenia terminu spowodowane przekroczeniem kosztu było wyższe niż w sytuacji odwrotnej;
- dodatkowo wykazano duże podobieństwo w rozkładzie wartości prawdopodobieństwa warunkowego w czasie trwania inwestycji pomiędzy większością analizowanych grup obiektów oraz w odniesieniu do całej próby badawczej.

7.4. Podsumowanie badania współzależności przekroczenia kosztu i przekroczenia terminu jako zdarzeń występujących z prawdopodobieństwem warunkowym.

Przeprowadzone we wcześniejszym rozdziale badanie współzależności przekroczenia kosztu i terminu w zróżnicowanych przedsięwzięciach budowlanych za pomocą metody Spearmana i metody Pearsona wykazało, że współzależność pomiędzy badanymi parametrami nie występuje. Przekroczenia kosztu i terminu traktowane jako zmienne losowe w niektórych grupach wykazywały mniejsze lub większe powiązanie, a nawet jego brak.

Wykorzystanie prawdopodobieństwa warunkowego jako narzędzia do opisu relacji pomiędzy cechami dwóch zmiennych pozwoliło na opracowanie obrazu rozkładu prawdopodobieństwa badanych parametrów jakimi są przekroczenie kosztu i przekroczenie terminu w dwóch wariantach. Jednym z nich jest obserwacja zależności prawdopodobieństwa przekroczenia kosztu pod warunkiem przekroczenia terminu $P(A1|B1)$. W drugim wariancie przeanalizowano sytuację odwrotną, w której badano prawdopodobieństwo przekroczenia terminu pod warunkiem przekroczenia kosztu ($P(B1|A1)$).

Przedstawione powyżej wnioski z poczynionych obserwacji oraz podsumowania pozwalają na sformułowanie istotnych spostrzeżeń odnoszących się do współzależności przekroczenia kosztu i terminu na dwóch płaszczyznach:

Pierwszą płaszczyzną prowadzonych badań jest określenie współzależności przekroczenia kosztu i terminu w wyodrębnionych grupach obiektów budowlanych. Zestawiając ze sobą wyniki analizy prawdopodobieństwa przekroczenia kosztu pod warunkiem przekroczenia terminu z wynikami badania prawdopodobieństwa wyznaczanego w drugą stronę w ramach poszczególnych grup obiektów zaobserwowano następujące prawidłowości:

- w grupie budynków mieszkalnych (M) przebieg prawdopodobieństwa warunkowego $P(A1|B1)$ był zbliżony do przebiegu prawdopodobieństwa $P(B1|A1)$ w niemal 90% czasu trwania inwestycji. Jednak zróżnicowanie w uzyskanych wartościach świadczy o braku współzależności pomiędzy badanymi parametrami. Ponadto wyższe wartości prawdopodobieństwa przekroczenia terminu pod warunkiem przekroczenia kosztu świadczą o tym, że jest to częstszy scenariusz przebiegu inwestycji niż sytuacja odwrotna;
- grupa budynków biurowych (O) charakteryzowała się identycznym przebiegiem prawdopodobieństwa warunkowego w obu analizowanych kierunkach, w przedziałach

0 – 20% oraz 90 – 100% czasu realizacji. Świadczyło to o występowaniu współzależności obu parametrów. Jednak istotne zróżnicowanie wartości prawdopodobieństwa w pozostałych przedziałach wskazywało na brak stałej współzależności pomiędzy badanymi cechami;

- przebiegi prawdopodobieństwa warunkowego $P(A1|B1)$ i $P(B1|A1)$ w grupie budynków hotelowych (H) wykazały duże rozbieżności. Świadczyło to o braku współzależności pomiędzy przekroczeniem kosztu i terminu;
- w grupie centrów handlowych (G), trend zmienności wyników uzyskanych w trakcie analiz prawdopodobieństw przekroczenia kosztu pod warunkiem przekroczenia terminu oraz przekroczenia terminu pod warunkiem przekroczenia kosztu w około 90% czasu realizacji jest bardzo podobny. Jednak z uwagi na zróżnicowanie wartości obu prawdopodobieństw w poszczególnych przedziałach współzależność pomiędzy obiema cechami nie występuje;
- w ostatniej analizowanej grupie – centrach logistycznych (L) – przebiegi prawdopodobieństwa przekroczenia kosztu pod warunkiem przekroczenia terminu i przekroczenia terminu pod warunkiem przekroczenia kosztu wskazywały na występowanie analogii. W pierwszej połowie zaobserwowano nawet jednakowe wartości obu kierunków prawdopodobieństwa, wskazujące na występowanie istotnej współzależności pomiędzy badanymi cechami. Jednak z uwagi na rozbieżności w drugiej połowie stwierdzono, że obie cechy nie są stale współzależne.

Drugą płaszczyzną prowadzonych badań było ustalenie współzależności przekroczenia kosztu i terminu w całej próbie badawczej. Zbiorcza analiza próby badawczej, bez podziału na grupy obiektów miała na celu wyznaczenie ogólnych trendów przebiegu prawdopodobieństw kierunkowych $P(A1|B1)$ i $P(B1|A1)$. Pozwoliło to spojrzeć na aspekt współzależności obu cech w szerszym ujęciu:

- niezależnie od kierunku badania prawdopodobieństwa warunkowego ($P(A1|B1)$ lub $P(B1|A1)$), analizując próbę badawczą jako całość, bez podziału na grupy obiektów, obserwowano podobny trend przebiegu wartości. Pomimo różnic ilościowych charakter zmienności był bardzo zbliżony. Jedyna istotna różnica ujawnia się dopiero w ostatnich 10% przebiegu inwestycji wykazując tendencję spadkową dla prawdopodobieństwa $P(B1|A1)$ a wzrostową dla $P(A1|B1)$;
- obserwowany w początkowej fazie („I”) intensywny przyrost prawdopodobieństwa warunkowego w niemal wszystkich grupach inwestycji świadczy zarówno o rosnącym wpływie przekroczenia terminu na wzrost kosztu oraz przekroczenia kosztu na wydłużenie terminu realizacji. Wzrost wartości prawdopodobieństwa dla obu kierunków, choć różny co do wielkości, może wynikać z charakteru robót wykonywanych w tym okresie (roboty ziemne i fundamentowe) cechujących się pojawianiem dodatkowych, nieprzewidzianych w harmonogramach prac wymagających zwiększenia nakładów finansowych. Ich realizacja będzie wymagała również dodatkowego czasu, co będzie skutkowało przekroczeniem terminów zaplanowanych w harmonogramie. Wskazuje to na istotny związek przekroczenia kosztu z przekroczeniem terminu w przedziale czasowym fazy „I”;

- w wydzielonej „II” fazie czasu realizacji również obserwuje się podobną charakterystykę przebiegu prawdopodobieństwa warunkowego w obu analizowanych kierunkach, pomimo istotnych różnic w uzyskanych wartościach. Względna stabilizacja wynika z charakteru prowadzonych w tym okresie prac konstrukcyjnych. Badania pokazują, że ewentualne pojawienie się przekroczeń kosztu, wynikających z wprowadzenia np. zmian w konstrukcji, będzie pociągało za sobą przekroczenie założonych terminów realizacji. Taki sam wniosek można wyciągnąć z obserwacji przekroczenia terminu pod warunkiem przekroczenia kosztu. Powyższe obserwacje implikują stwierdzenie braku współzależności pomiędzy przekroczeniem obu analizowanych cech;
- ostatnia faza obserwowanego trendu („III”) charakteryzuje się wyraźną różnicą w przebiegu prawdopodobieństwa warunkowego. W przypadku analizy prawdopodobieństwa przekroczenia kosztu pod warunkiem przekroczenia terminu obserwuje się wyraźny wzrost wartości. Badanie przebiegu prawdopodobieństwa w drugim kierunku $P(B1|A1)$ wykazuje natomiast tendencję spadkową. W zaistniałej sytuacji ewentualne niedotrzymanie terminu będzie wiązało się większymi konsekwencjami finansowymi. Natomiast wzrost kosztów w analizowanym okresie będzie miał mniejszy wpływ na terminowość wykonywanych prac. miało większy wpływ na przekroczenie związanego z nim kosztu. Powyższe stwierdzenia skłaniają do stwierdzenia braku współzależności pomiędzy przekroczeniem kosztu i terminu;
- analizując prawdopodobieństwo warunkowe przekroczenia kosztu i terminu, w określonych sytuacjach można obliczeniowo wykazać niezależność badanych parametrów przekładającą się na brak współzależności. Sytuacja taka zachodziła, gdy jedno z prawdopodobieństw $P(A1)$ lub $P(B1)$ konieczne do przeprowadzenia analizy warunkowej, uzyskało wartości „1”. Wtedy wartości prawdopodobieństwa warunkowego przyjmowały takie same wartości jak prawdopodobieństwa wystąpienia pojedynczych cech, co z kolei oznacza, że cechy A1 i B1 były niezależne. Ponieważ jednak w toku prowadzonych obliczeń sytuacja taka wystąpiła zaledwie w kilku przypadkach, stwierdzono, że niezależność zdarzeń miała charakter lokalny i nie odnosiła się do całego przebiegu inwestycji.

W ramach podsumowania należy stwierdzić, że wykazano istotne podobieństwo zarówno w przebiegu prawdopodobieństwa warunkowego przekroczenia kosztu uwarunkowanego przekroczeniem terminu jak i prawdopodobieństwa odwrotnego w określonych przedziałach czasu realizacji. Stwierdzenie to wynikało z zaobserwowanego podobieństwa trendów przebiegu wartości prawdopodobieństwa warunkowego wyznaczonych dla poszczególnych grup przedsięwzięć budowlanych. Trendy te były również zbliżone do trendu opracowanego dla całej próby badawczej. Jednak wahania wartości prawdopodobieństwa dla obu jego kierunków, obserwowane w kolejnych etapach realizacji przedsięwzięć, skłoniły autora niniejszej rozprawy do potwierdzenia tezy nr 2 sformułowanej na wstępie pracy mówiącej że :

Prawdopodobieństwa warunkowe cech, określonych jako przekroczenie kosztu i terminu realizacji, nie są stale współzależne w czasie przebiegu przedsięwzięcia budowlanego.

O współzależności można by mówić jedynie w przypadku uzyskania jednakowej, stałej wartości prawdopodobieństwa warunkowego w całym przebiegu realizacji inwestycji. Badania wykazały natomiast, że te wartości ulegają zmianie w pełnym zakresie prawdopodobieństwa

(przedział wartości $0,00 \div 1,00$). Na uwagę zasługuje również fakt, że w wyniku badania prawdopodobieństwa przekroczenia terminu pod warunkiem przekroczenia kosztu uzyskano rezultat zbieżny co do przebiegu trendu, jednak różny co do wartości, w odniesieniu do analiz przeprowadzonych w drugim kierunku. Różnice pomiędzy wartościami prawdopodobieństw wyniosły od 50% w grupie budynków mieszkalnych do nawet 80% w grupie budynków hotelowych czy centrów logistycznych. Implikuje to stwierdzenie, że prawdopodobieństwo przekroczenia kosztu wskutek przekroczenia terminu jest większe niż zdarzenia odwrotnego, a prawdopodobieństwa warunkowe obu tych cech nie wykazują stałej współzależności w trakcie realizacji robót budowlanych. Zjawisko to obserwuje się w prawie wszystkich analizowanych grupach typologicznych.

Odnosząc się do głównego celu niniejszego opracowania, czyli na wykazaniu współzależności przekroczenia kosztu i terminu w kontekście badania prawdopodobieństw warunkowych wskazano dwa elementy które mają kluczowe znaczenie dla oceny powiązania obu cech. Jednym z nich jest trend przebiegu zmienności prawdopodobieństwa warunkowego. Jego zróżnicowany charakter widoczny w szerokości przedziałów, które są uzależnione od przynależności do określonej grupy obiektów. W zależności od grupy oraz kierunku prawdopodobieństwa warunkowego przedział może być zamknięty pomiędzy wartościami $0 \div 0,6$ (grupa M, prawdopodobieństwo $P(A1|B1)$), $0 \div 1$ (grupa O, $P(A1|B1)$ i $P(B1|A1)$), $0 \div 0,5$ (grupa H oraz G $P(A1|B1)$), a także $0 \div 0,2$ (grupa L, $P(A1|B1)$). W przypadku prawdopodobieństwa warunkowego $P(B1|A1)$ w większości grup przedział występowania wartości zawierał się pomiędzy wartościami „0” i „1”. Wyjątkiem jest grupa budynków mieszkalnych (M) w której przedział wartości wynosił $0 \div 0,81$. Drugim elementem jest dysproporcja pomiędzy wartościami prawdopodobieństwa warunkowego uzyskanymi dla jednego i drugiego kierunku analizy. Różnice wynoszące od 50% do 80% mają swoje przełożenie na przekroczenie kosztu i terminu, jednoznacznie wskazując na brak współzależności pomiędzy nimi.

Badanie korelacji przeprowadzone w rozdziale VI nie wykazało współzależności pomiędzy przekroczeniem kosztu i przekroczeniem terminu. Przywołane powyżej wyniki analiz w których wykazano nieregularny przebieg trendu i zróżnicowanie wartości prawdopodobieństwa warunkowego uzyskane dla obu kierunków również wskazują na brak stałej współzależności pomiędzy obiema badanymi cechami. W celu pełniejszej weryfikacji stwierdzenia zawartego w głównej tezie pracy, przeprowadzono dalsze badania wykorzystujące metodę EVM, a ściślej szacowanie ostatecznego kosztu i terminu zakończenia przedsięwzięcia. Ich rezultaty przedstawiono w rozdziale VII.

ROZDZIAŁ VIII

Szacowanie ostatecznego kosztu i terminu zakończenia przedsięwzięcia

8.1. Wstęp do badania współzależności przekroczenia kosztu i terminu w zróżnicowanych przedsięwzięciach budowlanych metodą EVM

Przeprowadzone w rozdziałach VI i VII badania dotyczące określenia korelacji pomiędzy przekroczeniem kosztu a terminu wykazały brak statystycznej współzależności pomiędzy tymi dwiema cechami. Wyznaczenie przebiegu prawdopodobieństw warunkowych, które przeprowadzono w poprzednim rozdziale wykazały, że powiązanie pomiędzy przekroczeniem kosztu a przekroczeniem terminu podlega znacznej zmienności wraz z postępem przedsięwzięcia. Wielowątkowa analiza współzależności przekroczenia kosztu i terminu w zróżnicowanych przedsięwzięciach budowlanych, będąca przedmiotem niniejszej rozprawy, skłania do poszukiwania powiązań w różnych obszarach związanych z przebiegiem kosztu i czasu. Ponieważ koszt i termin są podstawowymi parametrami opisującymi przebieg inwestycji, ich pochodne wykorzystywane są w różnych metodach zarządzania procesem budowlanym do określania szerokiej gamy wskaźników, opisujących bieżący lub przyszły stan zaawansowania robót budowlanych.

Do takiego opisu współzależności przekroczenia kosztu i terminu w zróżnicowanych przedsięwzięciach budowlanych bardzo dobrze nadaje się opisana wcześniej metoda EVM. Już w swoim założeniu prezentuje ona powiązanie czasu i kosztu przy użyciu krzywej S. Ponadto zawiera w swoim pakiecie narzędzia, które na podstawie dotychczasowego przebiegu robót, mierzonego wykorzystaniem nakładów finansowych, pozwalają na oszacowanie całkowitego kosztu przedsięwzięcia (współczynnik EAC) oraz ostatecznego terminu jego zakończenia (wskaźnik ETTC). Na podstawie uzyskanych wartości tych współczynników można wnioskować o sposobie zakończenia inwestycji, sprowadzającego się do odpowiedzi na pytanie czy wystąpi przekroczenie któregoś (lub obu) z badanych parametrów czy też nie.

PMI podaje, że przy 20% - 25% zaawansowaniu inwestycji użycie metody EVM daje możliwość przewidzenia z dużą dokładnością wyniku końcowego. Jest to dość ogólne stwierdzenie odnoszące się do grupy około 1 000 przedsięwzięć z różnych gałęzi przemysłu. Nie wiadomo jaki przyjęto stopień dokładności szacowania, który w zależności od rodzaju przedsięwzięcia może określać zupełnie inny przedział akceptacji wyniku końcowego. Kluczowe są również obszary, z których wywodziły się analizowane przedsięwzięcia. Im bardziej powtarzalny i przewidywalny jest przebieg procesu, tym łatwiej i szybciej można przewidzieć jego zakończenie. Analiza przebiegu przedsięwzięć budowlanych przeprowadzona w rozdziale V dysertacji wskazuje, że w większości przypadków koszt i termin istotnie odbiegają od wartości zaplanowanych. Zaobserwowane rozbieżności mogą wynikać z faktu, że

przedsięwzięcia budowlane są wielobranżowe i wielofazowe, a co za tym idzie bardziej nieprzewidywalne. Metoda EVM pozwala na szacowanie kosztu i terminu przedsięwzięcia w dowolnym momencie jego trwania, w oparciu o powstałe przekroczenia obu parametrów. Dlatego w celu dokładniejszego zbadania słuszności przytoczonego powyżej stwierdzenia warto poszukać odpowiedzi na następujące pytania:

- Dla jakich wartości przekroczeń kosztu mierzonych w kwartylach czasu realizacji szacowany koszt przedsięwzięcia budowlanego (EAC) będzie tożsamy z kosztem planowanym?
- Przy jakich przekroczeniach czasu mierzonych w kwartylach czasu realizacji szacowany termin przedsięwzięcia budowlanego (ETTC) będzie tożsamy z terminem planowanym?

Uzyskane odpowiedzi pozwolą na określenie trendów szacowania kosztu i terminu w ramach poszczególnych grup obiektów, a także w ramach całej próby badawczej. Umożliwią również odnieść się do sformułowań zawartych w tezie nr 3:

Linie trendów szacowanego przekroczenia kosztów realizacji i szacowanego przekroczenia terminu nie wykazują pełnej zbieżności.

Porównanie linii trendów badanego przebiegu zmienności współczynników EAC i ETTC w kwartylach czasu realizacji przedsięwzięć budowlanych pozwala ocenić charakter i stopień ich powiązania. Poprzez zbieżność linii trendów należy rozumieć podobne w przebiegu zmienności funkcje kosztu i terminu realizacji, tzn. jeśli rośnie szacowany koszt to wzrasta szacowany termin zakończenia przedsięwzięcia i analogicznie w przypadku funkcji malejących. Wielkość tak określonej zbieżności została zbadana nie tylko na końcu realizacji inwestycji, ale również w kwartylach ich przebiegu.

8.2. Przegląd literatury w zakresie szacowania kosztu i terminu inwestycji budowlanych

Wiedza na temat całkowitego kosztu przedsięwzięcia budowlanego oraz terminu jego zakończenia, na różnych etapach jego realizacji jest kluczowym elementem procesu zarządzania inwestycjami. Możliwe jest wówczas podjęcie odpowiednich środków zaradczych w przypadku gdy uzyskane informacje są nie do zaakceptowania. Dlatego na przestrzeni lat tematyka związana z czynnikami wpływającymi na szacowanie kosztów inwestycji budowlanych, zagadnienia wpływu zróżnicowania typów przedsięwzięć budowlanych na ich harmonogram, problematyka wyzwań i ograniczeń obecnych metod szacowania kosztów i terminu oraz pojawiających się technologii i metodologii poprawy dokładności szacowania obu wartości były wielokrotnie w literaturze podejmowane.

8.2.1. Szacowanie ostatecznego kosztu i terminu przedsięwzięć budowlanych różnymi metodami

Wśród tych analiz na uwagę zasługuje wielowymiarowe modelowanie przewidywania kosztów (F. Jiang i in., 2022). Badanie koncentrowało się na analizie kosztów budowy przy użyciu wielowymiarowych modeli predykcji kosztów w celu prognozowania wskaźnika kosztów budowy (CCI) i innych zmiennych mających na niego wpływ.

W innym badaniu przeprowadzono analizę bibliometryczną w celu zidentyfikowania trendów w kosztach budowy, w tym rosnącego znaczenia takich tematów jak modelowanie informacji o budynku (BIM) i ocena cyklu życia (LCA) (Bottero i in., 2021). Ze względu na dużą liczbę opracowań związanych z tym tematem, przegląd literatury został przeprowadzony

na trzech różnych poziomach: pierwszy z nich bada w szerszy sposób wartość kosztów, drugi analizuje koszty w produkcji budowlanej i infrastrukturze, podczas gdy trzeci koncentruje się na podejściach ewaluacyjnych i nowych trendach pojawiających się w literaturze.

W jednym z artykułów zidentyfikowano 19 wskaźników wpływających na szacowanie kosztów projektu budowlanego i podkreślono wpływ czynników organizacyjnych na dokładność szacowania (Gao i in., 2022). Stwierdzono, że niepewność zachowań czynników organizacyjnych ma największy wpływ na szacowanie kosztów. Fakt ten powinien zostać uwzględniony w celu zwiększenia dokładności szacowania kosztu inwestycji.

Badania nad projektami budownictwa mieszkaniowego jednorodzinnego wykazały, że informacje charakterystyczne dla projektu, dane historyczne dotyczące kosztów i doświadczenie kosztorysanta znacząco wpływają na dokładność szacunków kosztów (Lim i in., 2016). Stwierdzono, że wiele czynników kosztotwórczych lub czynników niepewności kosztów zidentyfikowanych w literaturze dla dużych projektów nie jest tak oczywistych i istotnych dla małych projektów budownictwa mieszkaniowego. Ponadto zauważono brak badań nad dokładnością szacunków kosztów na wczesnym etapie inwestycji oraz istotnością i aplikacyjnością czynników generujących koszty w projektach budownictwa mieszkaniowego.

Czynniki wpływające na dokładność szacunków były przedmiotem badań przeprowadzonych w Jordanii (Bakr, 2019). Wykazano, że poziom doświadczenia zespołu szacującego, możliwości finansowe klienta, doświadczenie projektantów, czas przeznaczony na szacowanie, stopień skomplikowania projektu oraz dostępność i ceny robocizny oraz materiałów są najważniejszymi czynnikami, które wpływają na dokładność szacowania kosztów w inwestycjach publicznych.

Zarządzanie ryzykiem kosztowym nie jest bezpośrednio powiązane z szacowaniem kosztu i terminu zakończenia inwestycji, ale może mieć wpływ na obie te wielkości. Czteroetapowa metoda badawcza została wykorzystana do analizy ryzyka kosztowego w projektach budowlanych, podkreślając znaczenie uwzględnienia wymiaru ekonomicznego, środowiskowego i społecznego w zrównoważonych projektach budowlanych (Górecki & Díaz-Madroño, 2020). Efektem przeprowadzonej analizy jest konkluzja, że zmienny rozkład prawdopodobieństwa poszczególnych składników generujących koszty może obejmować aspekty ekonomiczne, technologiczne i organizacyjne.

Metody szacowania kosztów inwestycji odnoszą się nie tylko do fazy realizacji, ale też do fazy projektowej. Opracowano procedury generowania parametrycznej reprezentacji modeli informacyjnych robót budowlanych i elementów konstrukcyjnych budynków, aby wspomóc w opracowywaniu modeli kosztowych (Tyurin, 2022). W efekcie zaprezentowano sposoby zarządzania szacunkowymi kosztami na wczesnym etapie realizacji projektu.

Prognozowanie przebiegu krzywej kosztów to kolejna analiza ściśle powiązana z predykcją ostatecznego kosztu przedsięwzięcia budowlanego (Szóstak, 2023a). Opracowano procedurę prognozowania rozkładu skumulowanych kosztów na etapie planowania projektów budowlanych z wykorzystaniem obwiedni i krzywych kosztów dla różnych typów budynków ujętych w określonych grupach typologicznych. Autor wyznaczył krzywą najlepszego dopasowania oraz przedział, który wyznacza obszar prawidłowego planowania skumulowanych kosztów inwestycji dla kilku typów przedsięwzięć budowlanych.

8.2.2. Szacowanie ostatecznego kosztu i terminu zakończenia przedsięwzięć budowlanych z wykorzystaniem metody EVM

Poza omówionymi powyżej różnorodnymi ścieżkami analiz, które w pośredni lub bezpośredni sposób odnoszą się do zagadnień związanych z szacowaniem całkowitego kosztu i terminu zakończenia inwestycji, należy wspomnieć o wyróżniającej się i często stosowanej Metodzie Wartości Wypracowanej (EVM). Prezentuje ona metodologię, która integruje pomiary zakresu, harmonogramu i zasobów w celu oceny wydajności projektu i postępu w projektach budowlanych (Proaño-Narváez i in., 2022, Czemplik, 2014, Priyo, 2021). Wśród współczynników opisujących wiele aspektów przebiegu przedsięwzięcia budowlanego znajduje się parametr ETTC, który za pomocą prostych obliczeń pozwala na oszacowanie terminu jego zakończenia. Na przestrzeni lat sposób jego wyznaczania ulegał ewolucji w kierunku bardziej precyzyjnego określenia jego wartości.

Zaproponowano nowe narzędzia do zarządzania rezerwami kosztu i czasu projektu poprzez wprowadzenie wskaźnika kosztów i wskaźnika harmonogramu (W. H. Lipke, 1999). Pozwalały one ustalić poziom zatrudnienia umożliwiając zakończenie inwestycji w planowanym terminie utrzymując jednocześnie założony koszt.

Ocena skuteczności pięciu metod prognozowania opartych o metodę EVM została przeprowadzona w oparciu o kryteria takie jak średni błąd kwadratowy, średnie odchylenie bezwzględne i średni bezwzględny błąd procentowy (Zwikael i in., 2000). Wydajność pięciu modeli prognostycznych zaczerpniętych z literatury oceniono na podstawie danych z próby badawczej uzyskanej z rzeczywistych projektów. Analiza przeprowadzona przez autorów wykazała wyraźnie, że najdokładniejsze szacunki to te uzyskane przy założeniu, że odchylenia kosztów będą narastały w stałym tempie. Późniejsza analiza stabilności sugeruje, że dokładność ostatecznego oszacowania kosztów poprawia się po upływie 60% czasu trwania projektu.

Zdefiniowanie wskaźników kosztów i harmonogramu (CPI/SPI) na etapie projektu oraz dla kamieni milowych posłużyło do oceny wydajności projektu (Chang, 2001). Zakresy wartości, reprezentujące różne stopnie wydajności, zostały określone na podstawie powiązanych badań i przetestowane w oparciu o rzeczywiste dane. Wyniki pokazują, że wartości i wyniki uzyskane z określonych zakresów skutecznie różnicują wydajność, co oznacza, że wskaźniki CPI/SPI oraz zakresy zostały właściwie zdefiniowane.

Badano również możliwość zastosowania EVM w różnych kontekstach organizacyjnych i projektowych. Wykazano, że model może być stosowany bez większych modyfikacji przy wdrażaniu EVM w projektach o różnej wielkości lub rodzaju (E. H. Kim i in., 2003). Warunkiem dokładności szacowanych parametrów jest jednak kultura organizacyjna oraz skrupulatność prowadzonego monitoringu inwestycji.

W kolejnym podejściu zasugerowano modele prognozowania oparte na prawdopodobieństwie wystąpienia kosztów i czasu (W. H. Lipke, 2003). Na podstawie bieżących wartości wskaźników CPI i SPI stosowanych w metodzie EVM możliwe jest określenie prawdopodobieństwa sukcesu zakończenia inwestycji zarówno w odniesieniu do planowanego kosztu jak i terminu.

Zaproponowano model probabilistyczny do prognozowania czasu trwania i kosztów projektu (Barraza i in., 2004). Wykorzystano koncepcję stochastycznych krzywych S (krzywe SS) do określenia prognozowanych szacunków projektu jako alternatywę dla krzywych deterministycznych i tradycyjnych metod prognozowania. Uproszczono zależności pomiędzy

aktualnymi i przyszłymi wielkościami poprzez dostosowanie parametrów rozkładów prawdopodobieństwa przyszłych działań do wskaźników wydajności zrealizowanych robót. Probabilistyczny charakter tego podejścia pozwala dokładniej określić zmienności kosztów i czasu trwania projektu oraz ocenić skuteczność proponowanych działań naprawczych.

Nie przeprowadzono jednak działań mających na celu sprawdzenie skuteczności opracowanej metody na rzeczywistych projektach.

Uwzględnienie zależności czasowej w metodzie EVM poprzez wprowadzenie trzech parametrów zostało zaproponowane jako kolejna metoda pozwalająca na szybsze oszacowanie ostatecznego kosztu i terminu zakończenia projektu (Barraza i in., 2004). Proponowany model szybciej pozwala ocenić skuteczność zmian w harmonogramie mających na celu minimalizację skutków przekroczenia kosztu i terminu inwestycji.

Korzystając z liniowego podejścia do modelowania i bazując na danych pozyskanych z wielu rzeczywistych projektów, określano wielkości wartości planowanej (PV) i badano korelacje między PV a innymi wskaźnikami metody EVM (H. L. Chen, 2014). Takie podejście znacznie zwiększyło dokładność prognozowania wartości wypracowanej (EV) i kosztu rzeczywistego (AC), a w konsekwencji również pozostałych wskaźników metody EVM.

Wskaźnik CPI jest wiodącym parametrem, który ma istotny wpływ na prognozowanie przebiegu dalszych postępów inwestycji. Od niego zależy również wiarygodność analiz efektywności kosztowej i prognoz dla skutecznej kontroli projektów budowlanych. Zaproponowany model analityczny oparty na symulacji ocenia prawdopodobieństwo, że wskaźnik CPI indywidualnego projektu stanie się stabilny w określonym czasie jego trwania. W efekcie zwiększa się wiarygodność wszystkich analiz opartych na CPI w zarządzaniu wartością wypracowaną (B.-C. Kim, 2016).

Bazując na danych pozyskanych z rzeczywistego projektu, będącego studium przypadku, przeprowadzono analizę porównawczą wyników uzyskanych zaproponowaną autorską metodą opartą na Metodzie Wartości Wypracowanej z tradycyjnym podejściem EVM (Huang i in., 2014). Wykazano, że kadra zarządzająca była w stanie uzyskać dokładne informacje na temat szczegółowego przebiegu projektu, a tym samym ograniczyć ryzyko w decyzjach podejmowanych w krytycznych momentach projektu. Potwierdzono tym samym skuteczność proponowanej metody w monitorowaniu i zarządzaniu przedsięwzięciem.

8.3. Szacowanie ostatecznego kosztu i terminu zakończenia przedsięwzięć budowlanych

Ostateczny koszt i termin zakończenia są bardzo cenną informacją dla kadry zarządzającej przedsięwzięciami, dająca odpowiedź na pytanie czy planowany budżet i harmonogram zostaną utrzymane. Szacowanie tych parametrów w trakcie przebiegu przedsięwzięcia budowlanego umożliwia odpowiedź na następujące pytania:

- Dla jakich wartościach przekroczeń kosztu mierzonych w kwartylach czasu realizacji rzeczywisty koszt przedsięwzięcia budowlanego (EAC) będzie tożsamy z kosztem planowanym?
- Przy jakich przekroczeniach czasu mierzonych w 4 kwartylach czasu realizacji rzeczywisty termin przedsięwzięcia budowlanego będzie tożsamy z terminem planowanym?

Z pomocą przychodzi metoda EVM stosowana przez Bankowego Inspektora Nadzoru. Pierwszą grupą parametrów tej metody są wskaźniki służące do monitorowania postępu prac.

Do drugiej grupy zaliczają się wskaźniki które służą do prognozowania zarówno kosztów jak i postępu prac na podstawie danych z krzywych ACWP, BCWS i BCWP. Literatura (Połoński M. & Komendarek P., 2011) podaje szereg zmodyfikowanych wzorów, które w zależności od dotychczasowego przebiegu inwestycji pozwalają na bardziej precyzyjne oszacowanie jej kosztu i czasu trwania.

Wskaźnikami najczęściej używanymi do prognozy są EAC (Estimate at Completion) – szacowany ostateczny koszt przedsięwzięcia (wzór 8.1. lub 8.2.) wyznaczany za pomocą dwóch zależności:

$$EAC = \frac{BAC}{CPI} \quad [8.1.]$$

lub

$$EAC = AWCP + \frac{(BAC - BCWP)}{CPI} \quad [8.2.]$$

gdzie: BAC – planowany całkowity koszt przedsięwzięcia, CPI – wskaźnik wykorzystania kosztu, AWCP – rzeczywisty koszt wykonanych prac, BCWP – planowany koszt wykonanych prac.

oraz ETTC (Estimate Time at Completion) – szacowany całkowity czas trwania przedsięwzięcia (wzór 8.3.), obliczany z poniższego równania:

$$ETTC = ATE + \frac{[OD - (ATE \cdot SPI)]}{SPI} \quad [8.3.]$$

gdzie: ATE – czas od rozpoczęcia inwestycji do dnia kontroli, OD – planowany całkowity czas realizacji, SPI – wskaźnik wykonania harmonogramu

Wskaźnik EAC wyznaczany ze wzoru [8.1.] zakłada wyznaczenie szacowanego kosztu inwestycji w oparciu o dotychczasowy trend kreowany przez wskaźnik CPI. W celu oszacowania ostatecznego kosztu przedsięwzięcia w poszczególnych kwartylach jego przebiegu należy w pierwszej kolejności ustalić jaka jest wartość rzeczywistego kosztu wykonanej pracy (AWCP) oraz wskaźnik wykorzystania kosztu (CPI) w analizowanym punkcie czasu. Następnie w zależności od wartości wskaźnika CPI można wyznaczyć optymistyczną i pesymistyczną prognozę kosztu EAC. W przypadku, gdy inwestycja jest realizowana z przekroczeniem kosztu (CPI < 1), wariant optymistyczny jest obliczany z zależności [8.1.], a pesymistyczny z [8.2.]. Jeśli CPI ≥ 1, wówczas wariant optymistyczny obliczany jest ze wzoru [8.2.], a pesymistyczny z [8.1.]. Zaleca się, aby nie stosować optymistycznego wariantu w sytuacji, gdy rzeczywisty przerób robót jest mniejszy niż planowany.

Wskaźnik ETTC wyznaczany za pomocą wzoru [8.3.] poprzez uwzględnienie wskaźnika wykorzystania harmonogramu SPI zakłada utrzymanie się dalszego tempa prac na tym samym poziomie.

8.3.1. Wyznaczanie szacowanego kosztu przedsięwzięcia EAC

Do wyznaczenia ostatecznego kosztu przedsięwzięcia zastosowano podstawowy wzór [8.1.], wynikający bezpośrednio z założeń metody EVM. W poniższej tabeli (tab. 8.1.) zaprezentowano wyniki przeprowadzonych analiz. W ich toku wyznaczono wartości szacowanego kosztu ostatecznego w kolejnych kwartylach dla wszystkich inwestycji z grupy badawczej (kolumny EAC_Q1 do EAC_Q3). Następnie uzyskane w ten sposób wartości

zredukowano dzieląc je przez planowany koszt całej inwestycji (kolumny EAC_Q1R – EAC_Q3R).

Tabela .8.1 Tabelaryczne zestawienie wyników obliczeń szacowanego ostatecznego kosztu inwestycji (EAC) wraz z przekształceniami.

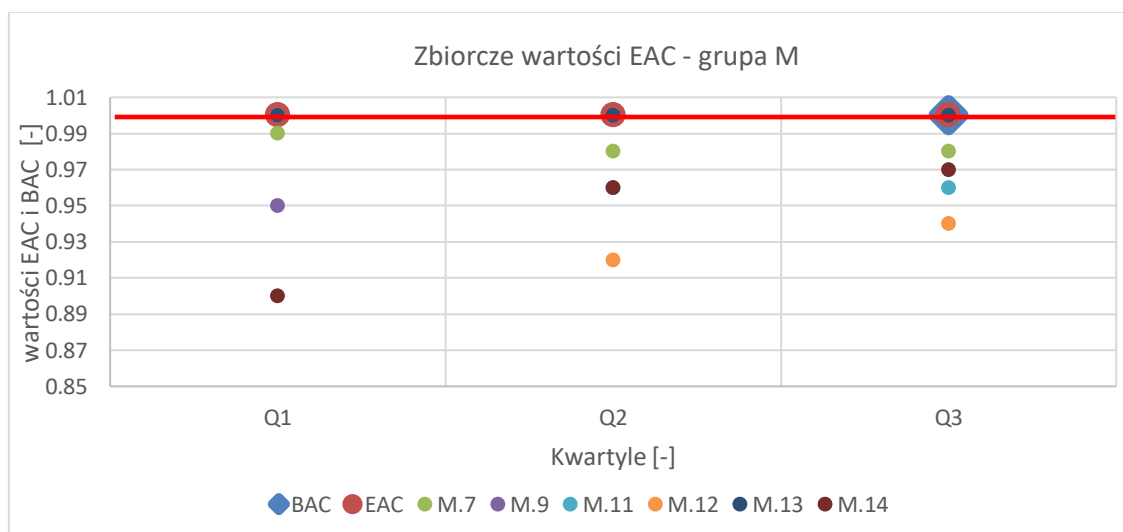
NR	Obiekt	EAC_Q1	EAC_Q2	EAC_Q3	EAC_Q1 R	EAC_Q2 R	EAC_Q3 R	EAC_Q1 ŚR	EAC_Q2 ŚR	EAC_Q3 ŚR
1	M.1	17002557,00	17002557,00	17002557,00	1	1	1	0,99	0,99	0,99
2	M.2	12580328,73	12579195,77	12580840,11	1	1	1			
3	M.3	15231003,00	15231003,00	15231003,00	1	1	1			
4	M.4	74872192,04	74872192,04	74872192,04	1	1	1			
5	M.5	1093948,99	1093948,99	1093948,99	1	1	1			
6	M.6	19432197,00	19432197,00	19432197,00	1	1	1			
7	M.7	14577259,20	14705224,10	14746198,89	0,99	0,98	0,98			
8	M.8	5900000,00	5900000,00	5900000,00	1	1	1			
9	M.9	17864210,53	16971000,00	15962372,89	0,95	1	1,06			
10	M.10	8517838,00	8517838,00	8517838,00	1	1	1			
11	M.11	7095022,00	7422792,25	7423342,80	1	0,96	0,96			
12	M.12	17133356,00	18660407,21	18192780,07	1	0,92	0,94			
13	M.13	9846580,14	9846580,14	9846580,14	1	1	1			
14	M.14	22458456,79	21036610,94	20852696,08	0,9	0,96	0,97			
15	O.1	51837169,32	46500961,15	52587528,52	1,04	1,16	1,03	1	1	1
16	O.2	27698282,43	21262615,23	22297655,66	0,84	1,1	1,04			
17	O.3	23603774,35	24001521,26	24553200,00	1,04	1,02	1			
18	O.4	61200951,65	69455926,89	64219136,60	1	0,88	0,95			
19	H.1	43622365,98	56418260,00	47278196,04	0,97	0,75	0,89	0,97	0,97	0,99
20	H.2	19422695,35	19418582,32	19441316,61	1	1	1			
21	H.3	14670506,00	14357543,03	14035542,99	1	1,02	1,05			
22	H.4	22348090,65	18772396,15	20858217,94	0,84	1	0,9			
23	H.5	19397717,04	18832734,99	18832734,99	1	1,03	1,03			
24	H.6	27548670,90	27548670,90	27548670,90	1	1	1			
25	H.7	48739724,74	48739724,74	48739724,74	1	1	1			
26	H.8	38534785,20	38534785,20	36505656,88	0,95	0,95	1			
27	H.9	42023393,72	42023393,72	42023393,72	1	1	1			
28	G.1	129094265,82	136405629,43	145161290,32	1,05	0,99	0,93	1,03	1,00	1,04
29	G.2	65000000,00	58876969,96	58408171,96	1	1,1	1,11			
30	G.3	16000000,00	17391304,35	16518959,30	1	0,92	0,97			
31	G.4	186518999,02	186518999,02	184972945,08	1	1	1,01			
32	G.5	16447670,89	16178891,37	15947938,97	1,06	1,08	1,09			
33	G.6	1168496,92	1168499,42	1168499,60	1,05	1,05	1,05			
34	G.7	52000000,00	46802719,86	46798271,78	1	1,11	1,11			
35	G.8	37733900,62	51764600,70	38914351,90	1,04	0,76	1,01			
36	L.1	3634906,90	2932328,84	3013586,18	0,97	1,21	1,17	0,99	1,03	1,03
37	L.2	8910214,50	8910214,50	8910214,50	0,99	0,99	0,99			
38	L.3	35307208,00	35307208,00	35307208,00	1	1	1			
39	L.4	27103060,00	27103060,00	27103060,00	1	1	1			
40	L.5	16389470,17	16389470,17	16389470,17	1	1	1			
41	L.6	43002000,00	43002000,00	43002000,00	1	1	1			

Ostatnią grupą danych przedstawionych w tabeli są uśrednione dla poszczególnych grup obiektów wartości zredukowanego EAC (kolumny EAC_Q1ŚR – EAC_Q3ŚR). Pozwoliło to na bardziej przejrzystą i ujednoliconą prezentację wyników względem poszczególnych grup. Ostatnim etapem analizy było wyznaczenie średnich wartości wskaźników w poszczególnych

kwartylach dla każdej grupy inwestycji. Wartość „1” oznacza, że szacowany ostateczny koszt inwestycji jest równy kosztowi planowanemu.

Rezultaty badań zaprezentowano na wykresach zbiorczych, opracowanych dla każdej grupy inwestycji. Czerwona linia na wykresach wyznacza poziom, w którym wartość szacowana jest tożsama z wartością planowaną (BAC).

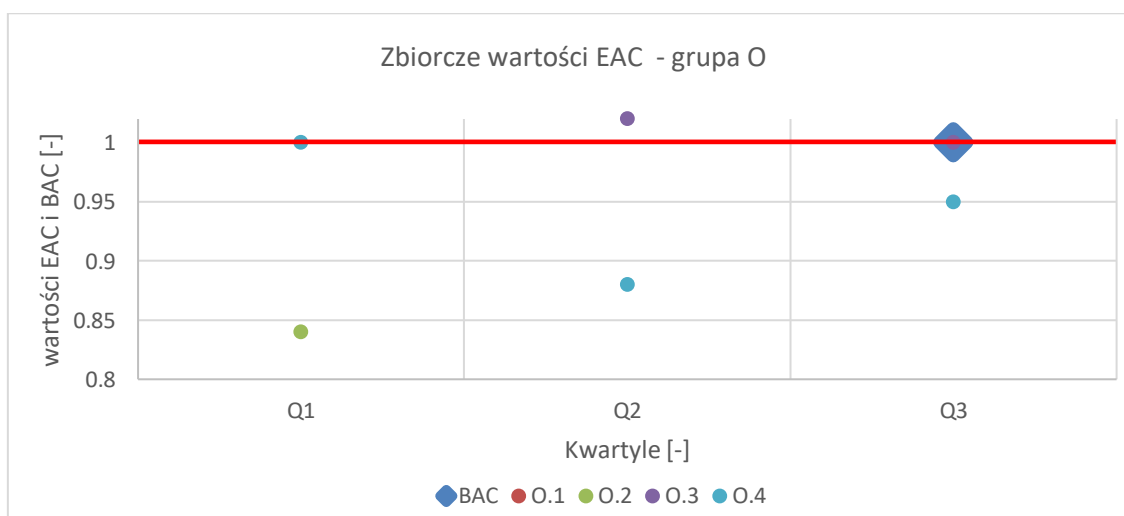
W grupie budynków mieszkalnych (M) zaobserwowano dużą rozpiętość wartości EAC – 1 (w pierwszym kwartylu), która zmniejszała się w kolejnych, by następnie znacząco zbliżyć się do planowanej wartości BAC (rys.8.1.).



Rysunek 8.1. Zbiorcze zestawienie wartości szacowanego kosztu przedsięwzięcia (EAC) na tle planowanego kosztu inwestycji (BAC) dla grupy budynków mieszkalnych (M).

Na uwagę zasługuje również fakt, że niemal w każdym przypadku, we wszystkich kwartylach, wskaźniki wartości EAC osiągały wartości mniejsze niż „1”. Wynika to bezpośrednio z niższego niż planowane tempa robót. Obserwuje się tendencję zbieżności kosztu szacowanego do wartości kosztu planowanego wraz z postępem inwestycji.

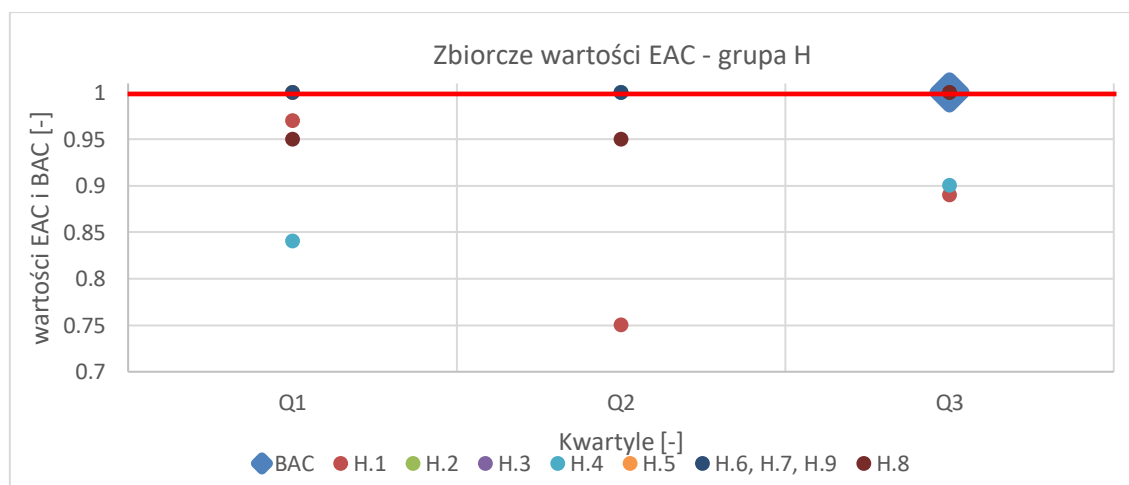
W kolejnej analizowanej grupie, budynkach biurowych (O), zaobserwowano nieco inną prawidłowość (rys. 8.2.).



Rysunek 8.2. Zbiorcze zestawienie wartości szacowanego ostatecznego kosztu przedsięwzięcia (EAC) na tle planowanego kosztu inwestycji (BAC) dla grupy budynków biurowych (O).

Na wykresie przedstawiającym zbiorcze zestawienie wartości EAC w poszczególnych kwartylach przebiegu inwestycji obserwuje się wyraźną rozbieżność między kosztem szacowanym a planowany w pierwszym kwartyli. W kolejnych kwartylach wartości EAC oraz BAC są tożsame. Oznacza to, że szacowanie kosztu inwestycji, poza pierwszym kwartyłem, pozwala na uzyskanie prawidłowego wyniku.

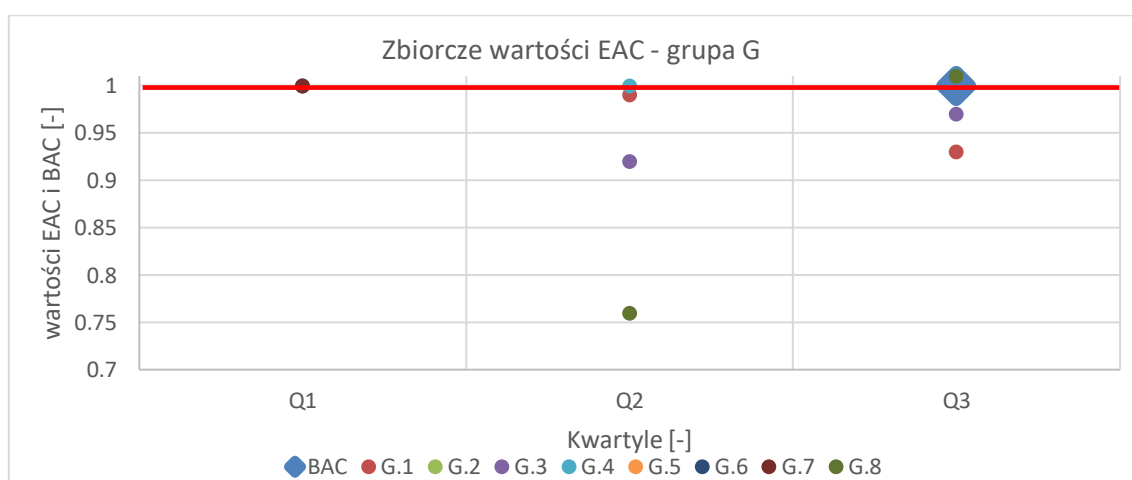
Kolejną grupą obiektów poddanych analizie szacowania kosztu inwestycji na określonych etapach realizacji są budynki hotelowe (H).



Rysunek 8.3. Zbiorcze zestawienie wartości szacowanego ostatecznego kosztu przedsięwzięcia (EAC) na tle planowanego kosztu inwestycji (BAC) dla grupy budynków hotelowych (H).

Wartości wskaźnika EAC zaprezentowane zbiorczo na rys. 8.3. pokazują, że we wszystkich badanych inwestycjach koszt szacowany jest zbliżony do kosztu planowanego w kolejnych kwartylach. Jest to spowodowane brakiem przekroczeń kosztu w analizowanych inwestycjach.

W grupie centrów handlowych (G) największe wahania wartości szacowanego kosztu przedsięwzięć budowlanych zawierające się w przedziale 0,76 – 0,97 obserwowane są w drugim kwartyli (rys. 8.4.).

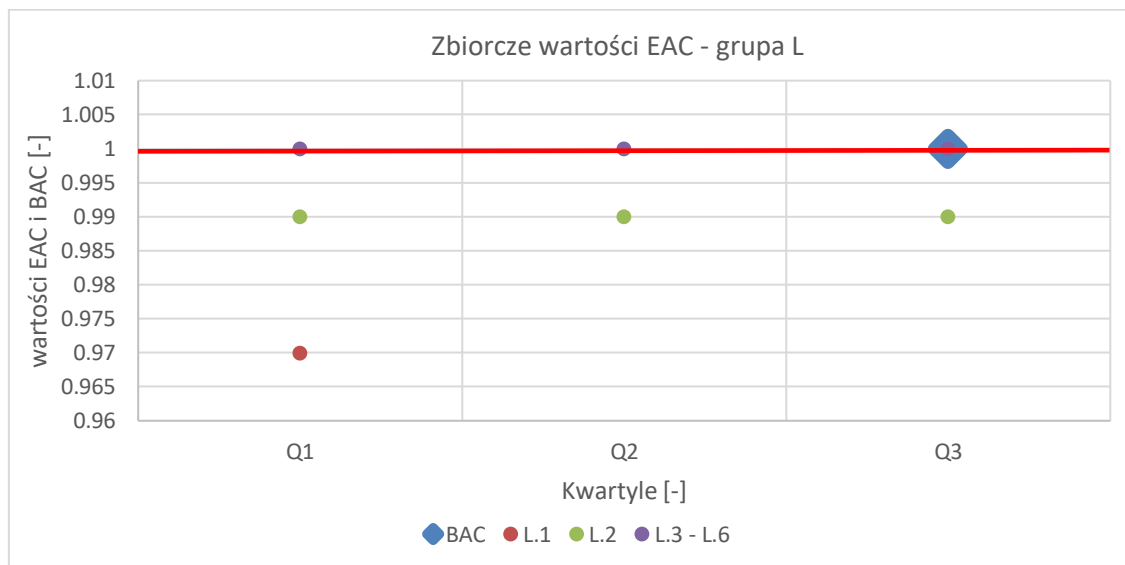


Rysunek 8.4. Zbiorcze zestawienie wartości szacowanego ostatecznego kosztu przedsięwzięcia (EAC) na tle planowanego kosztu inwestycji (BAC) dla grupy centrów handlowych (G).

W trzecim kwartyli obserwuje się przybliżanie kosztu szacowanego do BAC. Można zatem stwierdzić, że szacowany koszt inwestycji aktualizowany wraz z jej postępem zbliża się

do wartości planowanej. Stwierdzono, że w 50% przypadków szacowany w poszczególnych kwartylach koszt przedsięwzięć był wyższy niż koszt planowany, a 30% wartości było tożsame z wartością BAC.

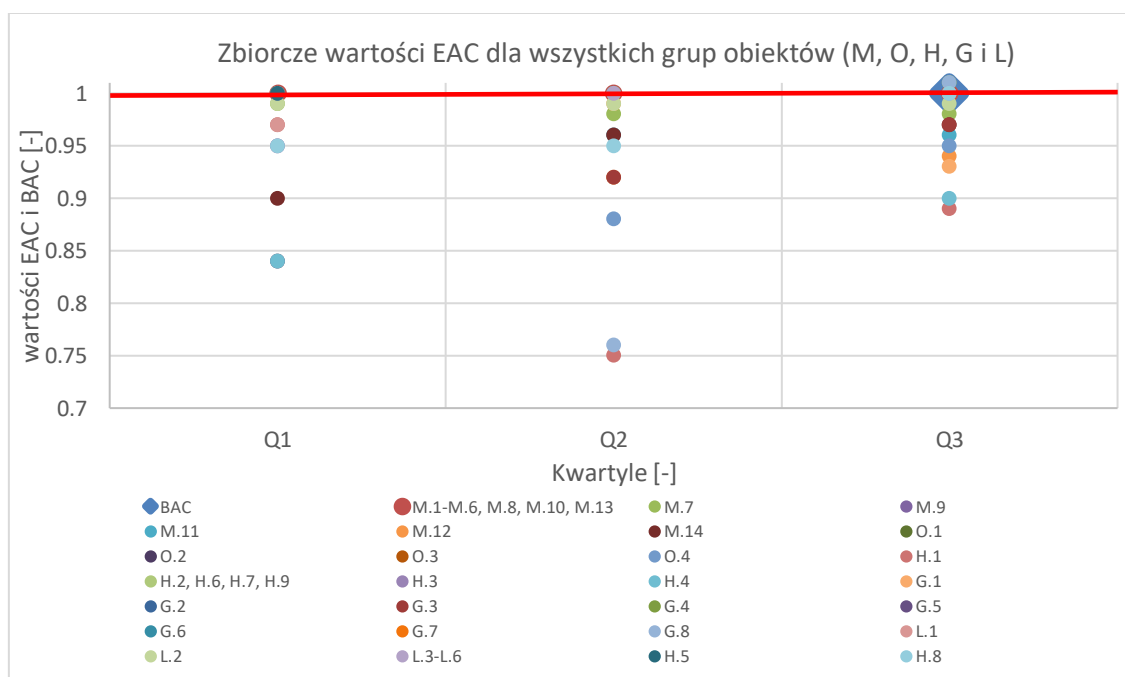
Ostatnia grupa obiektów – centra logistyczne (L) – wpisuje się w trend charakteryzujący się zbieżnością wartości EAC do BAC wraz z postępem inwestycji (rys. 8.5).



Rysunek 8.5. Zbiorcze zestawienie wartości szacowanego kosztu przedsięwzięcia (EAC) w poszczególnych kwartylach na tle planowanego kosztu inwestycji (BAC) dla grupy centrów logistycznych (L).

W przypadku jednego przedsięwzięcia obserwuje się znaczące odchylenie kosztu szacowanego od planowanego w pierwszym kwartylu, które niweluje się w ostatnim kwartylu.

W ramach analizy rozkładu wartości szacowanego kosztu przedsięwzięcia zestawiono ze sobą również wyniki ze wszystkich badanych grup obiektów (rys. 8.6.)



Rysunek 8.6. Zbiorcze zestawienie wartości szacowanego kosztu przedsięwzięcia (EAC) w poszczególnych kwartylach na tle planowanego kosztu inwestycji (BAC) dla grup inwestycji M, O, H, G i L

Obserwacja szerokości przedziału wartości EAC w poszczególnych kwartylach potwierdza stopniową zbieżność wartości do planowanego kosztu przedsięwzięcia, ale ta tendencja jest wyraźna dopiero w 3 kwartylu. Tym samym badania autora nie potwierdzają informacji podawanej przez PMI, która mówi, że przy 20% - 25% zaawansowaniu inwestycji użycie metody EVM daje możliwość przewidzenia z dużą dokładnością wyniku końcowego.

8.3.1.1. Wnioski z wyznaczenia szacowanego kosztu przedsięwzięcia EAC

Obserwując zestawienia wartości planowanego kosztu przedsięwzięcia w kwartylach czasu dla poszczególnych grup inwestycji budowlanych sformułowano następujące spostrzeżenia:

- obserwując rozkład EAC w poszczególnych kwartylach widoczna jest zbieżność wartości wraz z postępem inwestycji do kosztu planowanego BAC we wszystkich grupach obiektów;
- we wszystkich badanych grupach przedsięwzięć obserwuje się rozszerzenie przedziałów wartości EAC w 2 kwartylu, a następnie ich zawężenie w 3 kwartylu;
- wyniki uzyskane w poszczególnych grupach inwestycji wykazują różnice w szerokości przedziałów występowania EAC w poszczególnych kwartylach;
- największy przedział wartości EAC w poszczególnych kwartylach obserwuje się w grupie centrów handlowych (G), budynków mieszkalnych (M) i hoteli (H). Jest on tożsamy z szerokością przedziału uzyskaną w całej próbie badawczej bez podziału na poszczególne grupy;
- obserwuje się tendencję do niedoszacowania ostatecznego kosztu przedsięwzięć EAC w 2 i 3 kwartylu. Jest to widoczne w zestawieniach niemal wszystkich grup obiektów za wyjątkiem budynków mieszkalnych (M), gdzie zaobserwowano wyraźne przeszacowanie kosztu.

8.3.2. Wyznaczanie szacowanego czasu trwania przedsięwzięcia ETTC

Szacowany czas trwania przedsięwzięcia został wyznaczony dla każdej inwestycji w oparciu o formułę [8.3.] zaprezentowaną w punkcie 8.3. niniejszego rozdziału. Wyniki analizy przeprowadzonej z podziałem na grupy inwestycji przedstawiono w tabeli tab. 8.2.

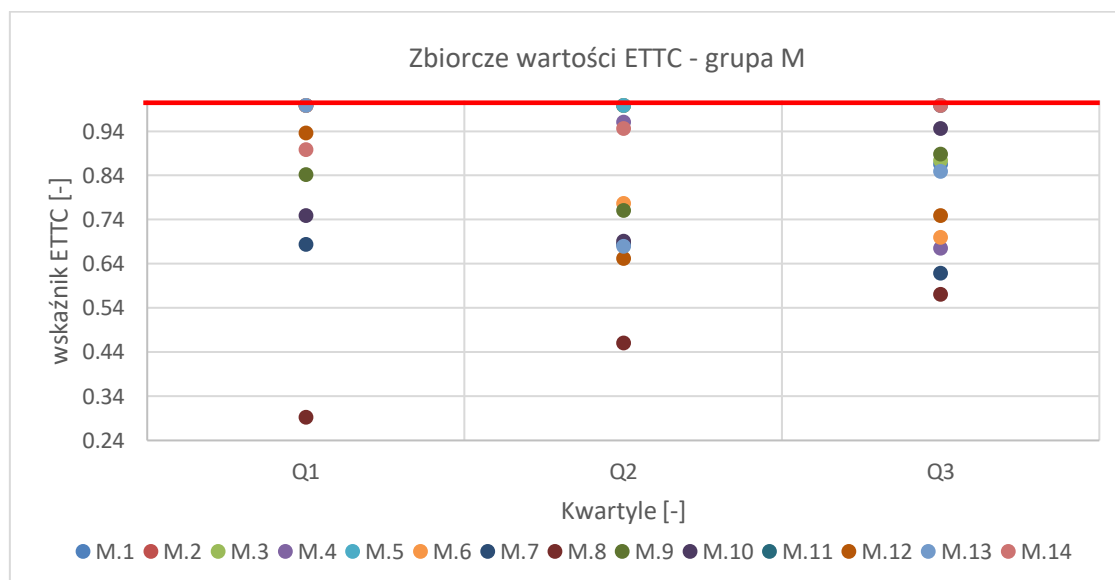
W ramach analizy wyznaczono szacowany czas trwania inwestycji w poszczególnych kwartylach (ETTC – 1 do ETTC – 3) uzyskując wyniki w skali miesięcznej. Z uwagi na różny czas trwania poszczególnych inwestycji, uzyskane wcześniej wartości zredukowano do postaci wskaźnikowej dzieląc czas planowany na wykonanie danej inwestycji przez wartości ETTC uzyskane w poszczególnych kwartylach. Zredukowane wartości uzyskanych wskaźników $ETTC < 1$ świadczą o szacowanym przekroczeniu terminu inwestycji natomiast $ETTC > 1$ o prognozowanym wcześniejszym zakończeniu inwestycji. Ponieważ badania prowadzono w kierunku przekroczeń, na wykresach zaprezentowano wyniki analizy ETTC mniejsze niż „1”.

Tabela 8.2 Tabełaryczne zestawienie wyników obliczeń szacowanego terminu zakończenia inwestycji (ETTC) wraz z przekształceniami.

Nr	Obiekt	SPI_Q1	SPI_Q2	SPI_Q3	BAC	ETTC-1	ETTC-2	ETTC-3	ETTC-1_R	ETTC-2_R	ETTC-3_R
1	M.1	1,00	1,00	0,90	17002557,00	13	13	15	1,00	1,00	0,87
2	M.2	1,00	1,00	1,01	12580200,00	14	14	14	1,00	1,00	1,00
3	M.3	1,36	1,04	0,88	15231003,00	11	14	16	1,27	1,00	0,88
4	M.4	1,42	0,99	0,68	74872192,04	18	26	37	1,39	0,96	0,68
5	M.5	1,21	1,01	1,13	1093948,99	6	7	7	1,17	1,00	1,00
6	M.6	1,03	0,80	0,72	19432197,00	14	18	20	1,00	0,78	0,70
7	M.7	0,69	0,69	0,64	14389720,00	19	19	21	0,68	0,68	0,62
8	M.8	0,30	0,47	0,58	5900000,00	41	26	21	0,29	0,46	0,57
9	M.9	0,85	0,78	0,91	16971000,00	19	21	18	0,84	0,76	0,89
10	M.10	0,77	0,71	0,97	8517838,00	24	26	19	0,75	0,69	0,95
11	M.11	1,84	1,82	1,99	7095022,00	13	13	12	1,77	1,77	1,92
12	M.12	0,94	0,67	0,77	17133356,00	16	23	20	0,94	0,65	0,75
13	M.13	1,00	0,69	0,87	9846580,14	17	25	20	1,00	0,68	0,85
14	M.14	0,90	0,96	1,03	20267522,78	20	19	18	0,90	0,95	1,00
15	O.1	1,00	0,79	0,73	54136619,00	21	27	29	1,00	0,78	0,72
16	O.2	0,61	0,47	0,85	23284800,00	25	32	18	0,60	0,47	0,83
17	O.3	1,50	0,94	0,80	24553200,00	13	21	24	1,46	0,90	0,79
18	O.4	1,00	0,66	0,81	61200951,65	25	38	31	1,00	0,66	0,81
19	H.1	1,00	0,97	0,95	42313695,00	23	23	24	0,96	0,96	0,92
20	H.2	1,00	0,76	0,76	19420387,66	5	7	7	1,00	0,71	0,71
21	H.3	1,00	0,89	0,92	14670506,00	15	17	17	1,00	0,88	0,88
22	H.4	1,00	1,03	1,01	18772396,15	15	14	14	0,93	1,00	1,00
23	H.5	1,02	1,04	1,07	19397717,04	13	13	13	1,00	1,00	1,00
24	H.6	0,91	0,81	0,95	27548670,90	18	20	17	0,89	0,80	0,94
25	H.7	1,02	1,01	0,99	48739724,74	19	19	20	1,00	1,00	0,95
26	H.8	1,00	1,01	1,00	36608045,94	19	19	19	1,00	1,00	1,00
27	H.9	1,04	0,99	0,91	42023393,72	26	28	30	1,04	0,96	0,90
28	G.1	0,81	0,70	0,90	135000000,00	17	19	15	0,76	0,68	0,87
29	G.2	1,00	0,92	0,98	65000000,00	10	11	11	1,00	0,91	0,91
30	G.3	4,08	1,76	0,94	16000000,00	3	6	11	3,33	1,67	0,91
31	G.4	0,71	0,87	0,92	186518999,02	29	23	22	0,69	0,87	0,91
32	G.5	0,94	0,75	0,77	17440000,00	12	15	15	0,92	0,73	0,73
33	G.6	1,00	1,24	1,00	1230000,00	6	5	7	1,00	1,20	0,86
34	G.7	1,00	0,99	0,95	52000000,00	13	14	14	1,00	0,93	0,93
35	G.8	1,00	0,98	0,98	39409285,00	20	20	20	0,95	0,95	0,95
36	L.1	1,10	0,94	0,97	3539000,00	6	7	7	1,00	0,86	0,86
37	L.2	1,23	1,04	0,91	8795000,00	5	6	7	1,20	1,00	0,86
38	L.3	1,00	1,00	0,98	35307208,00	9	9	10	1,00	1,00	0,90
39	L.4	1,00	0,57	0,82	27103060,00	9	16	11	1,00	0,56	0,82
40	L.5	1,01	1,03	1,01	16389470,17	12	12	12	1,00	1,00	1,00
41	L.6	1,00	1,00	0,92	43002000,00	10	10	11	1,00	1,00	0,91

Uzyskane w wyniku obliczeń wartości pozwoliły na ujednocnione i przejrzyste zaprezentowanie wyników analizy w formie wykresów punktowych, dla każdej grupy przedsięwzięć.

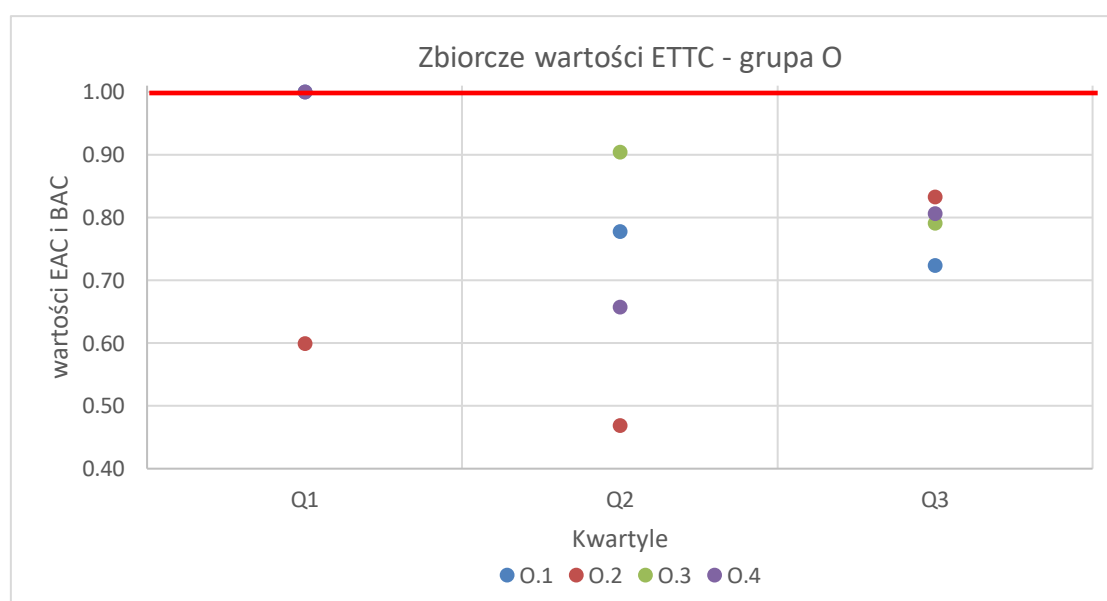
W grupie budynków mieszkalnych (M) obserwuje się szeroką rozpiętość wartości ETTC – 1 osiągającą wartość do 0,29 (rys. 8.7.).



Rysunek 8.7. Zbiorcze zestawienie wartości szacowanego terminu zakończenia przedsięwzięcia (ETTC) w poszczególnych kwartylach dla grupy budynków mieszkalnych (M).

W pozostałych kwartylach wartości ETTC zawierają się w przedziale od około 0,5 do 1,0. Wraz z postępowaniem inwestycji, poza wyraźnym trendem biegnącym w kierunku wartości oczekiwanej, obserwuje się również zmniejszenie liczby przedsięwzięć w których wystąpiło przekroczenie terminu.

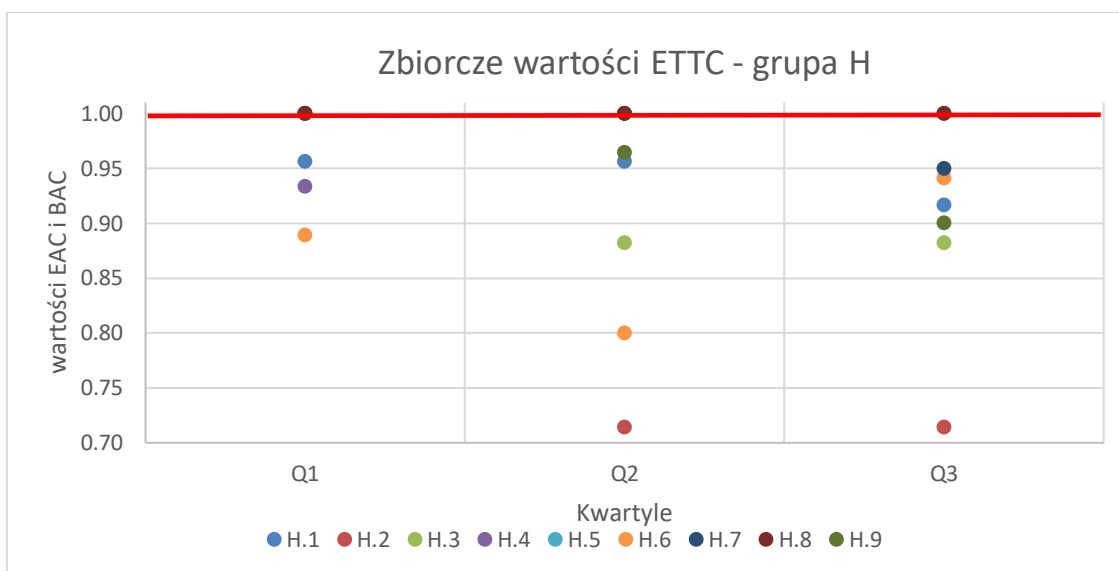
Nieco inną charakterystykę rozkładu wartości ETTC można zaobserwować w grupie budynków biurowych (O) (rys. 8.8.).



Rysunek 8.8. Zbiorcze zestawienie wartości szacowanego terminu zakończenia przedsięwzięcia (ETTC) w poszczególnych kwartylach dla grupy budynków biurowych (O).

Szerokość przedziału wartości w drugim kwartyle wzrasta w odniesieniu do pierwszego kwartyle. W kolejnym kwartyle obserwuje się już zwięzanie przedziału w kierunku wartości oczekiwanej. 75% wartości ETTC – 1 jest tożsamy z wartościami OD. W kolejnych dwóch kwartylach wszystkie uzyskane w toku obliczeń z wartości ETTC wykraczają poza planowany termin zakończenia inwestycji OD.

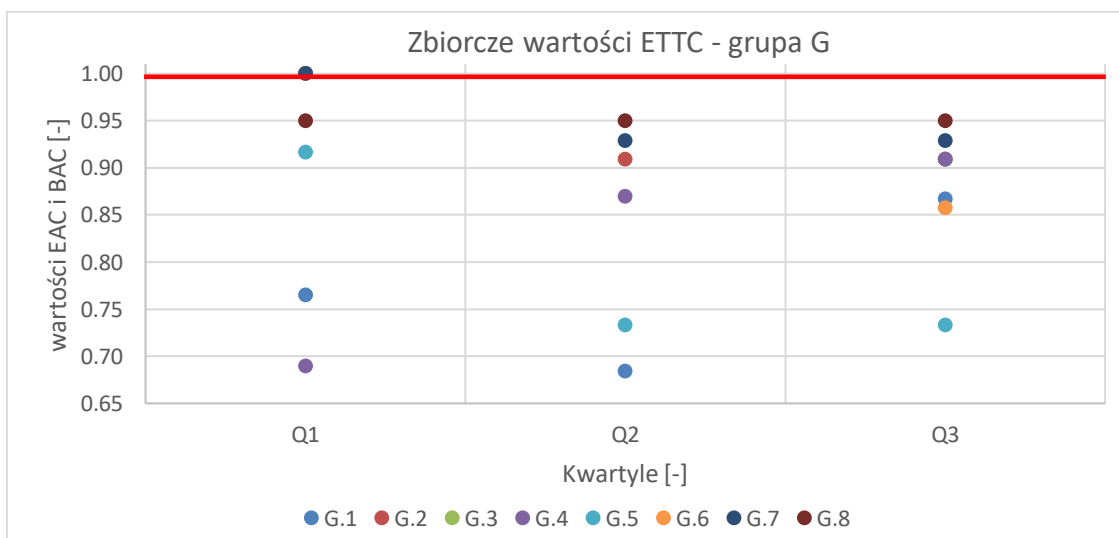
Analizując wartości ETTC w grupie budynków hotelowych (H) (rys. 8.9.), obserwuje się podobny trend przebiegu wartości jak w grupie budynków biurowych (O). Widoczna jest tendencja do zbieżności wartości w ostatnim kwartyle w kierunku wartości planowanej OD.



Rysunek 8.9. Zbiorcze zestawienie wartości szacowanego terminu zakończenia przedsięwzięcia (ETTC) w poszczególnych kwartylach dla grupy budynków hotelowych (H).

Podobnie jak w przypadku dwóch analizowanych wcześniej grup przedsięwzięć, trend przebiegu wartości ETTC w grupie budynków hotelowych (H) jest zbieżny do wartości OD w ostatnim kwartyle.

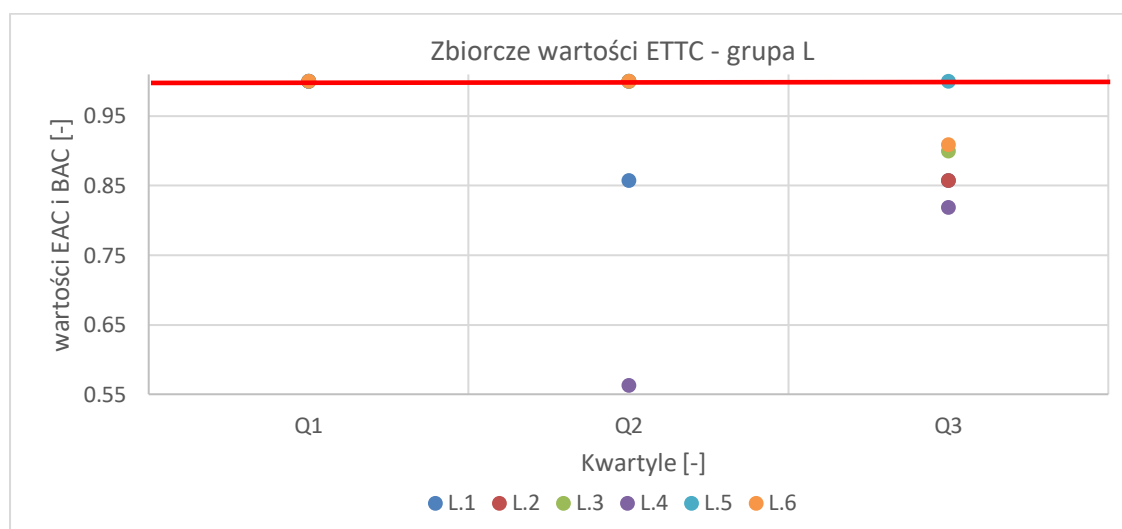
Grupa w której znajdują się centra handlowe (G) charakteryzuje się wartościami ETTC ujętymi w przedziale od 0,68 do 1,0 (rys. 8.10.).



Rysunek 8.10. Zbiorcze zestawienie wartości szacowanego terminu zakończenia przedsięwzięcia (ETTC) w poszczególnych kwartylach dla grupy centrów handlowych (G).

W pierwszym kwartylu dla około 50% inwestycji uzyskano wartość ETTC wykraczającą poza wartość oczekiwaną. W kolejnym kwartylu około 75% inwestycji wykazuje rozbieżność między szacowanym terminem a jego wartością oczekiwaną. Wszystkie wartości ETTC – 3 w trzecim kwartylu wykraczają poza termin planowany, jednak obserwuje się nieznaczne zwięźlenie przedziału wartości w kierunku wartości OD. Zaobserwowany w analizowanej grupie trend w którym wartości szacowanego terminu zakończenia inwestycji szacowane w poszczególnych kwartyłach zbiegają w kierunku wartości oczekiwanej, jest analogiczny do trendów uzyskanych w grypach wcześniejszych.

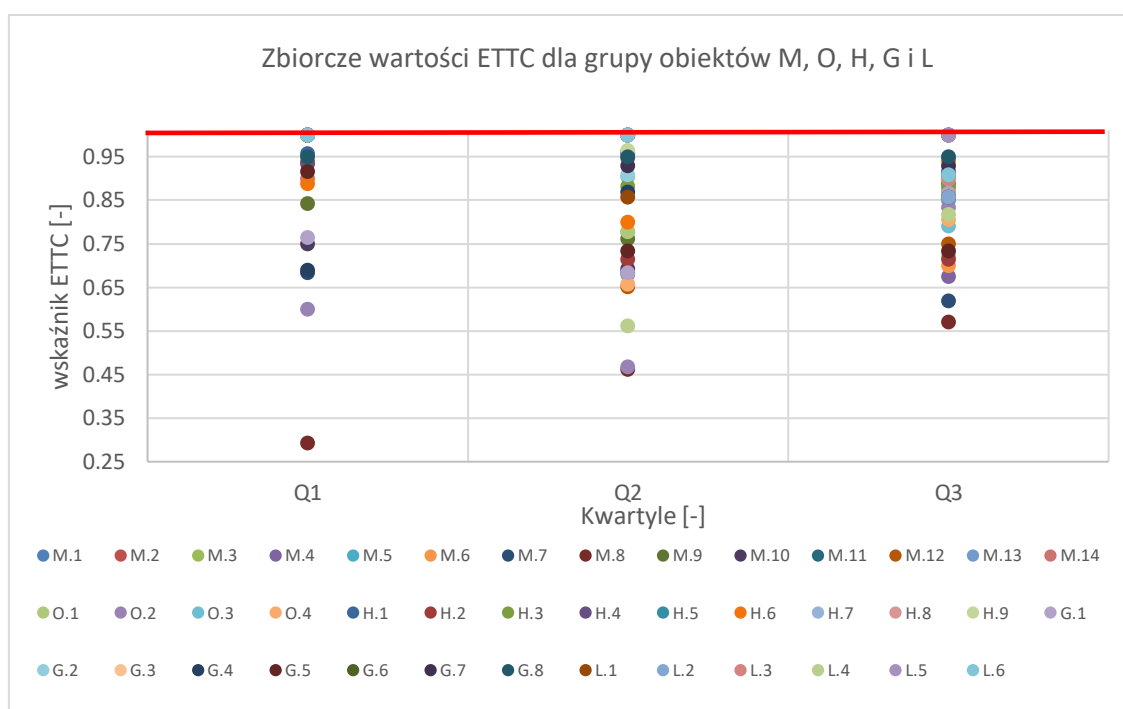
W ostatniej grupie obiektów – centrach logistycznych (L) – obserwuje się, podobnie jak we wszystkich wcześniej analizowanych grupach, tendencję zbieżności szacowanego terminu zakończenia inwestycji ETTC do wartości planowanej OD w ostatnim kwartylu czasu realizacji (rys. 8.11.).



Rysunek 8.11. Zbiorcze zestawienie wartości szacowanego terminu zakończenia przedsięwzięcia (ETTC) w poszczególnych kwartyłach dla grupy centrów logistycznych (L).

Analogii dopatrywać można się również w liczbie przedsięwzięć, dla których szacowany termin zakończenia inwestycji ETTC – 1 jest tożsamy z planowanym czasem trwania inwestycji OD. W przypadku centrów logistycznych taka zależność obserwowana była we wszystkich badanych inwestycjach. W drugim kwartylu obserwuje się przekroczenie wartości szacowanego terminu względem wartości oczekiwanej OD w niemal 33%. W trzecim kwartylu, pomimo zmniejszenia przedziału wartości przekroczeń, aż w 83% analizowanych przedsięwzięć wartość ETTC wykracza poza OD.

W celu nawiązania do stwierdzenia PMI przywołanego w punkcie „1”, dotyczącego precyzji prognozowania terminu zakończenia przedsięwzięć, przeanalizowano wartości szacowanego terminu zakończenia przedsięwzięć poszczególnych inwestycji bez podziału na grupy. Rozkład wartości ETTC w poszczególnych kwartyłach dla obiektów z grup M, O, H, G i L zaprezentowano na rys. 8.12.



Rysunek 8.12. Zbiorcze zestawienie wartości szacowanego terminu zakończenia przedsięwzięcia (ETTC) w poszczególnych kwartyłach dla grup obiektów M, O, H, G i L.

Również w przypadku zbiorczego zestawienia danych z wszystkich analizowanych grup widoczna jest tendencja do zbieżności wartości ETTC do wartości planowanej OD wraz z postępem inwestycji. Wyznaczone wartości wskaźników ETTC – 1 wskazują, że w ponad 32% inwestycji szacowany termin ich zakończenia wykracza poza termin planowany osiągając poziom 0,29. W kolejnych kwartyłach obserwuje się wzrost do wartości około 0,47 (drugi kwartył) i 0,57 (trzeci kwartył).

8.3.2.1. Wnioski z wyznaczania szacowanego czasu trwania przedsięwzięcia ETTC

Analiza wskaźników ETTC pozwoliła na sformułowanie następujących spostrzeżeń:

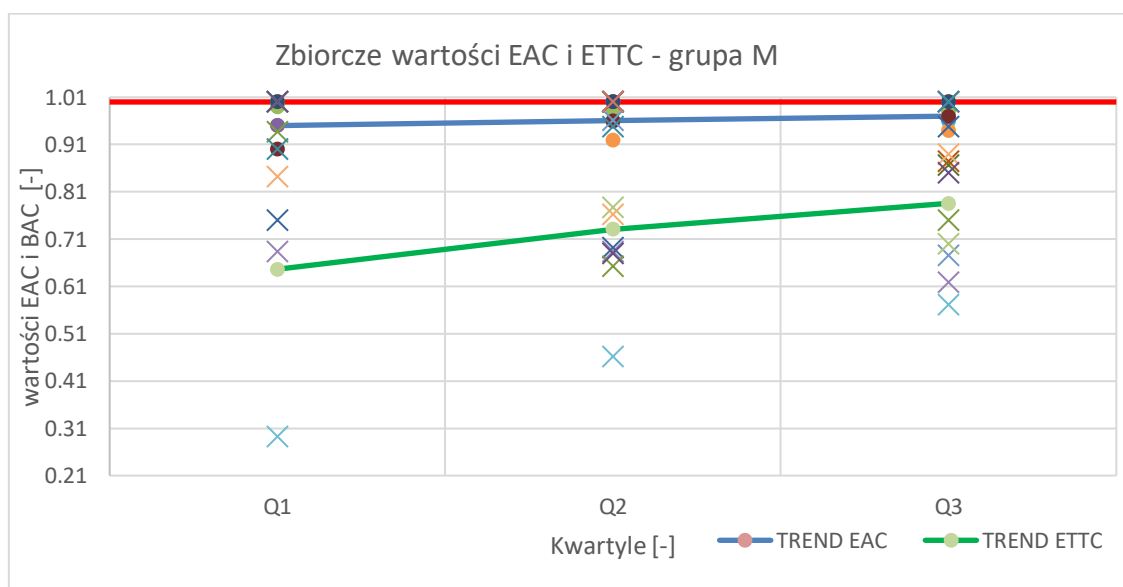
- przebieg wartości wskaźników szacowanego terminu zakończenia inwestycji dla poszczególnych grup przedsięwzięć budowlanych charakteryzuje się podobnym trendem, w którym wraz z postępem robót rozpiętość uzyskanych wartości zwiększa się w drugim kwartył i sukcesywnie ulega zmniejszeniu w kolejnych etapach, zbliżając się do wartości wskaźnika terminu planowanego OD;
- uzyskane wyniki pokazują, że pomimo redukcji rozpiętości przedziału wartości ETTC i zbieżności do terminu planowanego OD w kolejnych kwartyłach, w ostatnim kwartył przedział wartości jest dość szeroki we wszystkich badanych grupach obiektów;
- we wszystkich analizowanych grupach obserwuje się tendencję zbieżności szacowanego terminu zakończenia inwestycji ETTC do wartości planowanej OD, jednak ich dokładność szacowania znacząco odbiega od stwierdzenia przywoływanego przez PMI;
- również we wszystkich analizowanych grupach obiektów obserwuje się tendencję do przeszacowania terminu zakończenia przedsięwzięć w kwartyłach 2 i 3, co jest widoczne również na zbiorczym zestawieniu analizowanej próby badawczej.

8.3.3. Szacowany ostateczny koszt i termin zakończenia przedsięwzięć budowlanych a współzależność przekroczenia kosztu i terminu w zróżnicowanych przedsięwzięciach budowlanych

W przedstawionych powyżej analizach badano szacowanie ostatecznego kosztu przedsięwzięcia i szacunkowego całkowitego czasu jego realizacji w poszczególnych kwartylach. Oba parametry zostały oszacowane w oparciu o wartości wskaźnika wykonania budżetu i wskaźnika wykonania harmonogramu. Zestawiając ze sobą wartości uzyskane w toku odrębnych analiz, podjęto próbę oceny współzależności pomiędzy przedmiotowymi przekroczeniami.

Niniejsza część rozprawy prezentuje zestawienia badanych parametrów opracowane dla każdej grupy obiektów ujętych w próbie badawczej. W celu wyraźnego zróżnicowania wartości szacowanego ostatecznego kosztu przedsięwzięcia (EAC) i szacunkowego czasu jego trwania (ETTC) przyjęto na wykresach oznaczenia w postaci kropek dla pierwszego rodzaju danych i krzyżyków dla rodzaju drugiego.

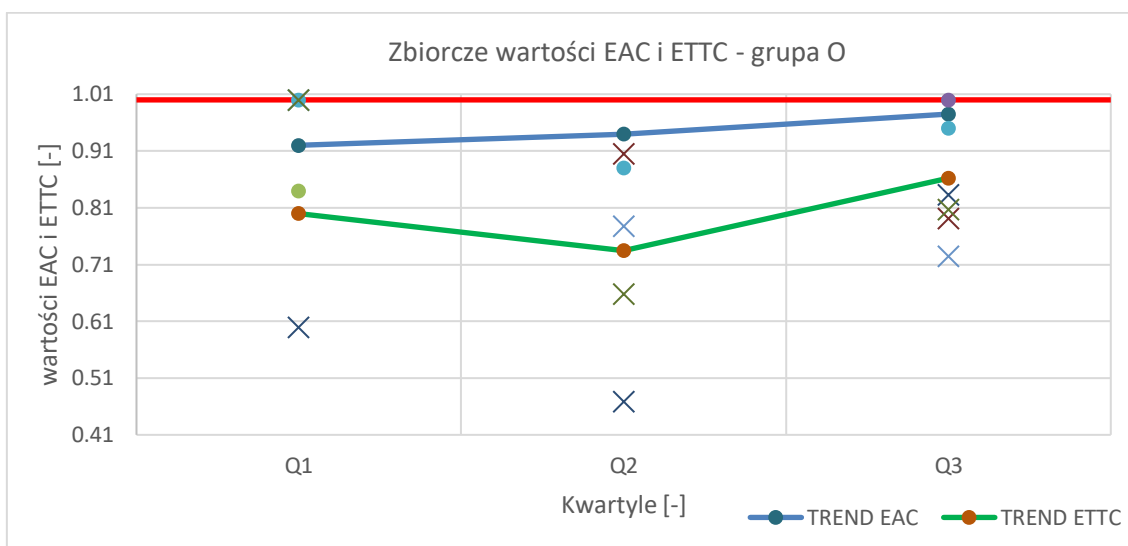
Na rysunku 8.13 zaprezentowano zestawienie EAC i ETTC dla grupy budynków mieszkalnych (M).



Rysunek 8.13. Zbiorcze zestawienie wartości szacowanego całkowitego kosztu (EAC) i szacowanego terminu zakończenia przedsięwzięcia (ETTC) w poszczególnych kwartylach dla grupy budynków mieszkalnych (M).

We wszystkich kwartylach zaobserwowano istotnie większe przedziały wskaźnika ETTC w stosunku do odpowiadających im przedziałów EAC. Żadna z wartości EAC nie pokrywa się z odpowiadającą jej wartością ETTC.

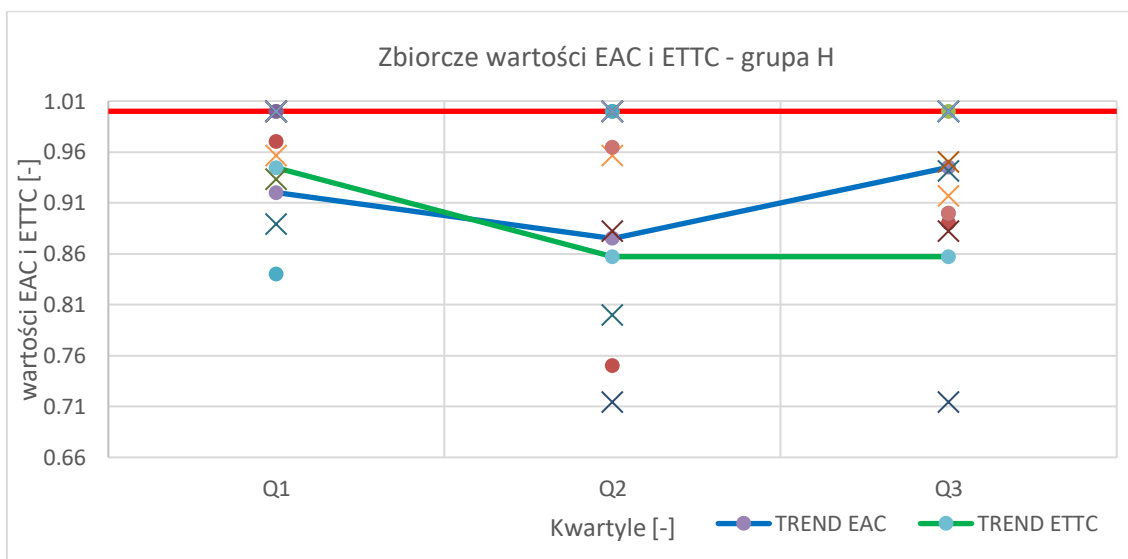
Nieco inną sytuację obserwuje się w grupie budynków biurowych (O) (rys. 8.14)



Rysunek 8.14. Zbiorcze zestawienie wartości szacowanego całkowitego kosztu (EAC) i szacowanego terminu zakończenia przedsięwzięcia (ETTC) w poszczególnych kwartylach dla grupy budynków biurowych (O).

W pierwszym kwartylu występuje wartość EAC istotnie wykraczająca poza wartość oczekiwaną. W kolejnych kwartylach zbliża się ona do wartości BAC. Wskaźniki ETTC wykazują największe odchylenie w drugim kwartylu a w kolejnym zbliżają się do wartości oczekiwanej. Wskaźnikowe wartości EAC nie są tożsame z wartościami ETTC.

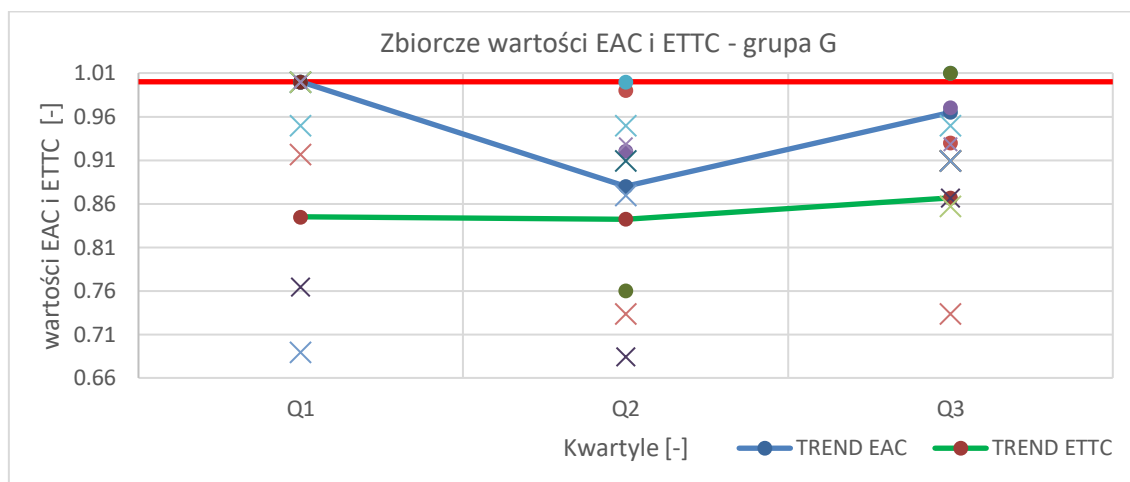
Kolejny wykres (rys. 8.15) przedstawia zbiorcze zestawienie wartości EAC i ETTC dla grupy budynków hotelowych (H).



Rysunek 8.15. Zbiorcze zestawienie wartości szacowanego całkowitego kosztu (EAC) i szacowanego terminu zakończenia przedsięwzięcia (ETTC) w poszczególnych kwartylach dla grupy budynków hotelowych (H).

W pierwszym kwartylu trend przebiegu wartości EAC wskazuje na większy przedział wartości niż w przypadku ETTC. W kolejnych kwartylach większą szerokość przedziału wartości wskaźnika wykazało ETTC. We wszystkich kwartylach zaobserwowano zróżnicowanie pomiędzy szerokością przedziałów wartości EAC i ETTC.

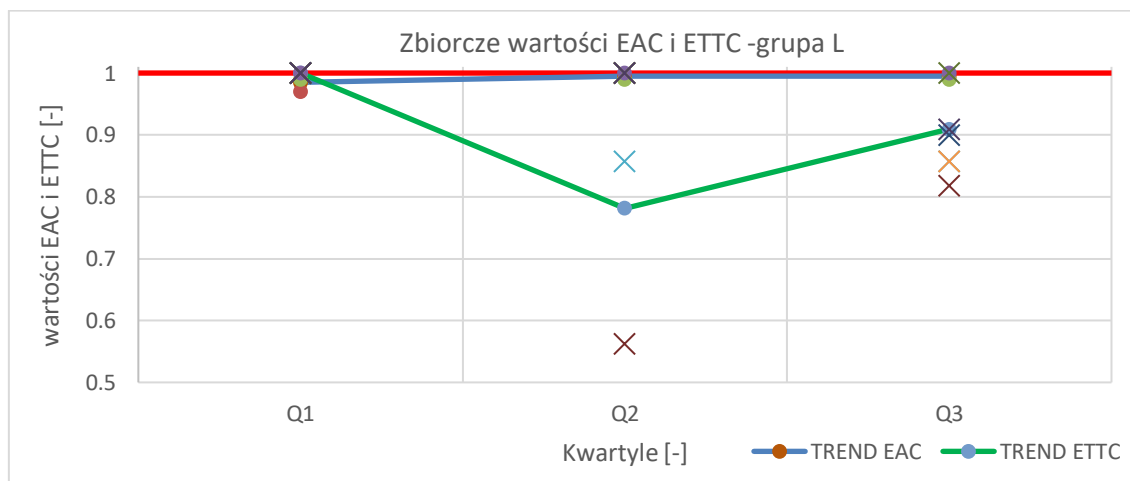
Grupa centrów handlowych (G) charakteryzuje się brakiem przekroczeń wskaźnika EAC w pierwszym kwartylu realizacji przedsięwzięcia.



Rysunek 8.16. Zbiorcze zestawienie wartości szacowanego całkowitego kosztu (EAC) i szacowanego terminu zakończenia przedsięwzięcia (ETTC) w poszczególnych kwartylach dla grupy centrów handlowych (G).

W pozostałych kwartylach zarówno wartości EAC jak i ETTC wykazały przekroczenia. Potwierdza to analiza wykresu na rys. 8.16, która wskazuje również na zróżnicowanie szerokości przedziałów wartości przekroczeń obu analizowanych parametrów. W żadnym przypadku wartości obu parametrów nie są tożsame.

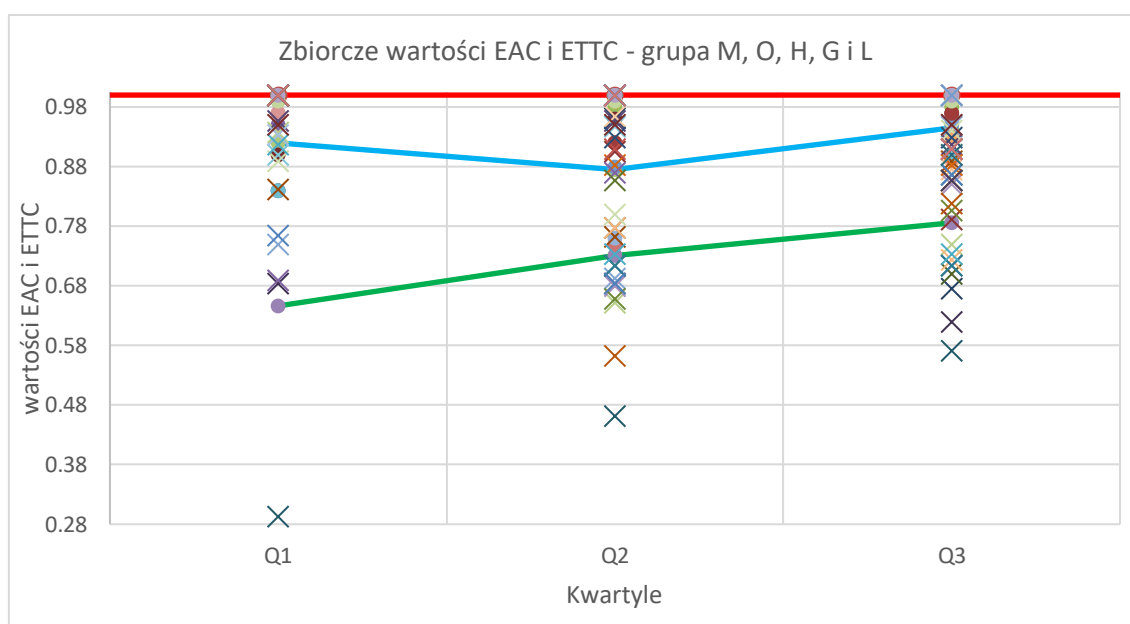
Zbiorcze zestawienie wartości szacowanego całkowitego kosztu i terminu zakończenia przedsięwzięcia zaprezentowane na rys. 8.17 odnosi się do ostatniej badanej grupy obiektów – centrów logistycznych (L).



Rysunek 8.17. Zbiorcze zestawienie wartości szacowanego całkowitego kosztu (EAC) i szacowanego terminu zakończenia przedsięwzięcia (ETTC) w poszczególnych kwartylach dla grupy centrów logistycznych (L).

Obserwacja parametrów wykazuje brak przekroczeń wskaźnika ETTC w pierwszym kwartylu. W kolejnym kwartylu przedział wartości ETTC ulega rozszerzeniu do wartości 0,56 a następnie zawęża się do wartości 0,82 w kwartylu Q3. Wartość ETTC w kwartylach Q2 i Q3 jest tożsama z wartością oczekiwaną. Żadna z wartości wskaźnika EAC wykraczającej poza wartość oczekiwaną nie jest tożsama z odpowiadającą jej wartością wskaźnika ETTC.

Ostatnim elementem analizy porównawczej obu parametrów było zestawienie wszystkich ich wartości bez podziału na grupy (rys. 8.18)



Rysunek 8.18. Zbiorcze zestawienie wartości szacowanego całkowitego kosztu (EAC) i szacowanego terminu zakończenia przedsięwzięcia (ETTC) w poszczególnych kwartylach dla wszystkich grup obiektów (M, O, H, G i L).

Porównanie takie pozwoliło na uzyskanie szerszego wglądu w szerokość przedziału wartości badanych parametrów oraz sformułowanie bardziej ogólnych wniosków z przeprowadzonej analizy. Zaobserwowano szersze przedziały występowania wartości ETTC w poszczególnych kwartylach niż odpowiadające im przedziały występowania wartości EAC.

8.3.3.1. Wnioski dotyczące zbiorczego zestawienia wartości szacowanego kosztu ostatecznego i terminu zakończenia przedsięwzięcia

Analizując zbiorcze zestawienie wyników EAC i ETTC uzyskanych dla poszczególnych grup obiektów oraz łącznie dla całej próby badawczej sformułowano następujące wnioski:

- z uwagi na zróżnicowaną szerokość przedziałów wartości wskaźników EAC i ETTC, wskazujący na brak lub znikomą współzależność badanych cech w poszczególnych kwartylach, można zaobserwować, że choć trendy nie są jednakowe to cechuje je zbieżność w kierunku wartości oczekiwanych;
- za brakiem współzależności przemawiają również przebiegi trendów obu parametrów, które pomimo zbieżności do wartości oczekiwanej obserwowanej w kolejnych kwartylach charakteryzują się odmiennym kształtem;
- zróżnicowana rozpiętość przedziałów obu parametrów w poszczególnych grupach wskazuje, że ich szacowanie jest mniej precyzyjne w kwartylu Q2 a bardziej dokładne w kwartylu Q1 i Q3.

8.4. Podsumowanie badania szacowania ostatecznego kosztu i terminu zakończenia przedsięwzięcia.

Analizując wyniki uzyskane w trakcie badania szacowanych wartości ostatecznego kosztu i terminu zakończenia różnorodnych przedsięwzięć budowlanych sformułowano następujące stwierdzenia:

- wykazano, że szacowanie kosztu inwestycji metodą EVM, w rozbiciu na poszczególne grupy inwestycji, daje lepszą zbieżność linii trendu do wartości oczekiwanej. Szacowanie terminu zakończenia, pomimo trendu zbieżnego do wartości oczekiwanej w poszczególnych kwartylach, charakteryzuje się mniejszą precyzją – uzyskane wartości odchylają się o 20 ÷ 35%. Jest to efektem większych przekroczeń wartości ETTC względem wartości oczekiwanej, niż w przypadku EAC gdzie wartości odchylenia są mniejsze;
- przytoczone na wstępie niniejszego rozdziału stwierdzenie PMI, że przy około 20% – 25% zaawansowania inwestycji użycie metody EVM daje możliwość przewidzenia z dużą dokładnością wyniku końcowego nie zostało w niniejszej pracy potwierdzone, zwłaszcza w przypadku szacowania wartości ETTC, które charakteryzują się wyższymi odchyleniami;
- w kwartylu Q1 liczba przedsięwzięć, w których wartość szacowanego kosztu przedsięwzięcia wykracza poza wartość oczekiwaną wynosi około 17% a w kwartylach Q2 i Q3 około 14%. Wartości te w przypadku szacowanego ostatecznego terminu zakończenia wynoszą około Q1 – 34%, Q2 – 63%, Q3 – 80%. Niższe wartości parametrów EAC i ETTC w początkowej fazie inwestycji (kwartyl Q1) wynikają z faktu rozpoczęcia robót i związanych z tym niewielkich przekroczeń. Wyższe wartości parametrów w środkowej fazie realizacji są spowodowane narastającymi przekroczeniami. W tym czasie opracowywane są plany naprawcze mające na celu doprowadzenie inwestycji do końca możliwie najniższym nakładem środków w najkrótszym terminie. Efekty wprowadzania środków zaradczych są widoczne w kolejnym kwartylu, gdzie wartości zarówno szacowanego ostatecznego kosztu oraz terminu zakończenia przedsięwzięcia odchylają się od wartości oczekiwanych w mniejszym stopniu, uzyskując średnie wartości odpowiednio 5% dla szacowania ostatecznego kosztu i 21% dla szacowania terminu zakończenia przedsięwzięcia;
- przebieg trendów wartości EAC i ETTC uzyskane w poszczególnych kwartylach względem wartości oczekiwanych ma zbliżony charakter jedynie w grupie budynków mieszkalnych (M). Obserwuje się systematyczny spadek wartości wskaźników EAC i ETTC w kolejnych kwartylach przebiegu przedsięwzięcia. Przebieg wartości wskaźnika ETTC w grupie budynków biurowych (O), hotelowych (H) i centrów logistycznych (L) wykazuje wzrost w połowie inwestycji, a następnie spadek w kierunku wartości oczekiwanej. W przypadku EAC podobna charakterystyka przebiegu jest widoczna w grupie budynków hotelowych (H) i centrów handlowych (G);
- analiza porównawcza wykresów dla poszczególnych grup oraz wykresów zbiorczych wykazała, że zarówno wartości szacowanego ostatecznego kosztu inwestycji EAC jak i całkowitego trwania przedsięwzięcia ETTC w zestawieniu zbiorczym są przeszacowane (uzyskały wartości większe niż planowane);

- w przypadku obu parametrów wykazano również, że im większe odchylenie szacowanych wartości w poszczególnych kwartylach, tym mniej precyzyjne szacowanie rzeczywistych wartości. Stwierdzono, że szacowanie terminu zakończenia przedsięwzięcia obarczone jest większym błędem niż szacowanie ostatecznego kosztu przedsięwzięcia.

Przytoczone powyżej wnioski i spostrzeżenia pozwalają jednoznacznie potwierdzić sformułowaną w rozdziale I tezę nr 3:

Linie trendów szacowanego przekroczenia kosztów realizacji i szacowanego przekroczenia terminu nie wykazują pełnej zbieżności.

Rozwijając powyższą tezę należy dodać, że pomimo widocznych różnic wynoszących maksymalnie 30% w uzyskanych w trakcie badań wartościach obu trendów w poszczególnych kwartylach zaobserwowano, że przebieg zmienności szacowanego kosztu realizacji przedsięwzięcia wykazuje istotne zróżnicowanie względem przebiegu zmienności szacowanego terminu zakończenia. Jeden z tych parametrów jest definiowany jako przekroczenie kosztu, a drugi jako przekroczenie terminu. Oba wykazują zróżnicowany przebieg w kwartylach czasu realizacji w zależności od przynależności do określonej grupy badanych przedsięwzięć.

Wskaźniki przekroczenia kosztu EAC uzyskane w pierwszym kwartylu w poszczególnych grupach obiektów wahają się w przedziale $0,88 \div 1,00$. W drugim kwartylu jest to przedział $0,92 \div 1,00$. Trzeci kwartył charakteryzuje się przedziałem $0,94 \div 1,00$. Sukcesywne zmniejszanie wielkości przedziału w kolejnych kwartylach świadczy o dokładniejszym szacowaniu ostatecznego kosztu przedsięwzięć wraz z postępem realizacji inwestycji. Ich cechą wspólną jest zbieżność do wartości oczekiwanej w ostatnim kwartylu czasu realizacji.

Wskaźniki przekroczenia terminu charakteryzują się szerszymi przedziałami wartości niż wskaźniki przekroczenia kosztu. Pierwszy kwartył charakteryzuje się przedziałem o rozpiętości $0,30 \div 1,00$. W drugim kwartylu następuje zwężenie przedziału do wartości $0,47 \div 1,00$. Wartości wskaźnika ETTC w trzecim kwartylu zawierają się w przedziale $0,57 \div 1,00$.

Nawiązując do głównej tezy niniejszej pracy mówiącej, że przekroczenia kosztu i terminu realizacji nie są cechami całkowicie współzależnymi i wykazują dużą zmienność wzajemnej zależności zarówno w poszczególnych grupach typologicznych jak i w czasie realizacji przedsięwzięć budowlanych, podobnie jak w poprzednich rozdziałach pracy, nie wykazano istotnej zbieżności obu cech. Mimo, iż trendy przebiegu obu parametrów opracowane dla całej próby badawczej wykazują zbliżony przebieg, choć różny co do wartości, to w podziale na poszczególne grupy obiektów zróżnicowanie w przebiegach trendów jest większe.

W związku z powyższym wykorzystując narzędzie będące elementem metody EVM, oparte na szacowaniu ostatecznego kosztu i szacowaniu terminu zakończenia przedsięwzięcia, wykazano słuszność twierdzenia zawartego w głównej tezie pracy. Wraz z rezultatami uzyskanymi w rozdziale VI i VII niniejszej dysertacji, uwzględniając wyjątki obejmujące grupę budynków hotelowych (H), należy stwierdzić, że przekroczenie kosztu i przekroczenie terminu nie są cechami całkowicie współzależnymi.

ROZDZIAŁ IX

Odchylenie kosztu w finansowaniu przedsięwzięć budowlanych

9.1. Wstęp do badania odchylenia kosztu przedsięwzięcia budowlanego w kontekście rezerwy budżetowej

W przypadku finansowania przedsięwzięcia budowlanego ze środków pochodzących z kredytu bankowego, przekroczenie kosztu może pociągać za sobą daleko idące konsekwencje dla efektywności ekonomicznej zadania inwestycyjnego. Uznano więc, że warto przyjrzeć się odchyleniom kosztu na poszczególnych etapach przebiegu przedsięwzięć i ich wpływie na ostateczny koszt inwestycji.

Badanie przebiegu krzywych S wykorzystywanych do śledzenia postępu robót w metodzie EVM omówionej w rozdziale III wykazało, że krzywa S skumulowanego kosztu zaplanowanego i krzywej S skumulowanego kosztu rzeczywistego to dwie różne krzywe, które nie pokrywają się ze sobą. Jest to zjawisko powszechnie obserwowane, świadczące o występowaniu odchylenia kosztu rzeczywistego od wartości kosztu zaplanowanego. W przypadku przedsięwzięć finansowanych przez banki wielkość tych odchylenia będzie miała istotny wpływ na ich okres zwrotu z inwestycji. Zbyt duże przekroczenia będą wymagały aneksowania umów z instytucjami finansowymi w celu pozyskania dodatkowych funduszy na dokończenie realizacji. W skrajnych przypadkach może się to wiązać z koniecznością wstrzymania prac i wizją nieukończenia projektu. Ponieważ przekroczenia kosztu są obecnie zjawiskiem powszechnym w większości przedsięwzięć budowlanych, na podstawie własnych analiz banki dopuszczają rozszerzenie finansowania inwestycji ponad wartość kosztu planowanego. Wynosi ono przeważnie 3% budżetu planowanego na realizację danego przedsięwzięcia. Jest to zakładany dopuszczalny wzrost przekroczenia kosztu przez instytucje finansujące przedsięwzięcia budowlane, który w terminologii inżynierii finansowej określany jest mianem rezerwy budżetowej.

Aby określić skalę odchylenia oraz odnieść ją do wielkości rezerwy budżetowej należy poszukać odpowiedzi na następujące pytanie:

Jakie odchylenia rzeczywistego kosztu przedsięwzięcia budowlanego od jego kosztu planowanego będą zawierały się w zakładanej rezerwie budżetowej różnorodnych sektorów budowlanych?

Badania prowadzone w dalszej części niniejszego rozdziału mają na celu określenie wielkości odchylenia kosztu rzeczywistego od zaplanowanego oraz urealnienie rezerw budżetowych.

Do analizy niniejszego zagadnienia zostało wykorzystane narzędzie w postaci wykresu pudełkowego, które w zwartej i przejrzystej formie przedstawiło szereg informacji na temat przebiegu przekroczeń kosztu w poszczególnych przedsięwzięciach budowlanych. Szczegółowy opis przyjętej metody badawczej zaprezentowano w dalszej części pracy.

9.2. Przegląd literatury w obszarze dopuszczalnych odchyłeń kosztu w przedsięwzięciach budowlanych

Przekroczenie kosztów jest powszechnym problemem w przedsięwzięciach budowlanych, często prowadzącym do poważnych wyzwań finansowych i operacyjnych. Chociaż dopuszczalny zakres przekroczenia kosztów może się różnić w zależności od wielu różnych czynników, kilka opracowań dostarcza szeregu informacji na temat typowych zakresów i czynników przyczyniających się do powstawania tego zjawiska. Niezależne analizy przeprowadzone przez (Shah i in., 2023) oraz (Gunduz & Maki, 2018) wykazały, że przekroczenie kosztów w projektach budowlanych ma miejsce, gdy rzeczywiste koszty przekraczają początkowe szacunki budżetowe, co prowadzi do trudności finansowych, opóźnień i nieporozumień między interesariuszami. Dodatkowo zespół (Shah i in., 2023) przeanalizował wpływ technik zarządzania projektami na przekroczenia kosztów projektów budowlanych, mając na celu zidentyfikowanie różnych technik stosowanych na różnych etapach realizacji przedsięwzięć budowlanych i przeanalizowanie ich wpływu na efektywność kosztową przedsięwzięć budowlanych.

Szereg publikacji podejmuje próbę identyfikacji przyczyn powstawania przekroczeń kosztów. W badaniu (Daoud i in., 2023) podkreślono znaczenie identyfikacji i zajęcia się kluczowymi czynnikami przyczyniającymi się do przekroczenia kosztów i opóźnień w dużych projektach budowlanych. Ponadto zalecono strategię mającą na celu złagodzenie czynników przyczyniających się do przekroczenia kosztów, takie jak zaangażowanie wszystkich interesariuszy w proces planowania, korzystanie z narzędzi zarządzania przedsięwzięciami, ustalanie realistycznych harmonogramów, skuteczne procesy zarządzania zmianą oraz zapewnienie wystarczającej alokacji budżetu poprzez przeprowadzanie dokładnych szacunków kosztów i odkładanie funduszy awaryjnych. W ramach strategii ograniczania przekroczeń kosztów autorzy (Y. Wang & Ghazali, 2023) opracowali środki kontroli dla krytycznych czynników ryzyka przekroczenia kosztów, zapewniając wytyczne, które mają pomóc wykonawcom zminimalizować przekroczenie kosztów w projektach budowlanych. Z kolei (Sheamar i in., 2024) w swoich badaniach stwierdzili, że zaangażowanie wykonawców na wczesnym etapie i współpraca w całym zespole projektowym, mogą potencjalnie zmniejszyć przekroczenia kosztów w publicznych przedsięwzięciach budowlanych.

W kolejnych publikacjach wskazano czynniki przyczyniające się do przekroczenia kosztów w realizacji przedsięwzięć budowlanych. Jako główne przyczyny wskazano niedokładne szacowanie kosztów, niewłaściwe planowanie i harmonogramowanie, nierealistyczny czas trwania umowy i wymagania, częste zmiany zakresu prac, niewystarczająca dostępność siły roboczej/umiejętności, inflacja wpływająca na koszt maszyn, robocizny, materiałów i transportu (Gunduz & Maki, 2018, Daoud i in., 2023, Ammar i in., 2022). Inne istotne czynniki to zmiany projektowe, ingerencje polityczne, zmiany specyfikacji, zmiany zakresu prac, nieodpowiednie planowanie projektu, słaba komunikacja i koordynacja, zmiany w zakresie projektu, brak wykwalifikowanej siły roboczej, niewystarczająca alokacja budżetu i opóźnienia w płatnościach (Daoud i in., 2023), (Ammar i in., 2022) i (Sharma & Gupta, 2021).

W publikacji (Y. Alhammadi i in., 2024) autorzy stwierdzili, że przekroczenie kosztów jest poważnym problemem w budownictwie, prowadzącym do strat finansowych i wpływającym na ukończenie przedsięwzięcia, jego jakość i zadowolenie interesariuszy. Badanie w którym przeanalizowano 27 inwestycji budowlanych realizowanych dla szkolnictwa wyższego wykazało, że około 93 % projektów budowlanych doświadczyło przekroczenia kosztów, przy czym w większości przypadków przekroczenia oscylowały w przedziale od 5% do 10%, co podkreśla powszechny wpływ przekroczenia kosztów na projekty budowlane. Potwierdzają to badania (Memon i in., 2015) skoncentrowane się na problemie przekroczenia kosztów występujące w dużych przedsięwzięciach budowlanych. Dane zebrano za pomocą ustrukturyzowanego badania ankietowego wśród klientów, konsultantów i wykonawców w południowej części Malezji. Wyniki ankiety pokazały, że 96% respondentów zgodziło się, że większość projektów budowlanych boryka się z przekroczeniem kosztów zakresie od 5% do 10% kwoty umowy. Jednocześnie wskazano strategie mające na celu zmniejszenie ryzyka znacznego przekroczenia kosztu polegające na ustandaryzowaniu praktyk projektowych, a w szczególności ograniczeniu częstych zmian i przeróbek, efektywnym planowaniu zasobów zapewniającym lepszą alokację i wykorzystanie zasobów oraz właściwe zarządzanie finansami.

Odchylenia kosztu mają również istotny wpływ na przebieg przedsięwzięć budowlanych w przypadku ich finansowania ze środków pozyskanych w formie kredytów udzielanych przez banki. Właściwe zarządzanie przepływami pieniężnymi ma kluczowe znaczenie dla zapewnienia, że projekt budowlany zakończy się na czas i w ramach założonego budżetu. Złe zarządzanie finansami może postawić wykonawcę lub inwestora w sytuacji, w której nie będzie możliwe sfinansowanie projektu z powodu niewystarczającej płynności finansowej lub nadmiernego zadłużenia wykraczającego poza możliwości finansowe (Ezeldin & Ali, 2017). Kluczowym elementem w finansowaniu przedsięwzięć budowlanych przez kredyty bankowe jest instytucjonalna kontrola ich przebiegu obejmująca niemal wszystkie aspekty. W opracowaniu (Konior, 2019) przedstawiono techniczne, finansowe i organizacyjne metody opracowywania studium wykonalności przedsięwzięć budowlanych zgodne z wymogami Bankowego Inspektora Nadzoru. Obejmują one analizę i ocenę różnych aspektów, takich jak m.in. plan realizacji inwestycji, warunki geotechniczne i środowiskowe, projekty, pozwolenia, umowy i skutki decyzji władz lokalnych. Z kolei w artykule (Konior & Szóstak, 2021b) autorzy podkreślają, że rygorystyczny monitoring projektów budowlanych ma na celu zapewnienie właściwego wykorzystania środków i zminimalizowanie ryzyka inwestycyjnego. Istotnie wpływa to na odchylenia kosztów i jest ściśle powiązane z zakładaną przez banki rezerwą budżetową.

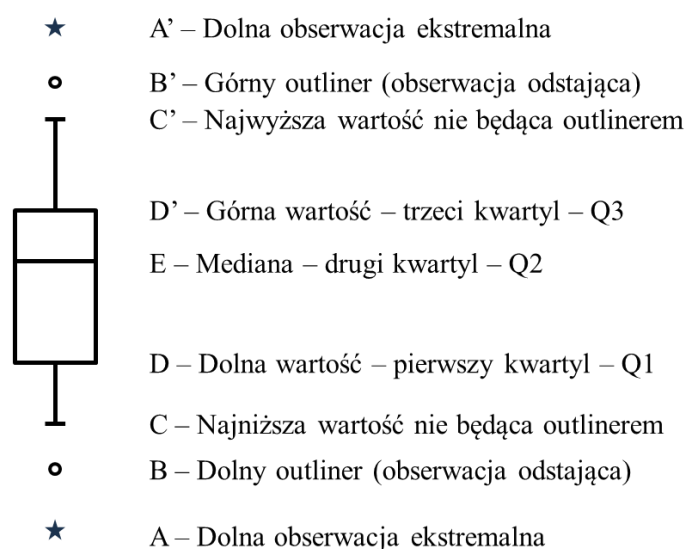
W literaturze brak jest informacji na temat powiązania odchylenia kosztu z wysokością rezerwy budżetowej. Brak badań w tym zakresie może prowadzić do błędnego ustalania jej poziomu, co w przypadku zbyt dużego przekroczenia kosztu może powodować problemy z zakończeniem inwestycji oraz jej rentownością.

9.3. Badania przekroczeń planowanego kosztu inwestycji z wykorzystaniem wykresów pudełkowych

Planowany koszt inwestycji jest szacowany na podstawie opracowanego wcześniej harmonogramu, obejmującego wykonanie wszystkich niezbędnych robót w określonym czasie. Uzyskana w ten sposób kwota jest wartością założoną, deterministyczną, która nie uwzględnia wielu czynników losowych, mogących zaistnieć w trakcie realizacji inwestycji. W związku z tym w inwestycjach finansowanych przez banki, przewidziana jest rezerwa budżetowa

wynosząca 3%, bez względu na rodzaj przedsięwzięcia. Jest to wartość wynikająca z wewnętrznych procedur i analiz ryzyka finansowego przyjętych przez bank. Ponieważ każde przedsięwzięcie budowlane, nawet należące do tej samej grupy obiektów, będzie charakteryzowało się indywidualnym przebiegiem przekroczeń zarówno kosztu jak i terminu, warto przyrzeć się jak te wartości korespondują ze sobą w odniesieniu do charakterystycznych punktów osi czasu oraz przedziałów występowania.

Wśród wielu narzędzi które wykorzystuje się w analizie i eksploracji danych uzyskanych w wyniku badań lub pomiarów jest wykres pudełkowy. Pozwala on na prezentację nawet do dziewięciu różnych parametrów statystycznych analizowanych danych na jednym wykresie (rys.9.1.)



Rysunek 9.1. Graficzna interpretacja wykresu pudełkowego. Źródło: (Wickham & Stryjewski, 2011)

A, A' – Obserwacja ekstremalna górna lub dolna będąca jednym lub kilkoma elementami próby badawczej uzyskującymi wyniki spełniające określoną nierówność. Nierówność wyznaczająca górną ekstremalną obserwację przyjmuje postać [9.1.]:

$$X \geq Q3 + 3 \cdot IQR \quad [9.1.]$$

gdzie: X – wynik próby badawczej, Q3 – wartość 3 kwartyła, IQR – rozstęp ćwiartkowy

Nierówność opisująca dolną ekstremalną obserwację charakteryzuje nierówność [9.2.]:

$$X \leq Q1 + 3 \cdot IQR \quad [9.2.]$$

gdzie: X – wynik próby badawczej, Q1 – wartość 1 kwartyła, IQR – rozstęp ćwiartkowy

Rozstęp ćwiartkowy (IQR) jest określany jako różnica pomiędzy wartościami kwartyła Q3 a kwartyła Q1.

B, B' – obserwacja odstająca, określana również mianem outliera, to wynik wykraczający poza ramy pudełka spełniający, w zależności od położenia, jedną z nierówności. Górna obserwacja odstająca charakteryzuje się spełnieniem nierówności [9.3.]:

$$X \geq Q3 + 1,5 \cdot IQR \quad [9.3.]$$

gdzie: X – wynik próby badawczej, Q3 – wartość 3 kwartyła, IQR – rozstęp ćwiartkowy

Nierówność kwalifikującą wynik próby badawczej jako obserwację odstającą prezentuje zależność [9.4.]:

$$X \leq Q1 + 1,5 \cdot IQR \quad [9.4.]$$

gdzie: X – wynik próby badawczej, Q3 – wartość 3 kwartyła, IQR – rozstęp ćwiartkowy

C, C' – najwyższy i najniższy wynik nie będący outlierem, określany również mianem „wąsa” to w przypadku górnego wyniku największa uzyskana wartość, która nie wpisuje się już w nierówność określoną wzorami [9.1.] i [9.3.]. Z kolei najniższy wynik, to najmniejsza wartość której nie obejmują nierówności określone zależnościami [9.2.] oraz [9.4.].

D, D' – górny i dolny zakres skrzynki. Oba te parametry są reprezentowane odpowiednio przez wartości uzyskane dla trzeciego kwartyła (Q3) i pierwszego kwartyła (Q1) jest to przedział pomiędzy wartością 25% a 75% rozkładu wszystkich wartości.

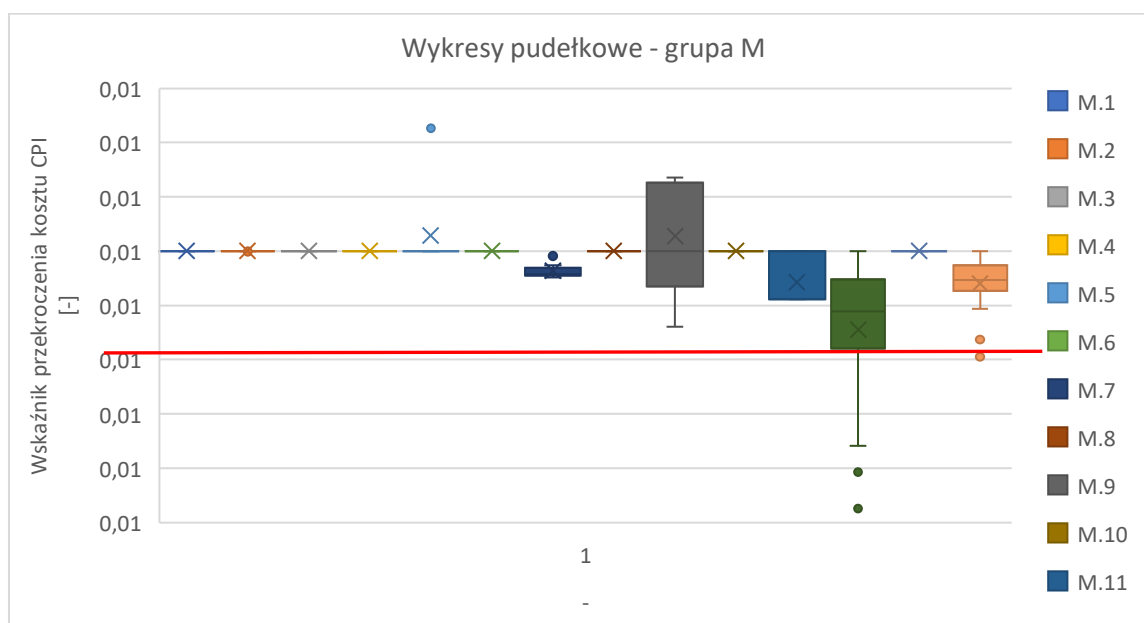
E – pozioma linia wewnątrz skrzynki reprezentuje wartość mediany, czyli środkową wartość rozkładu wszystkich elementów.

Analiza danych z wykorzystaniem wykresów pudełkowych pozwala skupić uwagę na istotnej części pozyskanych w wyniku badań informacji pomijając wartości znacząco odbiegające od przeciętnych w danej grupie.

9.3.1. Analiza przekroczeń kosztu w poszczególnych grupach inwestycji

Dla wszystkich wyodrębnionych do analizy grup obiektów sporządzono wykresy pudełkowe w oparciu o wartości wskaźników przekroczenia kosztu CPI, wyznaczonych dla każdej inwestycji w poszczególnych miesiącach ich realizacji. Uzyskane wyniki zaprezentowano w dalszej części pracy. Na wykresach naniesiono również poziom rezerwy budżetowej wynoszący 3% i odpowiadający wartości CPI = 0.97, który oznaczono czerwoną linią. Wartości mniejsze niż „1” oznaczają przekroczenie kosztu.

W grupie budynków mieszkalnych (M) sporządzono wykresy pudełkowe, przedstawiające zakresy przebiegu przekroczenia kosztu (rys. 9.2.)



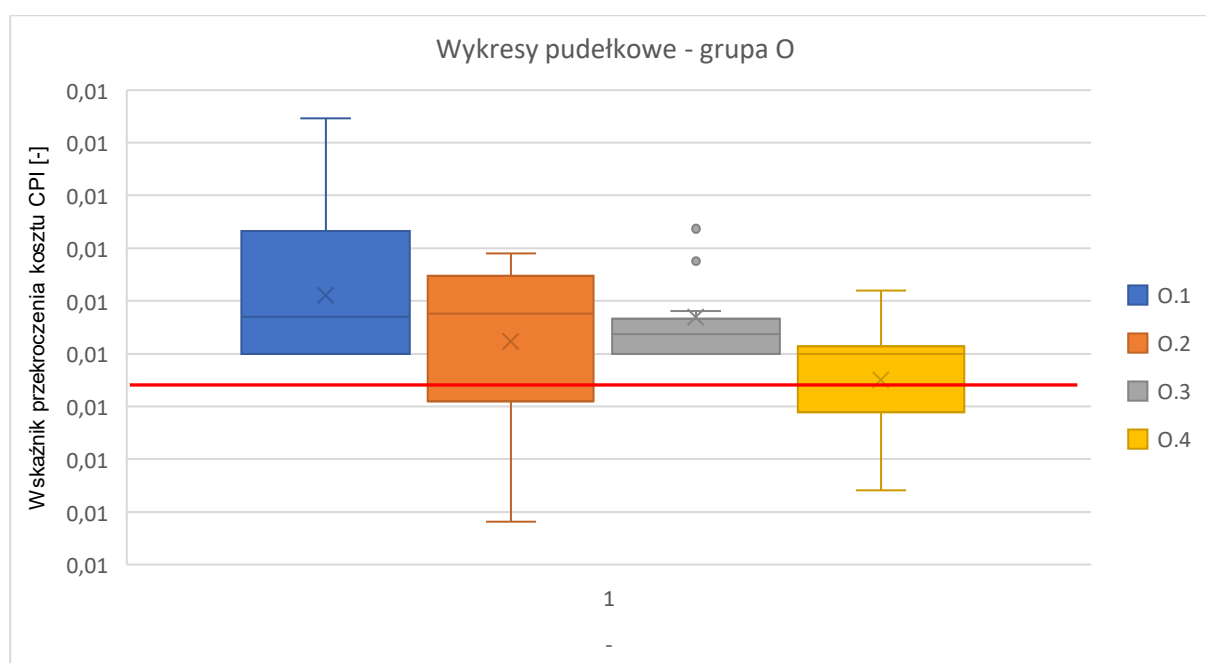
Rysunek 9.2. Wykresy pudełkowe dla grupy budynków mieszkalnych (M)

Zestawienie wykresów poszczególnych inwestycji wskazuje, że w przypadku ośmiu przedsięwzięć ich przebieg odbywał się bez jakichkolwiek zakłóceń powiązanych z odchyleniem kosztu.

W czterech przypadkach zaobserwowano wartości wykraczające poza wartość 0,97 przyjęte jako rezerwa budżetowa. Wartości mediany wyznaczone dla odchyłeń kosztu tych inwestycji wykazały, że w każdym przypadku co najmniej połowa z nich znajdowała się po stronie przekroczeń.

Występujące w inwestycji M.12 obserwacje odstające oraz długie „wąsy” wyznaczające 1.5 rozstępu kwartylnego wskazują na znaczące wartości odchyłeń. Zróżnicowana wielkość rozstępu ćwiartkowego w poszczególnych inwestycjach świadczy o zróżnicowanym przebiegu każdej z nich.

Dla grupy budynków biurowych (O) wykresy pudełkowe prezentujące rozkład przekroczenia kosztu przedstawiono na rys. 9.3.



Rysunek 9.3. Wykresy pudełkowe dla grupy budynków biurowych (O)

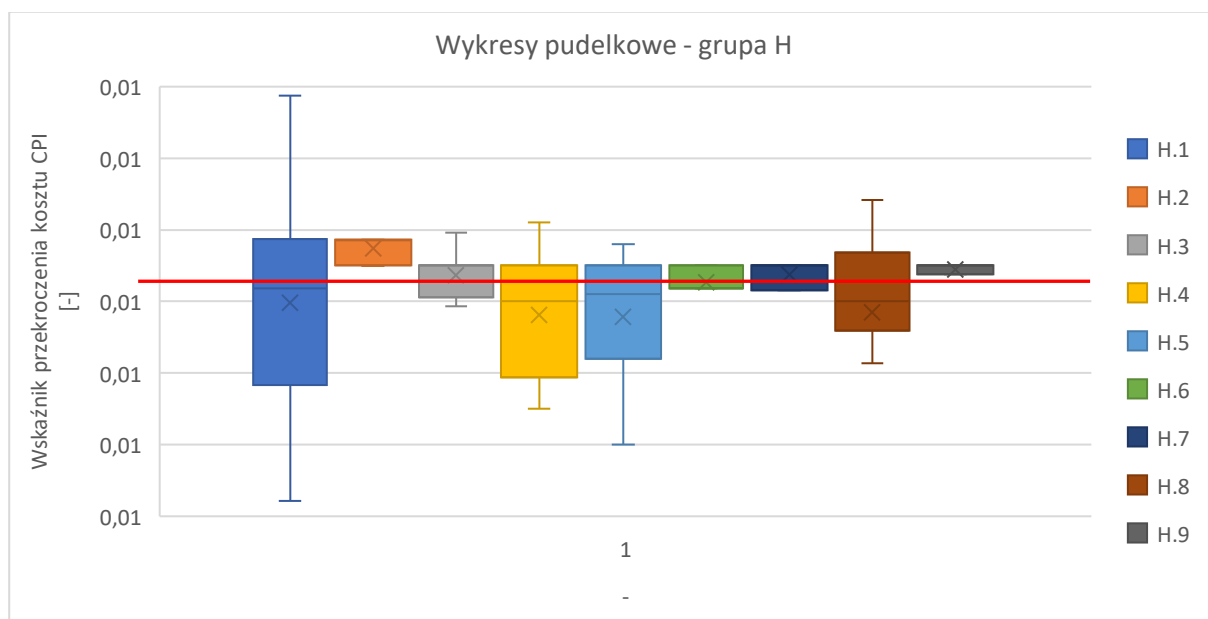
Obserwacja poszczególnych wykresów wskazuje na występowanie odchyłeń zarówno w kierunku oszczędności kosztów poniesionych względem planowanych jak i w kierunku ich przekroczeń.

Analogicznie jak w grupie budynków mieszkalnych (M), zróżnicowana wielkość rozstępu ćwiartkowego w poszczególnych inwestycjach świadczy o ich odmiennym przebiegu. Obecność „wąsów”, szczególnie w inwestycjach O.1, O.2 i O.4 wskazuje na występowanie ekstremalnych wartości, które znacząco odbiegają od wartości przeciętnych reprezentowanych przez pudełka.

W przypadku inwestycji O.2 oraz O.4 wystąpiło odchylenie kosztu skutkujące przekroczeniem rezerwy budżetowej. Wartość reprezentująca najwyższe przekroczenie, reprezentowana na wykresach przez dolne „wąsy”, wyniosła 0,84. Analizując mediany zaobserwowano, że w trzech przypadkach przeciętne wartości odchyłeń kosztu uzyskały wartości CPI większe od „1”, co oznacza, że wystąpiły oszczędności.

Grupa budynków hotelowych (H) jest reprezentowana przez dziewięć inwestycji. Wykresy pudełkowe opracowane na podstawie wartości CPI dla tych przedsięwzięć zamieszczono na rys. 9.4. Obserwacje wskazują występowanie przekroczeń w około 80% inwestycjach w tej grupie.

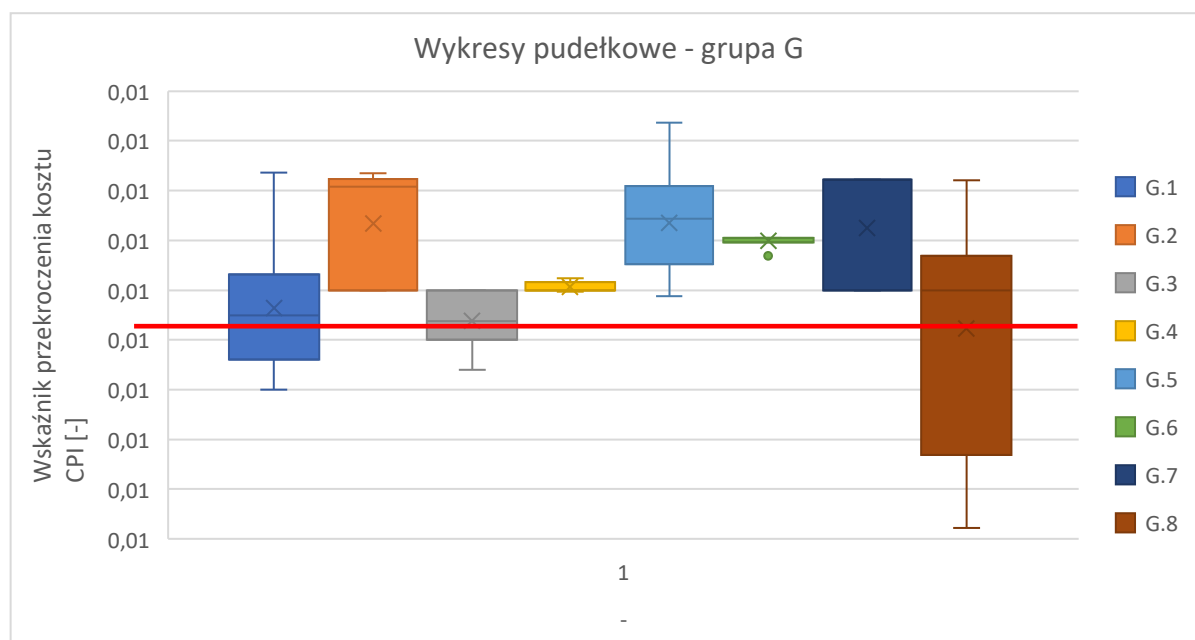
W niemal wszystkich badanych przedsięwzięciach odchylenia występowały zarówno po stronie przekroczeń jak i oszczędności. Jedna z inwestycji wykazywała znaczącą różnorodność wartości wskaźnika CPI. Siedem przedsięwzięć wykazało przekroczenie poziomu rezerwy budżetowej.



Rysunek 9.4. Wykresy pudełkowe dla grupy budynków hotelowych (H)

W pięciu przypadkach analiza mediany wykazała, że ponad połowa uzyskanych wyników wykraczała poza przyjęty poziom rezerwy budżetowej, wynoszący 0,97.

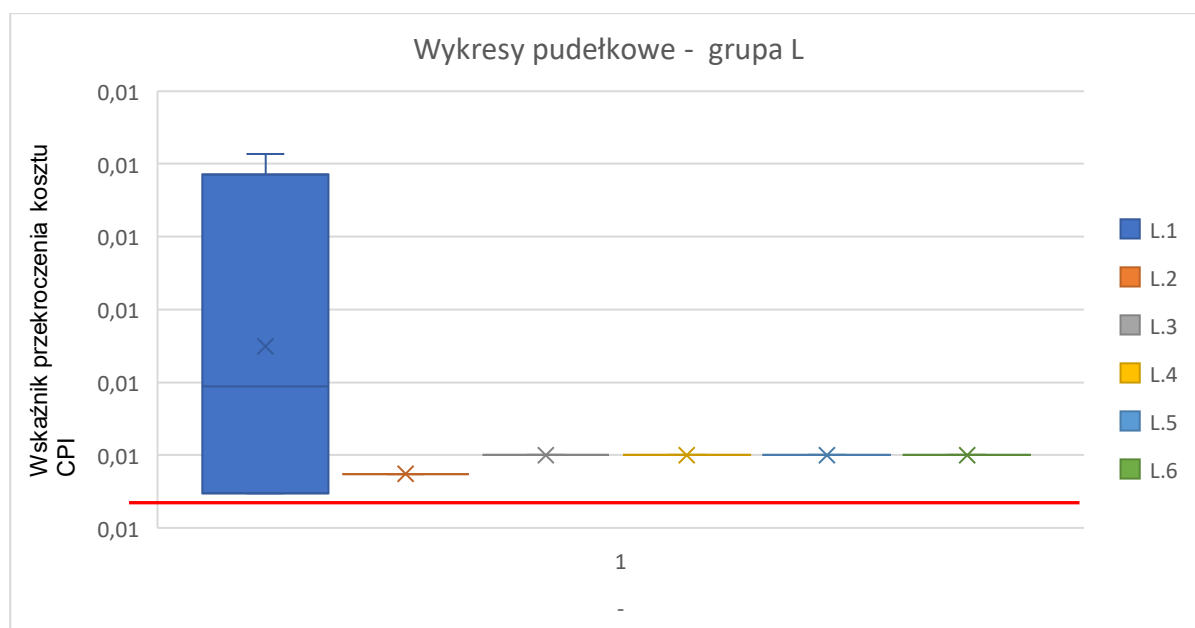
Grupa, w której ujęto centra handlowe (G) jest reprezentowana przez osiem inwestycji. Wykresy pudełkowe opracowane na podstawie wartości wskaźnika CPI dla tych przedsięwzięć zamieszczono na rys. 9.5.



Rysunek 9.5. Wykresy pudełkowe dla grupy centrów handlowych (G)

Obserwacja wykresów wykazała, że pięć przedsięwzięć nie przekroczyło planowanego kosztu, a pomierzone odchylenia znajdowały się po stronie oszczędności. Trzy przedsięwzięcia przekroczyły próg rezerwy budżetowej wynoszący 0,97. Podobnie jak w zaprezentowanych wcześniej grupach przedsięwzięć, tak i w grupie centrów handlowych (G) przedziały Q1 – Q3 przebiegu wskaźnika CPI (pudełka) w poszczególnych przedsięwzięciach były zróżnicowane. Obserwacje mediany w przedsięwzięciach, w których nastąpiło przekroczenie rezerwy budżetowej wskazują, że ponad połowa wartości uzyskała wynik wykraczający poza jej przedział.

Centra logistyczne (L) to grupa przedsięwzięć charakteryzująca się dużą stabilnością wartości wskaźnika CPI. Wykresy pudełkowe opracowane na ich podstawie wartości CPI dla tych przedsięwzięć zamieszczono na rys. 9.6.



Rysunek 9.6. Wykresy pudełkowe dla grupy centrów logistycznych (L)

W przeważającej większości przedsięwzięcia przebiegały zgodnie z zaplanowanym budżetem, nie wykazując żadnych wahań CPI. Tylko w przypadku jednego przedsięwzięcia wystąpiły znaczne wahania wskaźnika CPI (0,97 – 1,19), przy czym jego wartości nie przekroczyły poziomu przyjętej rezerwy budżetowej.

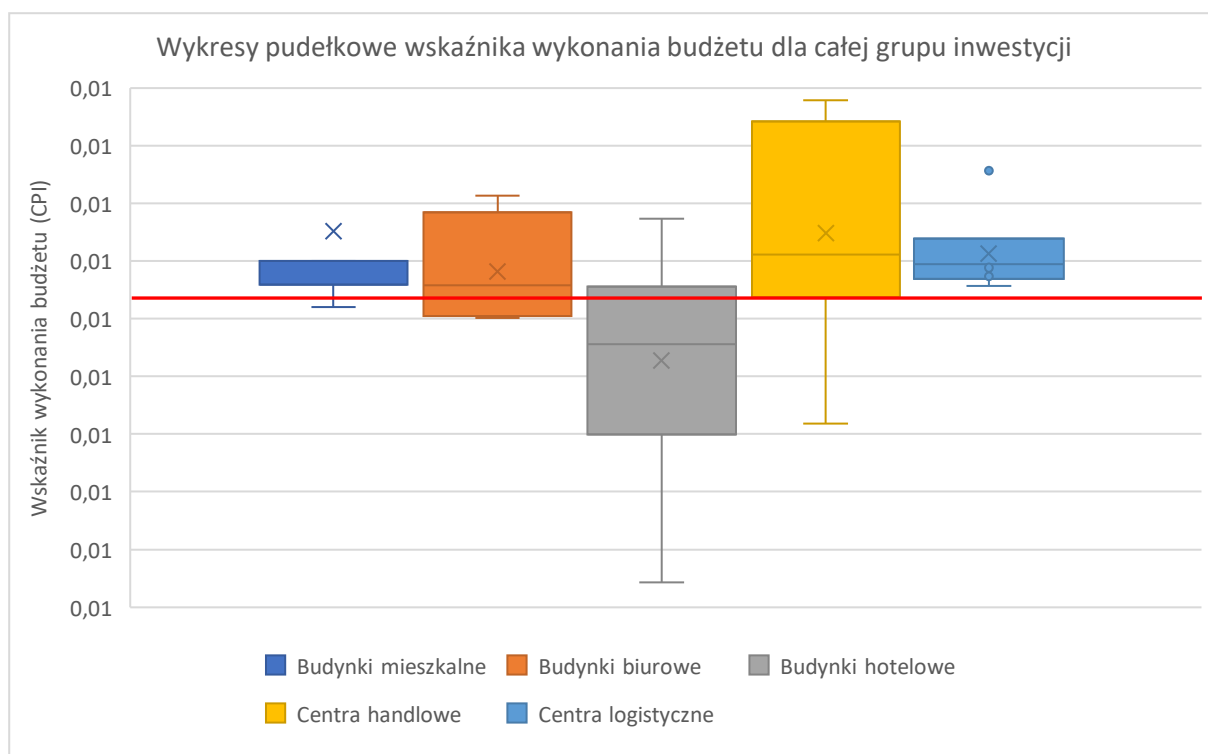
9.3.1.1. Wnioski z badania przekroczeń kosztu w poszczególnych grupach typologicznych

Analizując wykresy pudełkowe opracowane dla poszczególnych grup obiektów budowlanych sformułowano poniższe wnioski:

- przedziały wartości wskaźnika CPI zaobserwowane w wyodrębnionych grupach inwestycyjnych charakteryzują się dużym zróżnicowaniem pomiędzy poszczególnymi przedsięwzięciami;
- poza grupą centrów logistycznych (L) zaobserwowano, że liczba przedsięwzięć, w których nastąpiło przekroczenie kosztu ponad poziom rezerwy budżetowej zawierała się w przedziale 30 – 50%. Wyjątkiem była grupa budynków hotelowych (H), gdzie ponad 70% przedsięwzięć wykazało istotne przekroczenie tego parametru. Tak duża liczba przekroczeń zaobserwowana w poszczególnych okresach kontroli miała istotny wpływ na ostateczny koszt realizacji i jego odchylenie względem kosztu planowanego oraz rezerwy budżetowej;
- zaobserwowany na wykresach pudełkowych rozkład wartości wskaźnika CPI na tle rezerwy budżetowej, wskazuje na możliwość nieutrzymania ostatecznego kosztu przedsięwzięcia na planowanym poziomie.

9.3.2. Analiza relacji kosztu planowanego i kosztu rzeczywistego w kontekście rezerwy budżetowej

Wartość rezerwy budżetowej, która została ustalona przez bank kredytujący przedsięwzięcia budowlane na poziomie 3%, odnosi się do kwoty całkowitego planowanego kosztu inwestycji. Zasadne było zatem zbadanie jak rozkładają się wartości wskaźnika wykonania kosztu (CPI) wyznaczone na końcu inwestycji jako pochodna kosztu planowanego i kosztu rzeczywiście poniesionego w trakcie realizacji. Wykresy pudełkowe, będące rezultatem przeprowadzonej analizy przedstawiono na rys. 9.7.



Rysunek 9.7. Wykresy pudełkowe wskaźnika wykonania budżetu (CPI) całej grupy inwestycji, dla przedsięwzięć ujętych w poszczególnych grupach obiektów (M, O, H, G i L)

Poszczególne wykresy prezentują wartości stosunku kosztu zaplanowanego i kosztu rzeczywiście poniesionego na realizację przedsięwzięć w poszczególnych grupach obiektów. W celu łatwiejszego odniesienia się do poziomu rezerwy budżetowej na wykresie zaznaczono czerwoną poziomą linią jej poziom jako wartość 0,97.

Na wykresie zaobserwowano, że w każdej grupie przedsięwzięć nastąpiło przekroczenie planowanego kosztu inwestycji. Przekroczenie rezerwy budżetowej stwierdzono w przedsięwzięciach z grupy budynków mieszkalnych (M), budynków biurowych (O), budynków hotelowych (H) oraz centrów handlowych (G). Jedynie w przypadku grupy centrów logistycznych (L), pomimo przekroczenia kosztu planowanego, koszt rzeczywisty został utrzymany w ramach tej rezerwy. Analizując wykresy pudełkowe w poszczególnych grupach przedsięwzięć, stwierdzono duże zróżnicowanie wartości uzyskanych w grupie budynków biurowych (O), budynków hotelowych (H) i centrów handlowych (G). Niewielkie zróżnicowanie przedziałów wartości pomiędzy poszczególnymi przedsięwzięciami wystąpiło w grupie budynków mieszkalnych (M) oraz grupie centrów logistycznych (L).

9.3.2.1. Wnioski z analizy relacji kosztu planowanego i kosztu rzeczywistego w kontekście rezerwy budżetowej

Na podstawie obserwacji relacji kosztu planowanego i kosztu rzeczywistego w badanych grupach przedsięwzięć zaprezentowanej w formie wykresów pudełkowych sformułowano następujące wnioski:

- pomimo niewielkiego zróżnicowania wskaźnika CPI, w grupach budynków mieszkalnych (M) i centrach logistycznych (L) zaobserwowano występowanie wartości odstających, które wskazują na możliwość wystąpienia przedsięwzięć, w których koszt rzeczywisty będzie istotnie odbiegał od kosztu planowanego. Z uwagi na zbliżenie tych wartości do poziomu rezerwy budżetowej pojawia się realna możliwość jej przekroczenia;
- zwarty przedział wartości CPI bez elementów odstających, widoczny w grupie budynków biurowych (O), wskazuje na stabilny zakres obserwowanych odchyleń kosztu rzeczywistego od planowanego oraz niewielkie prawdopodobieństwo wystąpienia wartości istotnie odbiegających od przedziału zawartego pomiędzy kwartylami Q1 i Q3;
- szerokość przedziału wartości CPI zaobserwowany w grupach budynków hotelowych (H) i centrów handlowych (G) wykazuje dużą zmienność o czym świadczy wysokość pudełek w wykresach dla tych grup obiektów. W obu grupach stwierdzono również występowanie wartości maksymalnych i minimalnych, które istotnie odstają od pudełka. Pozwala to przypuszczać, że mogą pojawić się przedsięwzięcia, w których koszt rzeczywisty będzie przekraczał nie tylko koszt planowany, ale również wartość rezerwy budżetowej.

9.4. Podsumowanie badania zmienności wartości wskaźnika CPI z wykorzystaniem wykresów pudełkowych

Analiza zmienności wskaźnika przekroczenia kosztu CPI dla różnorodnych przedsięwzięć budowlanych, przy użyciu narzędzia w postaci wykresu pudełkowego, wykazała dużą różnorodność uzyskanych wyników, zarówno w wyodrębnionych grupach jak i pomiędzy poszczególnymi przedsięwzięciami. Świadczy o tym kształt wykresów pudełkowych, charakteryzujący się dużą zmiennością oraz ich pozycjonowanie względem osi poziomej, wskazującej wielkość przekroczeń.

Poziomym odniesieniem dla opracowanych wykresów przekroczeń kosztu reprezentowanych przez wskaźnik CPI jest rezerwa budżetowa, traktowana jako dopuszczalne przekroczenie kosztu. Wielkość tej rezerwy jest ustalona przez banki i wynosi 3% kosztu całej inwestycji. W niniejszej analizie należy ją zatem interpretować jako przedział wartości przekroczeń $(0,97 ; 1)$. Dlatego, w odpowiedzi na postawione na wstępie niniejszego rozdziału pytanie dotyczące wielkości przekroczenia mieszczącej się w przedziale akceptowanym przez banki stwierdza się, że jest to CPI równe właśnie 0,97.

W tabeli 9.1. przedstawionej poniżej zaprezentowano w formie zbiorczej wyniki badań uzyskanych w ramach analizy ostatecznych wartości wskaźnika CPI w poszczególnych grupach obiektów, wskazując ekstremalne wartości odchyleń oraz wartości uzyskane w 1 i 3 kwartyli. Są one odpowiedzią na pytanie postawione na wstępie niniejszego rozdziału:

Jakie odchylenia rzeczywistego kosztu przedsięwzięcia budowlanego od jego kosztu planowanego, będą zawierały się w zakładanej rezerwie budżetowej różnorodnych sektorów budowlanych?

Tabela 9.1. Zestawienie wybranych wartości odchyleń kosztu CPI w poszczególnych grupach typologicznych dla przedsięwzięć w których nastąpiło przekroczenie rezerwy budżetowej.

Grupa typologiczna	Wartość węża dolnego	Kwartył Q1	Kwartył Q3	Wartość węża górnego
A. Budynki mieszkalne	0,96	0,98	1,00	1,03
B. Budynki biurowe	0,95	0,95	1,04	1,06
C. Hotele	0,72	0,85	0,98	1,04
D. Centra handlowe	0,86	0,97	1,12	1,14
E. Centra logistyczne	0,98	0,99	1,02	1,08

Wartości minimalne ujęte w tabeli odzwierciedlają największe przekroczenie kosztu względem wartości planowanych w każdej z analizowanych grup typologicznych. Wartości maksymalne wskazują na odchylenia rzeczywistego kosztu w kierunku oszczędności.

W czterech badanych grupach przedsięwzięć: budynkach mieszkalnych (M), budynkach biurowych (O), budynkach hotelowych (H) oraz centrach handlowych (G) wystąpiły przypadki, w których przekroczenie kosztu było większe niż ustalona przez banki rezerwa budżetowa. Wyjątkiem jest grupa centrów logistycznych (G), gdzie całkowity koszt przedsięwzięć został utrzymany na poziomie przekroczeń mniejszym niż 3%.

We wszystkich badanych grupach zaobserwowano dużą nieregularność przekroczeń kosztu poszczególnych inwestycji, widoczną w zróżnicowanym kształcie reprezentujących je wykresów. Świadczy o tym wysokość pudełek, które reprezentują wartości wskaźnika CPI właśnie z przedziału Q1 – Q3. Nawet w przypadkach inwestycji, w których utrzymano koszt w rezerwie budżetowej obserwuje się zróżnicowaną rozpiętość wartości wskaźnika CPI. Fakt ten pozostawia niepewność w prognozowaniu skumulowanego kosztu inwestycji.

Również w przypadku analizy ostatecznych wartości wskaźnika CPI omówionej w punkcie 9.3.2. niniejszego rozdziału zaobserwowano duże zróżnicowanie szerokości przedziałów wartości w poszczególnych grupach przedsięwzięć, skutkujące zmienną wielkością odchyleń od kosztu planowanego oraz rezerwy budżetowej.

Z uwagi na wielkość przekroczenia rezerwy budżetowej, występującą w grupie budynków mieszkalnych (M), wynosząca 0,96 oraz obecność wartości odstających rekomenduje się zwiększenie rezerwy budżetowej do poziomu 5% kosztu inwestycji. Pozwoli to bezpieczne finansowo zakończenie przedsięwzięcia, uwzględniające możliwość wystąpienia przekroczenia kosztu, mieszczącego się w zaktualizowanej rezerwie budżetowej.

Zwiększenie rezerwy budżetowej do poziomu 5% wartości przedsięwzięcia rekomenduje się również w odniesieniu do grupy budynków biurowych (O). Pomimo przekroczenia rezerwy budżetowej i uzyskania wartości wskaźnika CPI wynoszącej 0,95 (5% odchylenia od kosztu planowanego) przyjęto, że w analizowanej grupie przedsięwzięć, z uwagi na szerokość przedziału oraz brak odstających wartości CPI, większe przekroczenia nie wystąpią.

Grupa budynków hotelowych (H) charakteryzuje się największą ilością przedsięwzięć, w których nastąpiło przekroczenie 3% rezerwy budżetowej. Najniższa zanotowana wartość wąsa oraz dolna wartość pudełka Q1 wyniosły odpowiednio 0,72 i 0,85, co świadczy o szerokim przedziale wartości wskaźnika CPI w tej grupie przedsięwzięć. W związku z powyższym dla tej grupy obiektów budowlanych rekomenduje się zwiększenie rezerwy budżetowej do poziomu aż 30% kosztu całej inwestycji. Zapewni to bezpieczne finansowanie grupy przedsięwzięć, które charakteryzują się częstymi zmianami zakresu na etapie realizacji.

W grupie obejmującej centra handlowe (G) zaobserwowano duże zróżnicowanie w przebiegu poszczególnych przedsięwzięć. W około 30% przedsięwzięć stwierdzono przekroczenia wykraczające poza 3% rezerwę budżetową. Wartość dolnego wąsa wyniosła 0,86, co oznacza przekroczenie kosztu planowanego o około 26%. W związku z tym również dla tej grupy rekomenduje się zwiększenie rezerwy budżetowej do poziomu 25%.

Wartości rezerwy budżetowej rekomendowane dla budynków hotelowych (H) i centrów handlowych (G) wynikają z dużej podatności przedsięwzięć zawartych w tych grupach na zmiany zakresu w trakcie ich przebiegu, co jest wyraźnie widoczne na wykresach pudełkowych w postaci dużej wysokości pudełek oraz dużej długości wąsów.

Inwestycje należące do grupy centrów logistycznych (L) nie wykazały przekroczeń kosztu, które skutkowałyby przekroczeniem ustalonej przez bank rezerwy budżetowej. Większość przedsięwzięć nie wykazała żadnych odchyłeń kosztu, a w przypadku jednego przedsięwzięcia stwierdzono znaczące odchylenia wartości CPI. Jednak nie spowodowało to przekroczenia poziomu 0,97. W związku z tym rekomenduje się utrzymanie rezerwy budżetowej na dotychczasowym poziomie.

Zaproponowany dla poszczególnych grup obiektów poziom rezerwy budżetowej został zawarty w formie tabelarycznej (tab. 9.2.)

Tabela 9.2. Zestawienie rekomendowanych wartości rezerwy budżetowej dla poszczególnych grup typologicznych.

Grupa typologiczna	Dotychczasowy poziom rezerwy budżetowej	Rekomendowany poziom rezerwy budżetowej
M / Budynki mieszkalne	3%	5%
O / Budynki biurowe	3%	5%
H / Budynki Hotele	3%	30%
G / Centra handlowe	3%	25%
L / Centra logistyczne	3%	3%

ROZDZIAŁ X

Zakończenie

10.1. Zakres badawczy pracy

Zawartość niniejszej rozprawy składa się z trzech zasadniczych części. Pierwsza część obejmuje prace syntetyczne, które mają na celu zintegrowanie i podsumowanie istniejącej wiedzy na temat zagadnień związanych ze współzależnością cech jakimi są przekroczenie kosztu i przekroczenie terminu realizacji w zróżnicowanych przedsięwzięciach budowlanych. W ramach tej części opracowania omówiono zagadnienia związane ze współzależnością zmiennych. Następnie przedstawiono przegląd literatury, obejmujący aspekty przekroczenia kosztu, przekroczenia terminu, współzależności tych cech zmiennych oraz narzędzi wykorzystywanych do kontroli przebiegu procesu budowlanego. Przedstawiono i omówiono próbę badawczą, będącą kluczowym elementem badań prowadzonych w dalszej części dysertacji. Ostatnim elementem tej części pracy było przedstawienie obserwacji jakie zostały poczynione w wyniku analiz metodycznie przekształconej próby badawczej. Stały się one punktem wyjścia do autorskich badań, prowadzonych w dalszej części pracy.

Druga część niniejszej rozprawy ma charakter analityczny i badawczy, na który składają się trzy badania ukierunkowane na wykazanie współzależności pomiędzy przekroczeniem kosztu a przekroczeniem terminu w zróżnicowanych przedsięwzięciach budowlanych. W ramach tych analiz przeprowadzono badanie korelacji z wykorzystaniem metod Pearsona i Spearmana. Następnie zbadano prawdopodobieństwo warunkowe wystąpienia obu tych cech. W kolejnym badaniu w kierunku potwierdzenia tezy głównej, w oparciu o metodę EVM, wykorzystując szacowanie ostatecznego kosztu i terminu zakończenia przedsięwzięcia, analizowano współzależność pomiędzy przekroczeniem kosztu a przekroczeniem terminu.

Ostatnim elementem tej części pracy jest rozdział podejmujący problematykę odchyłeń kosztu w kontekście ich dopuszczalnych wartości w zarządzaniu przedsięwzięciami budowlanymi. Jest to rozdział techniczny, który zawiera szereg wskazówek mających wspomóc proces planowania budżetu inwestycji w kierunku zmniejszenia dysproporcji pomiędzy kosztem planowanym a ostatecznym kosztem faktycznie zrealizowanych robót budowlanych w różnych grupach typologicznych.

W załącznikach, stanowiących trzecią część opracowania, zamieszczono bogaty materiał empiryczny, będący podstawą przeprowadzonych w części drugiej analiz.

Istotnym elementem jest obszerny przegląd literatury obejmujący wszystkie zagadnienia podejmowane pracy. Zestawienie literatury zamieszczone na końcu pracy świadczy o przeprowadzeniu dogłębnej analizy stanu wiedzy w zakresie podejmowanej tematyki.

Badania współzależności pomiędzy przekroczeniem kosztu a przekroczeniem terminu w zróżnicowanych przedsięwzięciach budowlanych zostały przeprowadzone na zróżnicowanej próbie badawczej 41 obiektów budowlanych pogrupowanych według rodzaju i przeznaczenia w pięciu kategoriach.

Rozprawa obejmuje grupę zagadnień z następującego zakresu:

- współzależności jako pojęcia opisującego relacje pomiędzy dwiema cechami w ujęciu statystycznym i deterministycznym (rozdział I);
- przeglądu literatury przeprowadzonego w kierunku badania współzależności cech obejmujący rozpoznanie w zakresie metod badawczych i (rozdział II);
- metod kontroli i zarządzania przedsięwzięciami budowlanymi, a w szczególności metodą EVM, szczególnie rekomendowaną przez środowiska związane z zarządzaniem projektami (rozdział III);
- prezentacji próby badawczej wraz z omówieniem metodyki przetwarzania danych na potrzeby analiz prowadzonych w ramach niniejszej dysertacji (rozdział IV);
- analizy próby badawczej pod kątem badania współzależności przekroczenia kosztu i terminu realizacji w zróżnicowanych przedsięwzięciach budowlanych (rozdział V);
- badania korelacji cech współczynnikiem Pearsona i współczynnikiem Speramana, jako pierwszego podejścia do badania współzależności przekroczenia kosztu i przekroczenia terminu (rozdział VI);
- prawdopodobieństwa warunkowego zdarzeń losowych, wykorzystanego jako narzędzia warunkującego istnienie obu cech zmiennych, prowadzącego do zbadania współzależności cech (rozdział VII);
- szacowania ostatecznego kosztu i terminu zakończenia przedsięwzięć budowlanych, których trendy zmienności pozwoliły na ocenę relacji zachodzących pomiędzy przekroczeniem kosztu a przekroczeniem terminu (rozdział VIII);
- analizy odchyłeń kosztu od wartości planowanej, której efektem była rekomendacja zwiększenia wielkości rezerwy budżetowej, gwarantującej bezpieczeństwo finansowe przedsięwzięcia w przypadku wystąpienia przekroczeń kosztu jego realizacji (rozdział IX).

Należy wspomnieć, że materiał badawczy, będący efektem wieloletniej pracy Zespołu Badawczego, w tym autora niniejszej dysertacji, gromadzony w jednolity i uporządkowany sposób, pozwolił na wydzielenie pięciu obszarów odpowiadających określonym grupom typologicznym obiektów budowlanych. Wpłynęło to znacząco na jakość uzyskanych rezultatów badań.

10.2. Osiągnięte cele pracy

Głównym celem niniejszej dysertacji było ustalenie związku pomiędzy przekroczeniem kosztu inwestycji a przekroczeniem terminu jej realizacji w różnorodnych zadaniach inwestycyjnych. Aby osiągnąć tak postawiony cel wyznaczono cele pośrednie, które pozwoliły na zbadanie obszaru przekroczenia kosztu i czasu w szerszym i wielowątkowym podejściu.

- zbadanie współzależności przekroczenia kosztu i terminu poprzez wyznaczenie współczynników korelacji Pearsona i Spearmana – cel został osiągnięty w rozdziale VI gdzie wykazano, że cechy będące przekroczeniem kosztu i przekroczeniem terminu nie są skorelowane ani liniowo, ani monotonicznie;
- wyznaczenie prawdopodobieństw warunkowych przekroczenia kosztu i terminu, zdefiniowanych jako zdarzenia losowe w wybranych przedziałach czasu realizacji typologicznie dobranych przedsięwzięć budowlanych – cel ten został zrealizowany w rozdziale VII, a wyniki analizy wykazały dużą zmienność wartości prawdopodobieństwa w czasie trwania przedsięwzięć. Istotne różnice widoczne były również w zależności od analizowanego warunku: prawdopodobieństwo przekroczenia kosztu pod warunkiem przekroczenia terminu uzyskało wyższe wartości niż prawdopodobieństwo odwrotnego warunku. Zjawisko to zaobserwowano we wszystkich grupach obiektów;
- określenie wpływu wartości prawdopodobieństwa warunkowego na współzależność cech – cel osiągnięty w wyniku analiz przeprowadzonych również w rozdziale VII, który z uwagi na zmienne przebiegi wartości prawdopodobieństw warunkowych w okresie trwania przedsięwzięć oraz wyraźne zróżnicowanie względem kierunku badanego warunku jednoznacznie wskazało na brak występowania współzależności pomiędzy badanymi cechami;
- ustalenie dla jakich wartości przekroczeń kosztu mierzonych w kwartylach czasu realizacji szacowany koszt przedsięwzięcia budowlanego będzie tożsamy z kosztem rzeczywistym – cel został zrealizowany w rozdziale VIII, gdzie przy użyciu metody EVM, dla ustalonych przedziałów czasowych, wyznaczono szacowany ostateczny koszt przedsięwzięć w oparciu o zaobserwowane przekroczenia w kwartylach realizacji różnorodnych przedsięwzięć budowlanych;
- określenie wielkości przekroczeń terminu mierzonych w kwartylach czasu realizacji, przy których szacowany termin zakończenia przedsięwzięcia budowlanego będzie tożsamy z terminem rzeczywistym – cel został zrealizowany równoległe z poprzednim celem w rozdziale VIII, z wykorzystaniem metody EVM, która pozwoliła na oszacowanie terminu zakończenia inwestycji w oparciu o przekroczenia terminów w kwartylach realizacji różnorodnych przedsięwzięć budowlanych;
- wyznaczenie trendów przekroczeń szacowanego kosztu i terminu zakończenia inwestycji – wartości uzyskane w toku analiz realizowanych w ramach dwóch poprzednich przytoczonych celów szczegółowych pozwoliły na opracowanie linii trendu ukazujących zmienność szacowanych wartości względem postępu realizacji. Cel został osiągnięty w rozdziale IX, a przebiegi trendów obu badanych parametrów posłużyły do ustalenia braku współzależności pomiędzy przekroczeniem kosztu a przekroczeniem terminu;

- wskazanie granicznej wielkości odchylenia rzeczywistego kosztu przedsięwzięcia budowlanego od jego kosztu planowanego, mierzonego w kwartylach czasu realizacji tego przedsięwzięcia, przy którym powstałe odchylenia będą tożsame z kosztem planowanym – cel który został osiągnięty w ramach badań prowadzonych w rozdziale IX, mających za zadanie określić dla poszczególnych grup obiektów dopuszczalne odchylenia kosztu rzeczywistego od planowanego skutkujące ustaleniem zaktualizowanej rezerwy budżetowej akceptowanej przez banki inwestycyjne.

10.3. Udowodnione tezy pracy

Osiągnięte cele badawcze pozwoliły na sformułowanie wniosków umożliwiających weryfikację postawionych na wstępie pracy tez. Prawidłowość postawionych tez, w oparciu o zgromadzoną próbę badawczą składającą się z 41 obiektów budowlanych, ujętych w 5 zbiorach odpowiadających określonym grupom typologicznym, została potwierdzona w następujących rozdziałach pracy:

1. ***Przekroczenie kosztu i przekroczenie terminu realizacji przedsięwzięć budowlanych nie są cechami wzajemnie skorelowanymi*** – słuszność tej tezy została wykazana w rozdziale VI, gdzie wyniki badania korelacji obu cech przy użyciu współczynnika Pearsona i współczynnika Spearmana, a także wykorzystując metodę graficzną w postaci korelogramów jednoznacznie potwierdziły brak współzależności. Umiarkowana korelacja dla budynków hotelowych, której przypadek został omówiony we wnioskach w punkcie 6.7.2. tego rozdziału również nie potwierdza pełnej współzależności.
2. ***Prawdopodobieństwa warunkowe zdarzeń losowych określonych jako przekroczenie kosztu i terminu realizacji nie są stale współzależne w czasie przebiegu przedsięwzięcia budowlanego*** – stwierdzenie zawarte w niniejszej tezie zostało potwierdzone w rozdziale VII, w którym przeprowadzono dwukierunkowe badania prawdopodobieństwa warunkowego przekroczenia kosztu i przekroczenia terminu. Analizy były prowadzone dla każdej z wydzielonych grup przedsięwzięć budowlanych. Porównując trendy przebiegu prawdopodobieństwa wykazano wyraźne podobieństwo przebiegu pomiędzy poszczególnymi grupami przedsięwzięć budowlanych. Jednak wahania wartości obu typów prawdopodobieństwa w wydzielonych przedziałach czasowych wskazują na brak stałej współzależności tych parametrów.
3. ***Linie trendów szacowanego ostatecznego kosztu realizacji i szacowanego terminu zakończenia przedsięwzięcia nie wykazują pełnej zbieżności*** – stwierdzenie zawarte w tej tezie zostało potwierdzone w rozdziale VIII, w którym badano trendy przebiegu wartości szacowanego ostatecznego kosztu realizacji i szacowanego terminu zakończenia przedsięwzięcia, wyznaczane w poszczególnych kwartylach przebiegu inwestycji. Funkcje zdefiniowane jako szacowany ostateczny koszt przedsięwzięcia i szacowany termin jego zakończenia wykazują odmienny przebieg w kwartylach czasu realizacji, co jest potwierdzeniem braku zbieżności ich linii trendów.

Obserwacja przebiegu zmienności szacowanego kosztu w poszczególnych kwartylach realizacji zadania inwestycyjnego potwierdza stopniową zbieżność wartości szacowanego kosztu do planowanego kosztu przedsięwzięcia, ale ta tendencja jest wyraźna dopiero w trzecim kwartylu. Tym samym badania autora nie potwierdzają informacji podawanej przez PMI, która mówi, że przy 20% - 25% zaawansowania inwestycji użycie metody EVM daje możliwość

przewidzenia z dużą dokładnością wyniku końcowego. Zwłaszcza szacowanie terminu realizacji, wskazuje na znaczącą zmienność tego parametru w trakcie realizacji przedsięwzięcia, co powoduje, że prognoza terminu wykonania zadania inwestycyjnego przed trzecim kwartylem jest niewiarygodna.

Praca zawiera również aspekt praktyczny, który został zawarty w rozdziale IX. Wykorzystując narzędzie w postaci wykresów pudełkowych przeanalizowano odchylenia kosztu od wartości zaplanowanej. Badanie przeprowadzono dla każdej z wyodrębnionych grup obiektów w celu określenia poziomu dopuszczalnego odchylenia w przedziale rezerwy budżetowej. W efekcie zarekomendowano zwiększenie rezerwy budżetowej, gwarantującej bezpieczne ukończenie inwestycji w przypadku przekroczenia kosztu w wybranych grupach przedsięwzięć budowlanych.

10.4. Podsumowanie końcowe

Uzyskanie jednoznacznej odpowiedzi na pytanie dotyczące współzależności przekroczenia kosztu i terminu w zróżnicowanych przedsięwzięciach budowlanych jest niezwykle trudne ze względu na wielowątkowość zagadnienia. O przekroczeniach można mówić w odniesieniu do comiesięcznych kontroli inwestycji, w których analizuje się bieżące odchylenia kosztowo czasowe oraz w odniesieniu do inwestycji jako całości, gdzie analizuje się przekroczenia obu parametrów w perspektywie całego przedsięwzięcia. Dodatkowym utrudnieniem jest możliwość badania współzależności przy użyciu różnych podejść i metod badawczych. Wyniki uzyskane w toku analiz przeprowadzonych w rozdziałach VI, VII i VIII pomimo kilku wyjątków, skłaniają do stwierdzenia braku występowania współzależności pomiędzy przekroczeniem kosztu i przekroczeniem terminu. Mając na uwadze powyższe argumenty należy uznać, że główny cel niniejszej dysertacji został osiągnięty.

Prezentowane w poszczególnych rozdziałach analizy i opracowania pozwoliły na zgłębienie tematyki przekroczeń dwóch najważniejszych parametrów opisujących przebieg przedsięwzięć budowlanych, czyli kosztu i czasu.

W części opisowej pracy nakreślono istotę podejmowanego zagadnienia, nakreślono cele pracy oraz sformułowano tezę główną oraz trzy tezy szczegółowe. Następnie omówiono problematykę współzależności zmiennych w kontekście probabilistycznym i deterministycznym, szczegółowo odnosząc się do współzależności przekroczenia kosztu i terminu. Przedstawiono metodę EVM jako narzędzie, którego współczynniki miały kluczowe znaczenie w prowadzonych w części badawczej analiz.

Część badawcza niniejszej dysertacji składa się z trzech elementów w postaci analizy korelacji, badania prawdopodobieństwa warunkowego oraz szacowania ostatecznego kosztu i terminu zakończenia przedsięwzięcia. Wykazano w niej prawdziwość trzech tez:

- 1. Przekroczenie kosztu i przekroczenie terminu realizacji przedsięwzięć budowlanych nie są cechami wzajemnie skorelowanymi.***
- 2. Prawdopodobieństwa warunkowe cech, określonych jako przekroczenie kosztu i terminu realizacji, nie są stale współzależne w czasie przebiegu przedsięwzięcia budowlanego .***
- 3. Linie trendów szacowanego przekroczenia kosztu realizacji i szacowanego przekroczenia terminu nie wykazują pełnej zbieżności***

Wyniki analiz uzyskane w części badawczej pracy pozwoliły na realizację głównego celu niniejszej dysertacji jakim było ustalenie związku pomiędzy przekroczeniem kosztu inwestycji a przekroczeniem terminu jej realizacji w różnorodnych zadaniach inwestycyjnych. Efektem osiągnięcia tego celu jest potwierdzenie słuszności twierdzeń zawartych w głównej tezie pracy:

Przekroczenia kosztu i terminu realizacji nie są cechami całkowicie współzależnymi i wykazują dużą zmienność w czasie realizacji różnorodnych typologicznie przedsięwzięć budowlanych.

Niewielka ilość opracowań literaturowych dotyczących w szczególności zagadnień związanych z przekroczeniem kosztu i przekroczeniem terminu w kontekście ich współzależności świadczy o słuszności podjętej tematyki pracy. Celowość i skuteczność przyjętej w pracy metodyki badań potwierdzają osiągnięte cele wyznaczone na wstępie oraz udowodnione tezy.

10.5. Kierunek dalszych badań

Z uwagi na złożoność i wielowątkowy charakter zagadnień poruszanych w niniejszej dysertacji oraz konieczność ich ograniczenia z uwagi choćby na wielkość próby badawczej, wskazane są dalsze badania dotyczące wpływu przekroczenia kosztu i terminu na siebie – nie tylko ich współzależności, ale również wielkości i istotności tych podstawowych cech procesu inwestycyjnego.

Planowane jest również uwzględnienie przyczynowości powstających odchyłeń kosztowych i terminowych, które pozwoli uzyskać bardziej wiarygodną projekcję przebiegu przedsięwzięć budowlanych.

Dalsze prace badawcze muszą mieć wymiar praktyczny, aplikacyjny i dlatego będą zmierzać w kierunku wyznaczenia realnych rezerw budżetowych banków finansujących różnorodne inwestycje wraz z wyprowadzeniem nowych mierników sztucznej inteligencji, które umożliwią bardziej prawdopodobne utrzymanie dopuszczalnych rezerw finansowych w warunkach niepewności.

Kontynuowanie badań parametrów kosztu i czasu realizacji nowych zadań inwestycyjnych jest procesem długotrwałym i skomplikowanym wyzwaniem poznawczym, ale niezbędnym do uzyskania większej ilościowo, a przez to bardziej reprezentatywnej próby badawczej do pełnego statystycznego wnioskowania w odniesieniu do wybranych grup typologicznych i ekstrapolacji wyników na całą dziedzinę budownictwa.

W tym właśnie kierunku będą podążały badania Zespołu Badawczego Inżynierii Przedsięwzięć Budowlanych Katedry Budownictwa Ogólnego Wydziału Budownictwa Lądowego i Wodnego Politechniki Wrocławskiej wraz z autorem niniejszej dysertacji.

Bibliografia

- [1] Abba, W. F. (2000). How earned value got to primetime: a short look back and glance ahead. W *Project Management Institute Annual Seminars & Symposium*.
- [2] Abediniangerabi, B., Shahandashti, S. M., Ahmadi, N., & Ashuri, B. (2017). Empirical Investigation of Temporal Association between Architecture Billings Index and Construction Spending Using Time-Series Methods. *Journal of Construction Engineering and Management*, 143(10). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0001391](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001391)
- [3] Al Kulabi, A. K., & Atiea, H. M. J. (2022). Time overruns in the construction projects in Iraq: Case study on investigating and analyzing the root causes. *Open Engineering*, 12(1), 702–715. <https://doi.org/10.1515/ENG-2022-0351>
- [4] Albert, A., Hallowell, M. R., Lingard, H., & Kleiner, B. M. (2015). Multiple baseline testing: Experimental method for drawing causal inferences in construction engineering and management research. *Journal of Construction Engineering and Management*, 141(7). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0000983](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000983)
- [5] Alhammadi, A. S. A. M., & Memon, A. H. (2020). Ranking of the factors causing cost overrun in infrastructural projects of uae. *International Journal of Sustainable Construction Engineering and Technology*, 11(2), 204–211. <https://doi.org/10.30880/IJSCET.2020.11.02.025>
- [6] Alhammadi, Y., Al-Mohammad, M. S., & Rahman, R. A. (2024). Modeling the Causes and Mitigation Measures for Cost Overruns in Building Construction: The Case of Higher Education Projects. *Buildings*, 14(2). <https://doi.org/10.3390/buildings14020487>
- [7] Almeida, R., Abrantes, R., Romão, M., & Proença, I. (2021). The impact of uncertainty in the measurement of progress in earned value analysis. *Procedia Computer Science*, 181. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2021.01.191>
- [8] Ammar, T., Abdel-Monem, M., & El-Dash, K. (2022). Risk factors causing cost overruns in road networks. *Ain Shams Engineering Journal*, 13(5). <https://doi.org/10.1016/j.asej.2022.101720>
- [9] Amusan, L. M., Afolabi, A., Ojelabi, R., Omuh, I., & Okagbue, H. I. (2018). Data exploration on factors that influences construction cost and time performance on construction project sites. *Data in Brief*, 17, 1320–1325. <https://doi.org/10.1016/J.DIB.2018.02.035>
- [10] Anysz, H., & Buczkowski, B. (2019a). The association analysis for risk evaluation of significant delay occurrence in the completion date of construction project. W *International Journal of Environmental Science and Technology* (T. 16, Numer 9). <https://doi.org/10.1007/s13762-018-1892-7>
- [11] Anysz H., & Krzemiński, M., (2019). Cost approach to the flow-shop construction scheduling. *International Science Conference SPbWOSCE-2018 “Business Technologies for Sustainable Urban Development”*, 110. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201911002048>
- [12] Apollo, M., Grzyl, B., & Jakubowicz, P. (2019). Risk of Delays in Implementation of Building Investment in Urban Conditions in the Aspect of Historical Background of its Location. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 471(11). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/471/11/112054>

- [13] Arantes, A., & Ferreira, L. M. D. F. (2021). Interpretive structural model-based for analysis of causes of delays in construction projects: The Portuguese case. *ICORES 2021 - Proceedings of the 10th International Conference on Operations Research and Enterprise Systems*, 366–374. <https://doi.org/10.5220/0010315303660374>
- [14] Asiedu, R. O., & Adaku, E. (2020). Cost overruns of public sector construction projects: a developing country perspective. *International Journal of Managing Projects in Business*, 13(1), 66–84. <https://doi.org/10.1108/IJMPB-09-2018-0177>
- [15] Aslam, M., Baffoe-Twum, E., & Saleem, F. (2019). Design Changes in Construction Projects – Causes and Impact on the Cost. *Civil Engineering Journal (Iran)*, 5(7), 1647–1655. <https://doi.org/10.28991/CEJ-2019-03091360>
- [16] Assaf, S. A., & Al-Hejji, S. (2006). Causes of delay in large construction projects. *International Journal of Project Management*, 24(4), 349–357. <https://doi.org/10.1016/J.IJPROMAN.2005.11.010>
- [17] Babar, S., Thaheem, M. J., & Ayub, B. (2017). Estimated Cost at Completion: Integrating Risk into Earned Value Management. *Journal of Construction Engineering and Management*, 143(3). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)co.1943-7862.0001245](https://doi.org/10.1061/(asce)co.1943-7862.0001245)
- [18] Bagherpour, M., Khaje Zadeh, M., Mahmoudi, A., & Deng, X. (2020). Interpretive structural modeling in earned value management. *Journal of Civil Engineering and Management*, 26(6). <https://doi.org/10.3846/jcem.2020.12182>
- [19] Bakr, G. A. (2019). Identifying crucial factors affecting accuracy of cost estimates at the tendering phase of public construction projects in Jordan. *International Journal of Civil Engineering and Technology*, 10(1), 1335–1348.
- [20] Ballesteros-pérez, P., & Mohamed Elamrousy, K. (2018). On the limitations of the Earned Value Management technique to anticipate project delays. *Responsible Design and Delivery of the Constructed Project*.
- [21] Ballesteros-Pérez, P., Sanz-Ablanedo, E., Mora-Melià, D., González-Cruz, M. C., Fuentes-Bargues, J. L., & Pellicer, E. (2019). Earned Schedule min-max: Two new EVM metrics for monitoring and controlling projects. *Automation in Construction*, 103, 279–290. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.03.016>
- [22] Ballesteros-Pérez, P., Sanz-Ablanedo, E., Soetanto, R., González-Cruz, Ma. C., Larsen, G. D., & Cerezo-Narváez, A. (2020). Duration and Cost Variability of Construction Activities: An Empirical Study. *Journal of Construction Engineering and Management*, 146(1), 04019093. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0001739](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001739)
- [23] Banki, M. T., & Esmaeli, B. (2008). Using historical data for forecasting s-curves at construction industry. *2008 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management, IEEM 2008*. <https://doi.org/10.1109/IEEM.2008.4737875>
- [24] Barraza, G. A., Back, W. E., & Mata, F. (2004). Probabilistic Forecasting of Project Performance Using Stochastic S Curves. *Journal of Construction Engineering and Management*, 130(1), 25–32. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9364\(2004\)130:1\(25\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9364(2004)130:1(25))
- [25] Bauer-Celny A.; Konior J.; Stachoń T.; Szóstak M. Raporty Wstępny, Okresowy i Końcowy Bankowego Inspektora Nadzoru. PM Group Polska sp. z o.o. 2006 – 2015, 3EPCM sp. z o.o. 2016 – 2024

- [26] Belay, A. M., & Torp, O. (2017). Do Longer Projects Have Larger Cost Deviation Than Shorter Construction Projects? *Procedia Engineering*, 196. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.07.198>
- [27] Bhosekar, S. K., & Vyas, G. (2012). Cost Controlling Using Earned Value Analysis in Construction Industries. W *International Journal of Engineering and Innovative Technology (IJEIT)* (T. 1, Numer 4).
- [28] Blyth, K., & Kaka, A. (2006). A novel multiple linear regression model for forecasting S-curves. *Engineering, Construction and Architectural Management*, 13(1). <https://doi.org/10.1108/09699980610646511>
- [29] Bottero, M., Caprioli, C., & Oppio, A. (2021). A literature review on construction costs estimation: Hot topics and emerging trends. W *Green Energy and Technology*. https://doi.org/10.1007/978-3-030-49579-4_9
- [30] Boussabaine, A. H., & Elhag, T. (1999). Applying fuzzy techniques to cash flow analysis. *Construction Management and Economics*, 17(6). <https://doi.org/10.1080/014461999371088>
- [31] Bromilow, F. J. (1969). Contract time performance expectations and the reality. *Building Forum*, 1(3), 70–80.
- [32] Burtonshaw-Gunn, S. A. (2017). Risk and financial management in construction. W *Risk and Financial Management in Construction*. <https://doi.org/10.4324/9781315244112>
- [33] Cantarelli, C. C., Molin, E. J. E., Van Wee, B., & Flyvbjerg, B. (2012). Characteristics of cost overruns for Dutch transport infrastructure projects and the importance of the decision to build and project phases. *Transport Policy*, 22. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2012.04.001>
- [34] Car-Pušić, D., & Radujković, M. (2009). Construction time-cost model in Croatia. *International Journal for Engineering Modelling*, 22(1–4), 63–70.
- [35] Chan, A. P. C. (1999). Modelling building durations in Hong Kong. *Construction Management and Economics*, 17(2). <https://doi.org/10.1080/014461999371682>
- [36] Chan, A. P. C. (2001). Time-cost relationship of public sector projects in Malaysia. *International Journal of Project Management*, 19(4). [https://doi.org/10.1016/S0263-7863\(99\)00072-1](https://doi.org/10.1016/S0263-7863(99)00072-1)
- [37] Chan, D. W. M., & Kumaraswamy, M. M. (1995). A study of the factors affecting construction durations in Hong Kong. *Construction Management and Economics*, 13(4). <https://doi.org/10.1080/01446199500000037>
- [38] Chang, A. S.-T. (2001). Defining Cost/Schedule Performance Indices and Their Ranges for Design Projects. *Journal of Management in Engineering*, 17(2). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0742-597x\(2001\)17:2\(122\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0742-597x(2001)17:2(122))
- [39] Chao, L. C., & Chen, H. T. (2015). Predicting project progress via estimation of S-curve's key geometric feature values. *Automation in Construction*, 57. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2015.04.015>
- [40] Chao, L. C., & Chien, C. F. (2010). A Model for Updating Project S-curve by Using Neural Networks and Matching Progress. *Automation in Construction*, 19(1). <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2009.09.006>
- [41] Chao, L.-C., & Chien, C.-F. (2009). Estimating Project S-Curves Using Polynomial Function and Neural Networks. *Journal of Construction Engineering and Management*, 135(3). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9364\(2009\)135:3\(169\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9364(2009)135:3(169))

- [42] Chao, L.-C., & Chien, C.-F. (2010). A Model for Updating Project S-curve by Using Neural Networks and Matching Progress. *Automation in Construction*, 19(1), 84–91. <https://doi.org/10.1016/J.AUTCON.2009.09.006>
- [43] Chen, H. L. (2014). Improving Forecasting Accuracy of Project Earned Value Metrics: Linear Modeling Approach. *Journal of Management in Engineering*, 30(2). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)me.1943-5479.0000187](https://doi.org/10.1061/(asce)me.1943-5479.0000187)
- [44] Chen, H. L., Chen, W. T., & Lin, Y. L. (2016). Earned value project management: Improving the predictive power of planned value. *International Journal of Project Management*, 34(1). <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2015.09.008>
- [45] Chen, Z., Demeulemeester, E., Bai, S., & Guo, Y. (2020). A Bayesian approach to set the tolerance limits for a statistical project control method. *International Journal of Production Research*, 58(10). <https://doi.org/10.1080/00207543.2019.1630766>
- [46] Cheng, Y. M., Yu, C. H., & Wang, H. T. (2011). Short-interval dynamic forecasting for actual S-curve in the construction phase. *Journal of Construction Engineering and Management*, 137(11), 933–941. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0000358](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000358)
- [47] Cioffi, D. F. (2005). A tool for managing projects: An analytic parameterization of the S-curve. *International Journal of Project Management*, 23(3). <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2004.08.001>
- [48] Cristóbal, J. R. S. (2017). The S-curve envelope as a tool for monitoring and control of projects. *Procedia Computer Science*, 121. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2017.11.097>
- [49] Czarnigowska, A. (2008). Earned value method as a tool for project control. *Budownictwo i Architektura*, 3(2). <https://doi.org/10.35784/bud-arch.2320>
- [50] Czarnigowska, A. (2009). Monitoring of project progress using the Earned Value. *Przegląd Budowlany*, 80(2), 50–55.
- [51] Czarnigowska A., & Sobotka A. (2010). Przewidywalność czasu trwania budowy: publiczne przedsięwzięcia drogowe. *Czasopismo Techniczne, Wydawnictwo PK, Kraków*, 1-B/2010, 23–34.
- [52] Czemplik, A. (2014). Application of earned value method to progress control of construction projects. *Procedia Engineering*, 91. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.12.087>
- [53] Daoud, A. O., El Hefnawy, M., & Wefki, H. (2023). Investigation of critical factors affecting cost overruns and delays in Egyptian megaconstruction projects. *Alexandria Engineering Journal*, 83, 326–334. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2023.10.052>
- [54] De Marco, A., & Narbaev, T. (2013). Earned value-based performance monitoring of facility construction projects. *Journal of Facilities Management*, 11(1). <https://doi.org/10.1108/14725961311301475>
- [55] Derakhshanalavijeh, R., & Teixeira, J. M. C. (2017). Cost overrun in construction projects in developing countries, Gas-Oil industry of Iran as a case study. *Journal of Civil Engineering and Management*, 23(1), 125–136. <https://doi.org/10.3846/13923730.2014.992467>
- [56] Dziadosz, A. (2017). *Zmodyfikowana metoda kontroli stanu zaawansowania robót i oceny ryzyka realizacji przedsięwzięcia budowlanego.*

- [57] Dziadosz, A., Kapliński, O., & Rejment, M. (2014). Usefulness and fields of the application of the Earned Value Management in the implementation of construction projects. *Budownictwo i Architektura*, 13(4). <https://doi.org/10.35784/bud-arch.1869>
- [58] Egwim, C. N., Alaka, H., Toriola-Coker, L. O., Balogun, H., Ajayi, S., & Oseghale, R. (2021). Extraction of underlying factors causing construction projects delay in Nigeria. *Journal of Engineering, Design and Technology*. <https://doi.org/10.1108/JEDT-04-2021-0211>
- [59] Elghaish, F., & Abrishami, S. (2021). A centralised cost management system: exploiting EVM and ABC within IPD. *Engineering, Construction and Architectural Management*, 28(2). <https://doi.org/10.1108/ECAM-11-2019-0623>
- [60] Ewa Kuniewicz, Zofia Kurlej, Jarosław Macios, Agnieszka Nocko, & Mateusz Pinkiewicz. (2023). *Produkcja budowlano - montażowa w 2022*.
- [61] Ezeldin, A. S., & Ali, G. G. (2017). Cash flow optimization for construction portfolios. *International Conference on Sustainable Infrastructure 2017: Policy, Finance, and Education - Proceedings of the International Conference on Sustainable Infrastructure 2017*, 26–37. <https://doi.org/10.1061/9780784481202.003>
- [62] Faridi, A. S., & El-Sayegh, S. M. (2006). Significant factors causing delay in the UAE construction industry. *Construction Management and Economics*, 24(11), 1167–1176. <https://doi.org/10.1080/01446190600827033>
- [63] Flyvbjerg, B., Holm, M. S., & Buhl, S. (2002). Underestimating costs in public works projects: Error or lie? *Journal of the American Planning Association*, 68(3). <https://doi.org/10.1080/01944360208976273>
- [64] Flyvbjerg, B., Skamris Holm, M. K., & Buhl, S. L. (2004). What causes cost overrun in transport infrastructure projects? *Transport Reviews*, 24(1). <https://doi.org/10.1080/0144164032000080494a>
- [65] Franzese, M., & Iuliano, A. (2018). Correlation analysis. W *Encyclopedia of Bioinformatics and Computational Biology: ABC of Bioinformatics* (T. 1–3). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809633-8.20358-0>
- [66] Gao, T., Du, R., Tao, C., He, W., Zhao, L., & Zhang, X. (2022). The Identification of Key Factors Affecting Cost Estimation in the Phase of Construction Investment. W *Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies* (T. 145). https://doi.org/10.1007/978-3-031-10385-8_7
- [67] Gebrehiwet, T., & Luo, H. (2017). Analysis of Delay Impact on Construction Project Based on RII and Correlation Coefficient: Empirical Study. *Procedia Engineering*, 196, 366–374. <https://doi.org/10.1016/J.PROENG.2017.07.212>
- [68] Górecki, J., & Díaz-Madroño, M. (2020). Who risks and wins?-Simulated cost variance in sustainable construction projects. *Sustainability (Switzerland)*, 12(8). <https://doi.org/10.3390/SU12083370>
- [69] Gunduz, M., & Maki, O. L. (2018). Assessing the risk perception of cost overrun through importance rating. *Technological and Economic Development of Economy*, 24(5), 1829–1844. <https://doi.org/10.3846/20294913.2017.1321053>
- [70] Hajali-Mohamad, M. T., Mosavi, M. R., & Shahanaghi, K. (2016). Optimal estimating the project completion time and diagnosing the fault in the project. *DYNA*, 83(195). <https://doi.org/10.15446/dyna.v83n195.44293>

- [71] Hameed Memon, A., Abdul Rahman, I., Abdul Aziz, A. A., & Abdullah, N. H. (2013). Using structural equation modelling to assess effects of construction resource related factors on cost overrun. *World Applied Sciences Journal*, 21(SPECIAL IS), 6–15. <https://doi.org/10.5829/idosi.wasj.2013.21.mae.9995>
- [72] Hamzah, N., Khoiry, M. A., Arshad, I., Tawil, N. M., & Che Ani, A. I. (2011). Cause of construction delay - Theoretical framework. *Procedia Engineering*, 20, 490–495. <https://doi.org/10.1016/J.PROENG.2011.11.192>
- [73] Hiyassat, M. A., Hiyari, M. A., & Sweis, G. J. (2016). Factors affecting construction labour productivity: a case study of Jordan. *International Journal of Construction Management*, 16(2), 138–149. <https://doi.org/10.1080/15623599.2016.1142266>
- [74] Hoffman, G. J., Thal, A. E., Webb, T. S., & Weir, J. D. (2007). Estimating Performance Time for Construction Projects. *Journal of Management in Engineering*, 23(4). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0742-597x\(2007\)23:4\(193\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0742-597x(2007)23:4(193))
- [75] Howes, R. (2000). Improving the performance of Earned Value Analysis as a construction project management tool. W *Engineering, Construction and Architectural Management* (T. 7, Numer 4). <https://doi.org/10.1108/eb021162>
- [76] Hsieh, T. Y., Wang, M. H. L., & Chen, C. W. (2004). A case study of S-curve regression method to project control of construction management via T-S fuzzy model. *Journal of Marine Science and Technology*, 12(3). <https://doi.org/10.51400/2709-6998.2241>
- [77] Hsieh, T. Y., Wang, M. H. L., Chen, C. W., Chen, C. Y., Yu, S. E., Yang, H. C., & Chen, T. H. (2006). A new viewpoint of s-curve regression model and its application to construction management. *International Journal on Artificial Intelligence Tools*, 15(2). <https://doi.org/10.1142/S021821300600259X>
- [78] Huang, J. W., Pan, H. M., Li, Y., Zhu, Y. T., & Liao, Z. Y. (2014). Cost/schedule monitoring and forecasting for project based on earned value management (EVM). *Advanced Materials Research*, 919–921. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.919-921.1437>
- [79] Juszczak M., (2020) Development of Cost Estimation Models Based on ANN Ensembles and the SVM Method. *Civil and Environmental Engineering Reports* (2020), <https://doi.org/10.2478/ceer-2020-0033>
- [80] Juszczak M., Hanák T., Výskala M., Pacyno H., Siejda M. (2023) Early Fast Cost Estimates of Sewerage Projects Construction Costs Based on Ensembles of Neural Networks. *Appl. Sci.* 2023, 13(23). <https://doi.org/10.3390/app132312744>
- [81] Jiang, A., Issa, R. R. A., & Malek, M. (2011). Construction project cash flow planning using the pareto optimality efficiency network model. *Journal of Civil Engineering and Management*, 17(4). <https://doi.org/10.3846/13923730.2011.604537>
- [82] Jiang, F., Awaitey, J., & Xie, H. (2022). Analysis of Construction Cost and Investment Planning Using Time Series Data. *Sustainability (Switzerland)*, 14(3). <https://doi.org/10.3390/su14031703>
- [83] Kaka, A., & Price, A. D. F. (1991). Relationship between value and duration of construction projects. *Construction Management and Economics*, 9(4). <https://doi.org/10.1080/01446199100000030>
- [84] Kanehira, T., Monden, A., & Yucel, Z. (2021). Association Metrics between Two Continuous Variables for Software Project Data. *Proceedings - 22nd IEEE/ACIS International Conference*

- on Software Engineering, Artificial Intelligence, Networking and Parallel/Distributed Computing, SNPD 2021-Fall*, 242–247. <https://doi.org/10.1109/SNPD51163.2021.9704983>
- [85] Karunakaran, P., Abdullah, A. H., Nagapan, S., Sohu, S., & Kasvar, K. K. (2018). Categorization of potential project cost overrun factors in construction industry. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 140(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/140/1/012098>
- [86] Kasprowicz, T., & Starczyk-Kołbyk, A. (2024). Application of the Randomized Earned Value Method to assess the advancement of the construction of the office building under the unstable implementation conditions | Zastosowanie randomizowanej metody wartości wypracowanej do oceny zaawansowania budowy bi. *Archives of Civil Engineering*, 70(1), 167–197. <https://doi.org/10.24425/ace.2024.148906>
- [87] Kasprowicz, T., Starczyk-Kołbyk, A., & Wójcik, R. R. (2023). The randomized method of estimating the net present value of construction projects efficiency. *International Journal of Construction Management*, 23(12). <https://doi.org/10.1080/15623599.2022.2045426>
- [88] Kenny, C. (2010). Publishing Construction Contracts and Outcome Details. *World Bank Policy Research Working Paper Series, March*.
- [89] Kerzner, H. (2003). PROJECT MANAGEMENT A Systems Approach to Planning, Scheduling, and Controlling EIGHTH EDITION. *John Wiley & Sons, Inc.*, 34(8).
- [90] Khamooshi, H., & Golafshani, H. (2014). EDM: Earned Duration Management, a new approach to schedule performance management and measurement. *International Journal of Project Management*, 32(6), 1019–1041. <https://doi.org/10.1016/J.IJROMAN.2013.11.002>
- [91] Kikwasi, G. J. (2023). Claims in construction projects: how causes are linked to effects? *Journal of Engineering, Design and Technology*, 21(6), 1710–1724. <https://doi.org/10.1108/JEDT-06-2021-0312>
- [92] Kim, B. C., & Reinschmidt, K. (2007). *An S-curve Bayesian model for forecasting probability distributions on project duration and cost at completion* (s. 1449–1459).
- [93] Kim, B.-C. (2016). Probabilistic Evaluation of Cost Performance Stability in Earned Value Management. *Journal of Management in Engineering*, 32(1). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)me.1943-5479.0000383](https://doi.org/10.1061/(asce)me.1943-5479.0000383)
- [94] Kim, E. H., Wells Jr., W. G., & Duffey, M. R. (2003). A model for effective implementation of Earned Value Management methodology. *International Journal of Project Management*, 21(5), 375–382. [https://doi.org/10.1016/S0263-7863\(02\)00049-2](https://doi.org/10.1016/S0263-7863(02)00049-2)
- [95] Koch, C., & Shayboun, M. (2019). SORTING THINGS OUT? MACHINE LEARNING IN COMPLEX CONSTRUCTION PROJECT. *Proceedings of the European Conference on Computing in Construction*, 65–74. <https://doi.org/10.35490/EC3.2019.161>
- [96] Konior, J. (2019). Monitoring of construction projects feasibility by bank investment supervision approach. *Civil Engineering and Architecture*, 7(1), 31–35. <https://doi.org/10.13189/cea.2019.070105>
- [97] Konior, J. (2022). Determining cost and time performance indexes for diversified investment tasks. *Buildings 2022*, 12, 1198. <https://doi.org/10.3390/buildings12081198>
- [98] Konior, J., & Stachoń, T. (2021). Bayes conditional probability of fuzzy damage and technical wear of residential buildings. *Applied Sciences (Switzerland)*, 11(6). <https://doi.org/10.3390/app11062518>

- [99] Konior, J., & Stachoń, T. (2024a). Przebieg krzywych kosztów wypracowanych w zróżnicowanych sektorach inwestycyjnych. *Przegląd Budowlany*, 95(1–2), 109–113. <https://doi.org/10.5604/01.3001.0054.3647>
- [100] Konior, J., & Stachoń, T. (2024b). Trend skumulowanych kosztów planowanych, poniesionych i wypracowanych w realizacji obiektów budowlanych. *Przegląd Budowlany*, 95(3), 123–127. <https://doi.org/10.5604/01.3001.0054.4897>
- [101] Konior, J., & Szóstak, M. (2020a). Deviations and implementation of the budget and schedule of construction projects monitored by the bank supervision on the example of residential buildings | Odchylenia i wykonania budżetu oraz harmonogramu przedsięwzięć budowlanych monitorowanych przez n. *Scientific Review Engineering and Environmental Sciences*, 29(4), 485–493. <https://doi.org/10.22630/PNIKS.2020.29.4.42>
- [102] Konior, J., & Szóstak, M. (2020b). Methodology of planning the course of the cumulative cost curve in construction projects. *Sustainability (Switzerland)*, 12(6). <https://doi.org/10.3390/su12062347>
- [103] Konior, J., & Szóstak, M. (2020c). The S-curve as a tool for planning and controlling of construction process-case study. *Applied Sciences (Switzerland)*, 10(6). <https://doi.org/10.3390/app10062071>
- [104] Konior, J., & Szóstak, M. (2021a). Cumulative cost spent on construction projects of different sectors. *Civil Engineering and Architecture*, 9(4). <https://doi.org/10.13189/cea.2021.090404>
- [105] Konior, J., & Szóstak, M. (2021b). Time and Cost Variance of Construction Projects Monitored by Bank Investment Supervision. W *Lecture Notes in Civil Engineering* (T. 122). https://doi.org/10.1007/978-3-030-63879-5_16
- [106] Konior, J., & Szóstak, M. (2023). Course of planned, actual and earned cost curves of diverse construction investments. *International Journal of Construction Management*, 23(5). <https://doi.org/10.1080/15623599.2021.1942769>
- [107] Kowalski, J., Połośki, M., Lendo-Siwicka, M., Trach, R., & Wrzesiński, G. (2021). Method of assessing the risk of implementing railway investments in terms of the cost of their implementation. *Sustainability (Switzerland)*, 13(23). <https://doi.org/10.3390/su132313085>
- [108] Krysicki W., Bartos J., Dyczka W., Królikowska K., & Wasilewski M. (2004). *Rachunek prawdopodobieństwa i statystyka matematyczna w zadaniach* (9.2004). Wydawnictwo Naukowe PWN.
- [109] Kubečková, D., & Smugala, S. (2021). Determination of construction process duration based on labor productivity estimation: A case study. *Organization, Technology and Management in Construction*, 13(2), 2521–2538. <https://doi.org/10.2478/OTMCJ-2021-0031>
- [110] Kummer, M. (2017). Calculation of the labor consumption rate for shuttering works whilst considering uncertainties. *ISEC 2017 - 9th International Structural Engineering and Construction Conference: Resilient Structures and Sustainable Construction*.
- [111] Kwon, O. C., Kim, S. C., Paek, J. H., & Eom, S. J. (2008). Application of earned value in the Korean construction industry - A case study. *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, 7(1). <https://doi.org/10.3130/jaabe.7.69>
- [112] Larsen, J. K., Shen, G. Q., Lindhard, S. M., & Brunoe, T. D. (2016). Factors Affecting Schedule Delay, Cost Overrun, and Quality Level in Public Construction Projects. *Journal of Management in Engineering*, 32(1). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ME.1943-5479.0000391](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ME.1943-5479.0000391)

- [113] Latif, Q. B. A. I., Al Saadi, A. M. D., & Rahman, I. A. (2019). Identification of delay factor in oman construction industry. *International Journal of Sustainable Construction Engineering and Technology*, 10(1), 34–45. <https://doi.org/10.30880/IJSCET.2019.10.01.004>
- [114] Le-Hoai, L., & Lee, Y. D. (2009). Time-cost relationships of building construction project in Korea. *Facilities*, 27(13). <https://doi.org/10.1108/02632770910996379>
- [115] Le-Hoai, L., Lee, Y. D., & Lee, J. Y. (2008). Delay and cost overruns in Vietnam large construction projects: A comparison with other selected countries. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 12(6). <https://doi.org/10.1007/s12205-008-0367-7>
- [116] Leśniak A. (2012). Causes of construction delays from the viewpoint of contractors. *Czasopismo Techniczne, Wydawnictwo PK, 1-B/2012*, 57–68.
- [117] Lim, B., Nepal, M. P., Skitmore, M., & Xiong, B. (2016). Drivers of the accuracy of developers' early stage cost estimates in residential construction. *Journal of Financial Management of Property and Construction*, 21(1), 4–20. <https://doi.org/10.1108/JFMPC-01-2015-0002>
- [118] Lipke, W. H. (1999). Applying management reserve to software project management. *CrossTalk*, 12(3).
- [119] Lipke, W. H. (2003). The probability of success. *CrossTalk*, 16(11).
- [120] Lipke, W., Zwikael, O., Henderson, K., & Anbari, F. (2009). Prediction of project outcome. The application of statistical methods to earned value management and earned schedule performance indexes. *International Journal of Project Management*, 27(4). <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2008.02.009>
- [121] Liu, T., Zhang, S., & Wang, X. (2024). Novel Probabilistic Approach for Quantification of Cost-Overruns Risk and Determination of Primary Causes. *Mathematical Problems in Engineering*, 2024. <https://doi.org/10.1155/2024/8893201>
- [122] Love, P. E. D., Edwards, D. J., Irani, Z., & Walker, D. H. T. (2009). Project pathogens: The anatomy of omission errors in construction and resource engineering project. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 56(3), 425–435. <https://doi.org/10.1109/TEM.2008.927774>
- [123] Love, P. E. D., Tse, R. Y. C., & Edwards, D. J. (2005). Time–Cost Relationships in Australian Building Construction Projects. *Journal of Construction Engineering and Management*, 131(2). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9364\(2005\)131:2\(187\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9364(2005)131:2(187))
- [124] Lowe, D. J., Emsley, M. W., & Harding, A. (2006). Relationships between total construction cost and project strategic, site related and building definition variable. *Journal of Financial Management of Property and Construction*, 11(3), 165–180. <https://doi.org/10.1108/13664380680001087>
- [125] Mahamid, I. (2022). Relationship between delay and productivity in construction projects. *International Journal of Advanced and Applied Sciences*, 9(2), 160–166. <https://doi.org/10.21833/IJAAS.2022.02.018>
- [126] Makać W., & Urbanek-Krzysztofiak D. (2020). *Metody opisu statystycznego* (2. wyd.). Wydawnictwo Uniwersytetu Gdańskiego.
- [127] Makesh, S., & Mathivanan, M. (2019). Analysis on causes of delay in building construction. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering*, 8(7).

- [128] Martens, A., & Vanhoucke, M. (2020). Integrating corrective actions in project time forecasting using exponential smoothing. *Journal of Management in Engineering*, 36(5). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ME.1943-5479.0000806](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ME.1943-5479.0000806)
- [129] Mawlana, M., & Hammad, A. (2015). Joint probability for evaluating the schedule and cost of stochastic simulation models. *Advanced Engineering Informatics*, 29(3), 380–395. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2015.01.005>
- [130] Memon, A. H., Rahman, I. A., & Aziz, A. A. A. (2015). Study of causative factors of cost overrun in large projects of southern part of peninsular Malaysia. *Proceedings of the 26th International Business Information Management Association Conference - Innovation Management and Sustainable Economic Competitive Advantage: From Regional Development to Global Growth, IBIMA 2015*, 3580–3592.
- [131] Miranda Sarmiento, J., & Renneboog, L. (2017). Cost Overruns in Public Sector Investment Projects. *Public Works Management and Policy*, 22(2). <https://doi.org/10.1177/1087724X16668357>
- [132] Miskawi, Z. (1989). An S-curve equation for project control. *Construction Management and Economics*, 7(2). <https://doi.org/10.1080/01446198900000016>
- [133] Moghayedi, A., & Windapo, A. (2021). Modelling Correlations in Highway Construction Projects. W *Advances in Science, Technology and Innovation*. https://doi.org/10.1007/978-3-030-48465-1_32
- [134] Mohagheghi, V., Meysam Mousavi, S., & Vahdani, B. (2017). An Assessment Method for Project Cash Flow under Interval-Valued Fuzzy Environment. *Journal of Optimization in Industrial Engineering*, 22.
- [135] Mohamad, H. M., Mohamad, M. I., Saad, I., Bolong, N., Mustazama, J., & Razali, S. N. M. (2021). A case study of s-curve analysis: Causes, effects, tracing and monitoring project extension of time. *Civil Engineering Journal (Iran)*, 7(4). <https://doi.org/10.28991/cej-2021-03091679>
- [136] Naji, K., Gunduz, M., & Salat, F. (2021). Assessment of preconstruction factors in sustainable project management performance. *Engineering, Construction and Architectural Management*, 28(10), 3060–3077. <https://doi.org/10.1108/ECAM-05-2020-0333>
- [137] Namazian, A., & Yakhchali, S. H. (2018). Modified Bayesian Network-Based Risk Analysis of Construction Projects: Case Study of South Pars Gas Field Development Projects. *ASCE-ASME Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems, Part A: Civil Engineering*, 4(4). <https://doi.org/10.1061/AJRUA6.0000997>
- [138] Narbaev, T., & De Marco, A. (2014). An Earned Schedule-based regression model to improve cost estimate at completion. *International Journal of Project Management*, 32(6). <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2013.12.005>
- [139] Negesa, A. B. (2022). Assessing the Causes of Time Overrun in Building and Road Construction Projects: The Case of Addis Ababa City, Ethiopia. *Journal of Engineering (United Kingdom)*, 2022. <https://doi.org/10.1155/2022/8479064>
- [140] Ngwenya, L., Aigbavboa, C., & Thwala, W. (2019). Critical success factors for improved organizational performance. *International Conference on Construction in the 21st Century*.
- [141] Nkado, R. N. (1992). Construction time information system for the building industry. *Construction Management and Economics*, 10(6). <https://doi.org/10.1080/01446199200000048>

- [142] Nwadigo, O., Naismith, N. N., Ghaffarianhoseini, A., Ghaffarian Hoseini, A., & Tookey, J. (2021). Dynamic Bayesian network modelling for predicting adaptability of time performance during time influencing factors disruptions in construction enterprise. *Engineering, Construction and Architectural Management*, 28(10), 2994–3013. <https://doi.org/10.1108/ECAM-05-2020-0371>
- [143] Ökmen, O., & Öztas, A. (2010). Construction cost analysis under uncertainty with correlated cost risk analysis model. *Construction Management and Economics*, 28(2), 203–212. <https://doi.org/10.1080/01446190903468923>
- [144] Ostoić-Škomrlj, N., & Raduiković, M. (2012). S-curve modelling in early phases of construction projects. *Gradjevinar*, 64(8). <https://doi.org/10.14256/jce.714.2012>
- [145] Othman, I., Shafiq, N., & Nuruddin, M. F. (2018). Time Overrun in Construction Project. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 291(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/291/1/012016>
- [146] Peer, S. (1982). APPLICATION OF COST-FLOW FORECASTING MODELS. *Journal of the Construction Division*, 108(CO2). <https://doi.org/10.1061/jceaz.0001036>
- [147] Plebankiewicz, E. (2018). Model of predicting cost overrun in construction projects. *Sustainability (Switzerland)*, 10(12). <https://doi.org/10.3390/SU10124387>
- [148] Plebankiewicz, E., Zima, K., & Wiczorek, D. (2016). Life Cycle Cost Modelling of Buildings with Consideration of the Risk. *Archives of Civil Engineering*, 62(2). <https://doi.org/10.1515/ace-2015-0071>
- [149] Polat, G., Okay, F., & Eray, E. (2014). Factors affecting cost overruns in micro-scaled construction companies. *Procedia Engineering*, 85, 428–435. <https://doi.org/10.1016/J.PROENG.2014.10.569>
- [150] Połośki M., & Komendarek P. (2011). Bieżąca kontrola kosztów realizacji obiektu budowlanego metodą earned value. *Metody Ilościowe w Badaniach Ekonomicznych*, 2, 279–290.
- [151] Połośki M., Pruszyński K., Pisarska E., & Bogusz W. (2018). *Kierowanie budowlanym procesem inwestycyjnym* (Połośki M., Red.; 2. wyd.). Wydawnictwo SGGW / Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie (SGGW). https://katalogi.bn.org.pl/permalink/48OMNIS_NLOP/1aot9i7/alma9910882923005606
- [152] Priyo, M. (2021). Earned Value Management System in Indonesian Construction Projects. *International Journal of Integrated Engineering*, 13(3). <https://doi.org/10.30880/ijie.2021.13.03.005>
- [153] Proaño-Narváez, M., Flores-Vázquez, C., Vásquez Quiroz, P., & Avila-Calle, M. (2022). Earned Value Method (EVM) for Construction Projects: Current Application and Future Projections. *Buildings*, 12(3). <https://doi.org/10.3390/buildings12030301>
- [154] Przywara, D., & Rak, A. (2017). The time-cost analysis of schedule monitoring using the earned value method. *Czasopismo Techniczne*, 5(114). <https://doi.org/10.4467/2353737xct.17.069.6426>
- [155] Przywara, D., & Rak, A. (2018). Analysis construction industry on the basis of price trends of labor cost. *MATEC Web of Conferences*, 174. <https://doi.org/10.1051/matecconf/201817404005>
- [156] Przywara, D., & Rak, A. (2021a). Delayed Building Schedule Control Using Milestones. *Lecture Notes in Civil Engineering*, 122. https://doi.org/10.1007/978-3-030-63879-5_15

- [157] Przywara, D., & Rak, A. (2021b). Monitoring of time and cost variances of schedule using simple earned value method indicators. *Applied Sciences (Switzerland)*, 11(4). <https://doi.org/10.3390/app11041357>
- [158] Przywara, D., & Rak, A. (2023). Economic Conditions of Leaving the Construction Site by the Contractor at Different Stages of its Implementation. *Lecture Notes in Civil Engineering*, 322 LNCE. https://doi.org/10.1007/978-3-031-26879-3_24
- [159] Purnus, A., & Bodea, C.-N. (2014). Correlation between time and cost in a quantitative risk analysis of construction projects. *Procedia Engineering*, 85, 436–445. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.10.570>
- [160] Rachid, Z., Toufik, B., & Mohammed, B. (2019). Causes of schedule delays in construction projects in Algeria. *International Journal of Construction Management*, 19(5). <https://doi.org/10.1080/15623599.2018.1435234>
- [161] Rogalska, M., & Hejducki, Z. (2022). The possible impact of employee absenteeism risk on a construction project | Probabilistyczne harmonogramowanie przedsięwzięć budowlanych w aspekcie ryzyka absencji pracowniczej. *Archives of Civil Engineering*, 68(4), 31–44. <https://doi.org/10.24425/ace.2022.143024>
- [162] Salari, M., Bagherpour, M., & Reihani, M. H. (2015). A time-cost trade-off model by incorporating fuzzy earned value management: A statistical based approach. *Journal of Intelligent and Fuzzy Systems*, 28(4). <https://doi.org/10.3233/IFS-141478>
- [163] Salari, M., & Khamooshi, H. (2016). A better project performance prediction model using fuzzy time series and data envelopment analysis. *Journal of the Operational Research Society*, 67(10). <https://doi.org/10.1057/jors.2016.20>
- [164] Seddeeq, A. Bin, Assaf, S., Abdallah, A., & Hassanain, M. A. (2019). Time and Cost Overrun in the Saudi Arabian Oil and Gas Construction Industry. *Buildings 2019, Vol. 9, Page 41*, 9(2), 41. <https://doi.org/10.3390/BUILDINGS9020041>
- [165] Sekar, G., Viswanathan, K., & Sambasivan, M. (2018). Effects of Project-Related and Organizational-Related Factors on Five Dimensions of Project Performance: A Study Across the Construction Sectors in Malaysia. *EMJ - Engineering Management Journal*, 30(4), 247–261. <https://doi.org/10.1080/10429247.2018.1485000>
- [166] Senouci, A. B., & Mubarak, S. A. (2016a). Multiobjective optimization model for scheduling of construction projects under extreme weather. *Journal of Civil Engineering and Management*, 22(3), 373–381. <https://doi.org/10.3846/13923730.2014.897968>
- [167] Senouci, A., Ismail, A., & Eldin, N. (2016). Time Delay and Cost Overrun in Qatari Public Construction Projects. *Procedia Engineering*, 164. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.11.632>
- [168] Shah, F. H., Bhatti, O. S., & Ahmed, S. (2023). A Review of the Effects of Project Management Practices on Cost Overrun in Construction Projects †. *Engineering Proceedings*, 44(1). <https://doi.org/10.3390/engproc2023044001>
- [169] Sharma, S., & Gupta, A. K. (2021). Analysis of Factors Affecting Cost and Time Overruns in Construction Projects. W *Lecture Notes in Civil Engineering: T. 143 LNCE*. https://doi.org/10.1007/978-981-33-6969-6_6
- [170] Sheamar, S., Wedawatta, G., Tennakoon, M., Palliyaguru, R., & Antwi-Afari, M. F. (2024). The potential of new models of construction procurement to counter cost overruns in construction

- projects: an exploratory study from a contractors' perspective. *Journal of Financial Management of Property and Construction*, 29(2), 211–228. <https://doi.org/10.1108/JFMPC-08-2022-0035>
- [171] Skitmore, M., & Thomas, N. (2001). Australian project time-cost analysis: Statistical analysis of intertemporal trends. *Construction Management and Economics*, 19(5). <https://doi.org/10.1080/01446193.2001.9709621>
- [172] Skitmore, R. M., & Ng, S. T. (2003). Forecast models for actual construction time and cost. *Building and Environment*, 38(8). [https://doi.org/10.1016/S0360-1323\(03\)00067-2](https://doi.org/10.1016/S0360-1323(03)00067-2)
- [173] Sroka, B. (2023). Metoda priorytetowego harmonogramowania wieloobektowych przedsięwzięć budowlanych. <https://repozytorium.biblos.pk.edu.pl/resources/46988>
- [174] Starczyk-Kołybyk, A. (2019). *Randomizowana metoda identyfikacji stanu zaawansowania robót i korekty planu budowy*. Rozprawa doktorska
- [175] Starczyk-Kołybyk, A., & Kruszka, L. (2021). Use of the EVM method for analysis of extending the construction project duration as a result of realization disturbances – Case study. *Archives of Civil Engineering*, 67(3). <https://doi.org/10.24425/ace.2021.138061>
- [176] Sun, C., & Xu, J. (2011). Estimation of Time for Wenchuan Earthquake Reconstruction in China. *Journal of Construction Engineering and Management*, 137(3). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)co.1943-7862.0000277](https://doi.org/10.1061/(asce)co.1943-7862.0000277)
- [177] Sun, H., Tang, W., Duffield, C. F., Zhang, L., & Hui, F. K. P. (2022). HOW TO GET INTERNATIONAL CONSTRUCTION PROJECTS DELIVERED ON TIME: FROM CHINESE CONTRACTORS' PERSPECTIVE. *Journal of Civil Engineering and Management*, 28(2), 134–149. <https://doi.org/10.3846/JCEM.2022.16381>
- [178] Susanti, R. (2020). Cost overrun and time delay of construction project in Indonesia. *Journal of Physics: Conference Series*, 1444(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1444/1/012050>
- [179] Szafranko E., Harasymiuk J. (2022). Modelling of Decision Processes in Construction Activity. *Applied Sciences*, (2022), 12(8), <https://doi.org/10.3390/app12083797>
- [180] Szóstak, M. (2021). Planning the time and cost of implementing construction projects using an example of residential buildings. *Archives of Civil Engineering*, 67(4). <https://doi.org/10.24425/ace.2021.138497>
- [181] Szóstak, M. (2022). Best Fit of Cumulative Cost Curves at the Planning and Performed Stages of Construction Projects. *Buildings* 2023, Vol. 13, Page 13, 13(1), 13. <https://doi.org/10.3390/BUILDINGS13010013>
- [182] Szóstak, M. (2023a). Best Fit of Cumulative Cost Curves at the Planning and Performed Stages of Construction Projects. *Buildings*, 13(1). <https://doi.org/10.3390/buildings13010013>
- [183] Szóstak, M. (2023b). FORECASTING THE COURSE OF CUMULATIVE COST CURVES FOR DIFFERENT CONSTRUCTION PROJECTS. *Civil and Environmental Engineering Reports*, 33(1). <https://doi.org/10.59440/ceer-2023-0005>
- [184] Szóstak, M., Stachoń, T., & Konior, J. (2024). Course of Cumulative Cost Curve (CCCC) as a Method of CAPEX Prediction in Selected Construction Projects. *Applied Sciences*, 14(13), 5597. <https://doi.org/10.3390/app14135597>
- [185] Temikeev, K. (2024). Life cycle of buildings and structures. Life cycle stages. *BIO Web of Conferences*, 107. <https://doi.org/10.1051/bioconf/202410706007>

- [186] Tijanić, K., & Car-Pušić, D. (2017). Application of S-curve in EVA Method. *13th International Conference „Organization, Technology and Management in Construction”, September 2017.*
- [187] Touran, A. (1993). Probabilistic cost estimating with subjective correlations. *Journal of Construction Engineering and Management*, 119(1), 58–71. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9364\(1993\)119:1\(58\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9364(1993)119:1(58))
- [188] Tran, D., & Bypaneni, S. (2016). Impact of Correlation on Cost-Risk Analysis for Construction Highway Projects. *Construction Research Congress 2016: Old and New Construction Technologies Converge in Historic San Juan - Proceedings of the 2016 Construction Research Congress, CRC 2016*, 668–678. <https://doi.org/10.1061/9780784479827.068>
- [189] Tyurin, I. (2022). Cost Management in Construction Based on the Automated Identification of Construction Operations and Structural Elements of Information Models. W *Lecture Notes in Civil Engineering* (T. 231). https://doi.org/10.1007/978-3-030-96206-7_28
- [190] Vandevoorde, S., & Vanhoucke, M. (2006). A comparison of different project duration forecasting methods using earned value metrics. *International Journal of Project Management*, 24(4). <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2005.10.004>
- [191] Vanhoucke, M., & Vandevoorde, S. (2007). A simulation and evaluation of earned value metrics to forecast the project duration. W *Journal of the Operational Research Society* (T. 58, Numer 10, s. 1361–1374). Palgrave Macmillan Ltd. <https://doi.org/10.1057/palgrave.jors.2602296>
- [192] Walker, D. H. T. (1995). An investigation into construction time performance. *Construction Management and Economics*, 13(3). <https://doi.org/10.1080/01446199500000030>
- [193] Wang, K. C., Wang, W. C., Wang, H. H., Hsu, P. Y., Wu, W. H., & Kung, C. J. (2016). Applying building information modeling to integrate schedule and cost for establishing construction progress curves. *Automation in Construction*, 72. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2016.10.005>
- [194] Wang, Y., & Ghazali, F. E. M. (2023). Effective control measures to minimize cost overrun during construction phase of high-rise residential building projects in Chongqing, China. *Archives of Civil Engineering*, 69(3), 79–94. <https://doi.org/10.24425/ace.2023.146068>
- [195] Waris, M., Khamidi, M. F., & Idrus, A. (2012). The Cost Monitoring of Construction Projects through Earned Value Analysis. *Journal of Construction Engineering and Project Management*, 2(4). <https://doi.org/10.6106/jcep.2012.2.4.042>
- [196] Wauters, M., & Vanhoucke, M. (2015). Study of the Stability of Earned Value Management Forecasting. *Journal of Construction Engineering and Management*, 141(4). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)co.1943-7862.0000947](https://doi.org/10.1061/(asce)co.1943-7862.0000947)
- [197] Wickham, H., & Stryjewski, L. (2011). 40 Years of Boxplots. *Had.Co.Nz.*
- [198] Xiao, X., Wang, F., Li, H., & Skitmore, M. (2018). Modelling the stochastic dependence underlying construction cost and duration. *Journal of Civil Engineering and Management*, 24(6), 444–456. <https://doi.org/10.3846/jcem.2018.5712>
- [199] Xu, P., & Liu, C. (2024). A Cost Prediction Model for Construction Projects Based on Bayesian Networks. *Advances in Transdisciplinary Engineering*, 47, 756–763. <https://doi.org/10.3233/ATDE231254>
- [200] Yang, J. Bin, & Lai, T. H. (2023). Selecting EVM, ESM and EDM(t) for managing construction project schedule. *Engineering, Construction and Architectural Management*. <https://doi.org/10.1108/ECAM-02-2023-0115>

- [201] Yao, J.-S., Chen, M.-S., & Lu, H.-F. (2006). A fuzzy stochastic single-period model for cash management. *European Journal of Operational Research*, 170(1), 72–90. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2004.06.017>
- [202] Yap, J. B. H., & Skitmore, M. (2020). Ameliorating time and cost control with project learning and communication management: Leveraging on reusable knowledge assets. *International Journal of Managing Projects in Business*, 13(4), 767–792. <https://doi.org/10.1108/IJMPB-02-2019-0034>
- [203] Yaseen, Z. M., Ali, Z. H., Salih, S. Q., & Al-Ansari, N. (2020). Prediction of risk delay in construction projects using a hybrid artificial intelligence model. *Sustainability (Switzerland)*, 12(4). <https://doi.org/10.3390/su12041514>
- [204] Yay, M. (2022). “Relationship between right atrial pressure and the Model For End-Stage Liver Disease (MELD) score in patients with advanced heart failure”: Correlation analysis and ROC curve method | İleri evre kalp yetmezliği hastalarında sağ atriyum basıncı ile Son Dö. *Turkish Journal of Thoracic and Cardiovascular Surgery*, 30(1), 8–10. <https://doi.org/10.5606/tgkdc.dergisi.2022.40073>
- [205] Yu, W.-J., & Zi, J.-Y. (2018). Research on Risk Management of Construction Safety based on Bayesian Network. *2018 International Conference on Intelligent Informatics and Biomedical Sciences, ICIIBMS 2018*, 25–30. <https://doi.org/10.1109/ICIIBMS.2018.8550000>
- [206] Zhang, W., Yuan, G., Xue, R., Han, Y., & Taylor, J. E. (2022). Mitigating Common Method Bias in Construction Engineering and Management Research. *Journal of Construction Engineering and Management*, 148(9). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0002364](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0002364)
- [207] Zhao, T. (2023). Correlation and Causation in Construction Claims. *Journal of Legal Affairs and Dispute Resolution in Engineering and Construction*, 15(3). <https://doi.org/10.1061/JLADAH.LADR-979>
- [208] Zidane, Y. J. T., & Andersen, B. (2018). The top 10 universal delay factors in construction projects. *International Journal of Managing Projects in Business*, 11(3), 650–672. <https://doi.org/10.1108/IJMPB-05-2017-0052>
- [209] Ziólkowska, A., & Połoński, M. (2016). APPLICATION OF THE EVM METHOD AND ITS EXTENSIONS IN THE IMPLEMENTATION OF CONSTRUCTION OBJECTS. *Engineering Structures and Technologies*, 7(4). <https://doi.org/10.3846/2029882x.2016.1152168>
- [210] Zohoori, B., Verbraeck, A., Bagherpour, M., & Khakdaman, M. (2019). Monitoring production time and cost performance by combining earned value analysis and adaptive fuzzy control. *Computers and Industrial Engineering*, 127. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2018.11.019>
- [211] Žujo, V., Car-Pušić, D., Žileska-Pančovska, V., & Čeček, M. (2017). Time and cost interdependence in water supply system construction projects. *Technological and Economic Development of Economy*, 23(6). <https://doi.org/10.3846/20294913.2015.1071292>
- [212] Zwikael, O., Globerson, S., & Raz, T. (2000). Evaluation of Models for Forecasting the Final Cost of a Project. *Project Management Journal*, 31(1). <https://doi.org/10.1177/875697280003100108>

Spis tabel i rysunków

11.1. Spis tabel

Tabela 1.1. Parametry przedsięwzięcia opisanego w scenariuszu 1;	9
Tabela 1.2. Parametry przedsięwzięcia opisanego w scenariuszu 2;	10
Tabela 1.3. Parametry przedsięwzięcia opisanego w scenariuszu 3;	10
Tabela 2.1 Zestawienie publikacji wynikających z badań prowadzonych przez Zespół Inżynierii Przedsięwzięć Budowlanych w Katedrze Budownictwa Ogólnego Wydziału Budownictwa Lądowego i Wodnego Politechniki Wrocławskiej w latach 2020 - 2024	25
Tabela 2.2. Synteza stosowanych metod i narzędzi matematycznych w literaturze krzywej S i EVM	32
Tabela 4.1. Podział przedsięwzięć budowlanych ujętych w próbie badawczej na grupy typologiczne wraz z ilością dokonanych pomiarów.	45
Tabela 4.2. Szczegółowe zestawienie przedsięwzięć budowlanych ujętych w próbie badawczej....	45
Tabela 4.3. Przykładowa struktura kosztów w protokole zaawansowania prac	47
Tabela 4.4. Przykładowa wartość <i>BCWS</i> pozyskana z zestawienia struktury kosztów zawartych w protokole zaawansowania prac	50
Tabela 4.5. Struktura bazy danych o przedsięwzięciach budowlanych w części dotyczącej kosztów (fragment zestawienia).....	52
Tabela 4.6. Struktura bazy danych o przedsięwzięciach budowlanych w części dotyczącej odchyłeń (fragment zestawienia).....	54
Tabela 4.7. Struktura bazy danych o przedsięwzięciach budowlanych w części dotyczącej odchyłeń w formie dychotomicznej (fragment zestawienia).....	55
Tabela 6.1. Liczebność próby badawczej.....	85
Tabela 6.2. Przebieg badania korelacji współczynnikiem Pearsona dla grupy budynków mieszkalnych (M).....	85
Tabela 6.3. Przebieg badania korelacji współczynnikiem Pearsona dla grupy budynków biurowych (O).....	85
Tabela 6.4. Przebieg badania korelacji współczynnikiem Pearsona dla grupy budynków hotelowych (H).....	85
Tabela 6.5. Przebieg badania korelacji współczynnikiem Pearsona dla centrów handlowych (G) ..	86
Tabela 6.6. Przebieg badania korelacji współczynnikiem Pearsona dla centrów logistycznych (L)	86
Tabela 6.7. Zbiorcze zestawienie wyników badania współczynnika korelacji Pearsona	87
Tabela 6.8. Przebieg badania korelacji współczynnikiem Spearmana dla budynków mieszkalnych (M).....	90
Tabela 6.9. Przebieg badania korelacji współczynnikiem Spearmana dla budynków biurowych (O)	90

Tabela 6.10. Przebieg badania korelacji współczynnikiem Spearmana dla budynków hotelowych (H)	91
Tabela 6.11. Przebieg badania korelacji współczynnikiem Spearmana dla centrów handlowych (G)	91
Tabela 6.12. Przebieg badania korelacji współczynnikiem Spearmana dla centrów logistycznych (L)	92
Tabela 6.13. Zbiorcze zestawienie wyników badania korelacji współczynnikiem Spearmana	92
Tabela 7.1. Szczegółowe wartości danych do wyznaczenia prawdopodobieństw warunkowych przekroczenia kosztu przedsięwzięcia pod warunkiem przekroczenia jego terminu.	101
Tabela 7.2. Szczegółowe wartości danych do wyznaczenia prawdopodobieństw warunkowych przekroczenia terminu przedsięwzięcia pod warunkiem przekroczenia jego kosztu.	112
Tabela 7.1. Tabelaryczne zestawienie wyników obliczeń szacowanego ostatecznego kosztu inwestycji (EAC) wraz z przekształceniami	132
Tabela 8.2. Tabelaryczne zestawienie wyników obliczeń szacowanego terminu zakończenia inwestycji (ETTC) wraz z przekształceniami	137
Tabela 9.1. Zestawienie wybranych wartości odchyleń kosztu CPI w poszczególnych grupach typologicznych dla przedsięwzięć w których nastąpiło przekroczenie rezerwy budżetowej.	159
Tabela 9.2. Zestawienie rekomendowanych wartości rezerwy budżetowej dla poszczególnych grup typologicznych.	160

11.2. Spis rysunków

Rysunek 1.1. Zdjęcie realizacji przedstawionej w scenariuszu 1.	9
Rysunek 1.2. Zdjęcie realizacji przedstawionej w scenariuszu 2.	10
Rysunek 1.3. Zdjęcie realizacji przedstawionej w scenariuszu 3.	10
Rysunek 1.4. Obszar badań na tle cyklu życia obiektu budowlanego.....	13
Rysunek 1.5. Graficzna interpretacja liniowych i nieliniowych związków funkcyjnych i statystycznych.	16
Rysunek 1.6. Graficzna interpretacja zmiennych i zdarzeń w kontekście przekroczenia kosztu i terminu.	18
Rysunek 1.7. Struktura pracy.....	21
Rysunek 3.1. Interpretacja graficzna parametrów metody EVM.....	37
Rysunek 4.1. Dynamika produkcji budowlanej w Polsce w latach 2006 – 2022	44
Rysunek 4.2. Mapa lokalizacji przedsięwzięć budowlanych ujętych w próbie badawczej	46
Rysunek 4.3. Widok zrealizowanego zakładu przemysłowego	48
Rysunek 4.4. Strona tytułowa jednego z raportów okresowych	48
Rysunek 5.1. Przebieg krzywych S dla grupy budynków mieszkalnych (M).	58
Rysunek 5.2. Przebieg krzywych S dla grupy budynków biurowych (O).....	58
Rysunek 5.3. Przebieg krzywych S dla grupy budynków hotelowych (H).	59
Rysunek 5.4. Przebieg krzywych S dla grupy centrów handlowych (G).	59
Rysunek 5.5. Przebieg krzywych S dla grupy centrów logistycznych (L).	60
Rysunek 5.6. Przebieg kosztu ACWP dla grupy budynków mieszkalnych (M).....	61
Rysunek 5.7. Przebieg kosztu ACWP dla grupy budynków biurowych (O).	61
Rysunek 5.8. Przebieg kosztu ACWP dla grupy budynków hotelowych (H).....	62
Rysunek 5.9. Przebieg kosztu ACWP dla grupy centrów handlowych (G).....	63
Rysunek 5.10. Przebieg kosztu ACWP dla grupy centrów logistycznych (L).....	63
Rysunek 5.11. Zakres krzywych S dla grupy budynków mieszkalnych (M).....	65
Rysunek 5.12. Zakres krzywych S dla grupy budynków biurowych (O).....	65
Rysunek 5.13. Zakres krzywych S dla grupy budynków hotelowych (H).	66
Rysunek 5.15. Zakres krzywych S dla grupy centrów logistycznych (L).	67
Rysunek 5.16. Zmienność wskaźnika wykonania kosztu inwestycji w grupie budynków mieszkalnych (M).....	68
Rysunek 5.17. Zmienność wskaźnika wykonania kosztu inwestycji w grupie budynków biurowych (O).....	69

Rysunek 5.18. Zmienność wskaźnika wykonania kosztu inwestycji w grupie budynków hotelowych (H).....	69
Rysunek 5.19. Zmienność wskaźnika wykonania kosztu inwestycji w grupie centrów handlowych (G).....	70
Rysunek 5.20. Zmienność wskaźnika wykonania kosztu inwestycji w grupie centrów logistycznych (L).....	70
Rysunek 5.21. Zmienność wskaźnika wykonania harmonogramu inwestycji w grupie budynków mieszkalnych (M).....	71
Rysunek 5.22. Zmienność wskaźnika wykonania harmonogramu inwestycji w grupie budynków biurowych (O).....	72
Rysunek 5.23. Zmienność wskaźnika wykonania harmonogramu inwestycji w grupie budynków hotelowych (grupa H).....	72
Rysunek 5.24. Zmienność wskaźnika wykonania harmonogramu inwestycji w grupie centrów handlowych (G).....	73
Rysunek 5.25. Zmienność wskaźnika wykonania harmonogramu inwestycji w grupie centrów logistycznych (L).....	73
Rysunek 6.1. Wykresy rozrzutu korelacyjnego dla grupy budynków mieszkalnych (M).....	80
Rysunek 6.2. Wykresy rozrzutu korelacyjnego dla grupy budynków biurowych (O).....	80
Rysunek 6.3. Wykresy rozrzutu korelacyjnego dla grupy budynków hotelowych (H).....	81
Rysunek 6.4. Wykresy rozrzutu korelacyjnego dla grupy centrów handlowych (G).....	81
Rysunek 6.5. Wykresy rozrzutu korelacyjnego dla grupy centrów logistycznych (L).....	82
Rysunek 7.1. Prawdopodobieństwa przekroczenia kosztu pod warunkiem przekroczenia terminu w czasie realizacji budynków mieszkaniowych (M).....	102
Rysunek 7.2. Prawdopodobieństwa przekroczenia kosztu pod warunkiem przekroczenia terminu w czasie realizacji budynków biurowych (O).....	103
Rysunek 7.3. Prawdopodobieństwa przekroczenia kosztu pod warunkiem przekroczenia terminu w czasie realizacji budynków hotelowych (H).....	103
Rysunek 7.4. Prawdopodobieństwa przekroczenia kosztu pod warunkiem przekroczenia terminu w czasie realizacji centrów handlowych (G).....	104
Rysunek 7.5. Prawdopodobieństwa przekroczenia kosztu pod warunkiem przekroczenia terminu w czasie realizacji centrów logistycznych (L).....	105
Rysunek 7.6. Zmienność prawdopodobieństwa przekroczenia kosztu pod warunkiem przekroczenia czasu w grupie budynków mieszkalnych (M) w skali czasu realizacji 0 – 1.....	106
Rysunek 7.7. Prawdopodobieństwa przekroczenia kosztu pod warunkiem przekroczenia czasu w grupie budynków biurowych (O) w skali czasu realizacji 0 – 1.....	107
Rysunek 7.8. Zmienność prawdopodobieństwa przekroczenia kosztu pod warunkiem przekroczenia czasu w grupie budynków hotelowych (H) w skali czasu realizacji 0 – 1.....	108

Rysunek 7.9. Prawdopodobieństwo przekroczenia kosztu pod warunkiem przekroczenia czasu w grupie centrów handlowych (G) w skali czasu realizacji 0 – 1.	108
Rysunek 7.10. Prawdopodobieństwo przekroczenia kosztu pod warunkiem przekroczenia czasu w grupie centrów logistycznych (L) w skali czasu realizacji 0 – 1.	109
Rysunek 7.11. Prawdopodobieństwo przekroczenia kosztu pod warunkiem przekroczenia terminu $P(A1 B1)$ dla całej próby badawczej składającej się z grup obiektów M, O, H, G i L.	109
Rysunek 7.12. Prawdopodobieństwa przekroczenia terminu pod warunkiem przekroczenia kosztu w czasie realizacji budynków mieszkalnych (M).	113
Rysunek 7.13. Prawdopodobieństwa przekroczenia terminu pod warunkiem przekroczenia kosztu w czasie realizacji budynków biurowych (O).	114
Rysunek 7.14. Prawdopodobieństwa przekroczenia kosztu pod warunkiem przekroczenia terminu w czasie realizacji budynków hotelowych (H).	114
Rysunek 7.15. Prawdopodobieństwa przekroczenia terminu pod warunkiem przekroczenia kosztu w czasie realizacji centrów handlowych (G).	115
Rysunek 7.16. Prawdopodobieństwa przekroczenia terminu pod warunkiem przekroczenia kosztu w czasie realizacji centrów logistycznych (L).	115
Rysunek 7.17. Prawdopodobieństwo przekroczenia terminu pod warunkiem przekroczenia kosztu w grupie budynków mieszkalnych (M) w skali czasu realizacji 0 – 1.	116
Rysunek 7.18. Prawdopodobieństwo przekroczenia terminu pod warunkiem przekroczenia kosztu w grupie budynków biurowych (O) w skali czasu realizacji 0 – 1.	117
Rysunek 7.19. Prawdopodobieństwo przekroczenia terminu pod warunkiem przekroczenia kosztu w grupie budynków hotelowych (H) w skali czasu realizacji 0 – 1.	118
Rysunek 7.20. Prawdopodobieństwo przekroczenia terminu pod warunkiem przekroczenia kosztu w grupie centrów handlowych (G) w skali czasu realizacji 0 – 1.	118
Rysunek 7.21. Prawdopodobieństwo przekroczenia terminu pod warunkiem przekroczenia kosztu w grupie centrów logistycznych (L) w skali czasu realizacji 0 – 1.	119
Rysunek 7.22. Prawdopodobieństwo przekroczenia terminu pod warunkiem przekroczenia kosztu w całej próbie badawczej, w grupach M, O, H, G i L.	120
Rysunek 8.1. Zbiorcze zestawienie wartości szacowanego kosztu przedsięwzięcia (EAC) na tle planowanego kosztu inwestycji (BAC) dla grupy budynków mieszkalnych (M). ..	133
Rysunek 8.2. Zbiorcze zestawienie wartości szacowanego ostatecznego kosztu przedsięwzięcia (EAC) na tle planowanego kosztu inwestycji (BAC) dla grupy budynków biurowych (O).	133
Rysunek 8.3. Zbiorcze zestawienie wartości szacowanego ostatecznego kosztu przedsięwzięcia (EAC) na tle planowanego kosztu inwestycji (BAC) dla grupy budynków hotelowych (H).	134
Rysunek 8.4. Zbiorcze zestawienie wartości szacowanego ostatecznego kosztu przedsięwzięcia (EAC) na tle planowanego kosztu inwestycji (BAC) dla grupy centrów handlowych (G).	134

Rysunek 8.5. Zbiorcze zestawienie wartości szacowanego kosztu przedsięwzięcia (EAC) w poszczególnych kwartylach na tle planowanego kosztu inwestycji (BAC) dla grupy centrów logistycznych (L).....	135
Rysunek 8.6. Zbiorcze zestawienie wartości szacowanego kosztu przedsięwzięcia (EAC) w poszczególnych kwartylach na tle planowanego kosztu inwestycji (BAC) dla grup inwestycji M, O, H, G i L.....	135
Rysunek 8.7. Zbiorcze zestawienie wartości szacowanego terminu zakończenia przedsięwzięcia (ETTC) w poszczególnych kwartylach dla grupy budynków mieszkalnych (M). ..	138
Rysunek 8.8. Zbiorcze zestawienie wartości szacowanego terminu zakończenia przedsięwzięcia (ETTC) w poszczególnych kwartylach dla grupy budynków biurowych (O).....	138
Rysunek 8.9. Zbiorcze zestawienie wartości szacowanego terminu zakończenia przedsięwzięcia (ETTC) w poszczególnych kwartylach dla grupy budynków hotelowych (H).	139
Rysunek 8.10. Zbiorcze zestawienie wartości szacowanego terminu zakończenia przedsięwzięcia (ETTC) w poszczególnych kwartylach dla grupy centrów handlowych (G).	139
Rysunek 8.11. Zbiorcze zestawienie wartości szacowanego terminu zakończenia przedsięwzięcia (ETTC) w poszczególnych kwartylach dla grupy centrów logistycznych (L).	140
Rysunek 8.12. Zbiorcze zestawienie wartości szacowanego terminu zakończenia przedsięwzięcia (ETTC) w poszczególnych kwartylach dla grup obiektów M, O, H, G i L.	141
Rysunek 8.13. Zbiorcze zestawienie wartości szacowanego całkowitego kosztu (EAC) i szacowanego terminu zakończenia przedsięwzięcia (ETTC) w poszczególnych kwartylach dla grupy budynków mieszkalnych (M).....	142
Rysunek 8.14. Zbiorcze zestawienie wartości szacowanego całkowitego kosztu (EAC) i szacowanego terminu zakończenia przedsięwzięcia (ETTC) w poszczególnych kwartylach dla grupy budynków biurowych (O).....	143
Rysunek 8.15. Zbiorcze zestawienie wartości szacowanego całkowitego kosztu (EAC) i szacowanego terminu zakończenia przedsięwzięcia (ETTC) w poszczególnych kwartylach dla grupy budynków hotelowych (H).	143
Rysunek 8.16. Zbiorcze zestawienie wartości szacowanego całkowitego kosztu (EAC) i szacowanego terminu zakończenia przedsięwzięcia (ETTC) w poszczególnych kwartylach dla grupy centrów handlowych (G).	144
Rysunek 8.17. Zbiorcze zestawienie wartości szacowanego całkowitego kosztu (EAC) i szacowanego terminu zakończenia przedsięwzięcia (ETTC) w poszczególnych kwartylach dla grupy centrów logistycznych (L).	144
Rysunek 8.18. Zbiorcze zestawienie wartości szacowanego całkowitego kosztu (EAC) i szacowanego terminu zakończenia przedsięwzięcia (ETTC) w poszczególnych kwartylach dla wszystkich grup obiektów (M, O, H, G i L).	145
Rysunek 9.1. Graficzna interpretacja wykresu pudełkowego.....	151
Rysunek 9.2. Wykresy pudełkowe dla grupy budynków mieszkalnych (M).....	152
Rysunek 9.3. Wykresy pudełkowe dla grupy budynków biurowych (O).....	153
Rysunek 9.4. Wykresy pudełkowe dla grupy budynków hotelowych (H)	154

Rysunek 9.5. Wykresy pudełkowe dla grupy centrów handlowych (G)	155
Rysunek 9.6. Wykresy pudełkowe dla grupy centrów logistycznych (L)	155
Rysunek 9.7. Wykresy pudełkowe wskaźnika wykonania budżetu (CPI) całej inwestycji, dla przedsięwzięć ujętych w poszczególnych grupach obiektów (M, O, H, G i L)	157

Streszczenie

Celem niniejszej dysertacji było określenie zależności pomiędzy przekroczeniem kosztu a przekroczeniem terminu realizacji w przedsięwzięciach budowlanych. W literaturze przedmiotu powszechnie przyjmuje się, że opóźnienia skutkują wzrostem kosztów, jednak przeprowadzone badania empiryczne wykazały, że współzależność tych parametrów nie jest jednoznaczna. Analiza statystyczna oparta na współczynnikach korelacji Pearsona i Spearmana wykazała brak istotnej korelacji pomiędzy przekroczeniem kosztu a terminem, co potwierdzono również analizą prawdopodobieństw warunkowych i badaniem trendów odchyień kosztowych oraz czasowych w poszczególnych kwartylach realizacji przedsięwzięć budowlanych.

W ramach badań przeanalizowano dane uzyskane z 41 zrealizowanych przedsięwzięć budowlanych, które zostały podzielone na pięć grup obiektów (budynki mieszkalne, biurowe, hotelowe, centra handlowe i centra logistyczne). Wykorzystano dane dotyczące ich kosztów i harmonogramów realizacji. Stwierdzono, że w większości analizowanych przypadków wartości przekroczenia kosztu pod warunkiem przekroczenia terminu były wyższe niż odwrotna zależność, co sugeruje większe ryzyko wzrostu kosztów w przypadku opóźnień niż wpływ wzrostu kosztów na wydłużenie harmonogramu. Badania wykazały, że współzależność przekroczeń kosztu i terminu ma zmienny charakter w czasie realizacji inwestycji i nie jest stała w żadnym z analizowanych sektorów budownictwa.

Analiza przebiegów zmienności przekroczenia kosztu i przekroczenia terminu wykazała, że nie są one w pełni zbieżne, co podważa powszechnie przyjmowane założenie o jednoznacznej zależności pomiędzy tymi parametrami. Wyniki wskazują, że przewidywanie końcowego kosztu i terminu realizacji w początkowych etapach budowy metodą wartości wypracowanej (EVM) jest obarczone dużą niepewnością, a prognozy uzyskują wiarygodność dopiero w późniejszych etapach realizacji przedsięwzięć.

Istotnym efektem praktycznym pracy jest opracowanie macierzy danych dotyczących odchyień kosztowych w odniesieniu do rezerwy budżetowej przyjętej przez banki finansujące inwestycje budowlane. Na podstawie przeprowadzonych analiz zaproponowano korektę wartości rezerwy budżetowej dla poszczególnych sektorów budownictwa, dostosowaną do rzeczywistych wartości przekroczeń kosztowych obserwowanych w badanych przedsięwzięciach.

Podjęta problematyka ma istotne znaczenie dla zarządzania przedsięwzięciami budowlanymi, gdyż umożliwia lepsze planowanie kosztów i terminów, zwiększając efektywność procesów inwestycyjnych. Wyniki badań mogą być przydatne dla inwestorów, menedżerów projektów oraz instytucji finansujących przedsięwzięcia budowlane, umożliwiając lepsze szacowanie ryzyka i alokację zasobów. Dalsze badania powinny skupić się na identyfikacji czynników przyczynowych przekroczeń oraz opracowaniu narzędzi sztucznej inteligencji wspomagających predykcję kosztów i terminów realizacji przedsięwzięć budowlanych.

Abstract

The objective of this dissertation was to determine the relationship between cost overruns and schedule overruns in construction projects. In the existing literature, it is commonly assumed that delays result in increased costs; however, empirical research conducted in this study has demonstrated that the interdependence of these parameters is not unequivocal. Statistical analysis based on Pearson and Spearman correlation coefficients indicated no significant correlation between cost overruns and schedule deviations, a finding further confirmed by the analysis of conditional probabilities and the examination of cost and time deviation trends in specific quartiles of project execution.

The study analyzed data obtained from 41 completed construction projects, categorized into five groups (residential buildings, office buildings, hotels, shopping centers, and logistics centers). The data included project costs and execution schedules. It was observed that, in most cases, the probability of cost overruns given a schedule overrun was higher than the reverse dependency, suggesting that the risk of cost escalation due to delays is greater than the impact of increased costs on schedule extensions. The research findings indicated that the interdependence between cost and schedule overruns is variable throughout the project execution phase and does not remain constant across the analyzed construction sectors.

The analysis of deviation trends for cost and schedule overruns revealed that they do not fully converge, challenging the widely accepted assumption of a direct correlation between these parameters. The results suggest that predicting final project costs and completion dates in the early stages of construction using the Earned Value Management (EVM) method is subject to significant uncertainty, with forecast accuracy improving only in the later phases of project execution.

A key practical outcome of this research is the development of a data matrix regarding cost deviations in relation to the budgetary reserves established by financial institutions funding construction projects. Based on the conducted analyses, an adjustment to the budget reserve values for various construction sectors has been proposed, aligning them with the actual cost deviations observed in the studied projects.

The addressed issue is of critical importance to construction project management, as it facilitates more accurate cost and schedule planning, thereby enhancing the efficiency of investment processes. The research findings may be beneficial to investors, project managers, and financial institutions involved in construction projects by improving risk assessment and resource allocation. Future research should focus on identifying causal factors of cost and schedule overruns and developing artificial intelligence-based tools to support the prediction of construction project costs and timelines.