

Załącznik 3

do wniosku o przeprowadzenie postępowania w sprawie nadania stopnia doktora habilitowanego



Politechnika Wroclawska

**Autoreferat  
z uwzględnieniem osiągnięć naukowych**

**dr inż. arch. Anna Hoła**  
Politechnika Wroclawska  
Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego  
Katedra Inżynierii Materiałów i Procesów Budowlanych

Wrocław, 28 sierpnia 2023 r.



## Spis treści

<b>1. Imię i nazwisko .....</b>	<b>4</b>
<b>2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe lub artystyczne – z podaniem podmiotu nadającego stopień, roku ich uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej .....</b>	<b>4</b>
<b>3. Informacja o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych lub artystycznych ...</b>	<b>4</b>
<b>4. Omówienie osiągnięć, o których mowa w art. 219 ust. 1 pkt 2 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2021 r. poz. 478 z późn. zm.). Omówienie to winno dotyczyć merytorycznego ujęcia przedmiotowych osiągnięć, jak i w sposób precyzyjny określać indywidualny wkład w ich powstanie, w przypadku, gdy dane osiągnięcie jest dziełem współautorskim, z uwzględnieniem możliwości wskazywania dorobku z okresu całej kariery zawodowej. ....</b>	<b>4</b>
4.1. <b>OSIĄGNIĘCIE I, główne:</b> Cykl powiązanych tematycznie artykułów naukowych pt.: „Metodyka nieniszczącej identyfikacji i przestrzenne obrazowanie poziomu wilgotności zabytkowych murów ceglanych z wykorzystaniem algorytmów uczenia maszynowego” .....	5
4.1.1. Wykaz artykułów naukowych stanowiących I osiągnięcie naukowe .....	5
4.1.2. Omówienie osiągnięcia naukowego.....	9
4.1.2.1. Wprowadzenie .....	9
4.1.2.2. Przedmiot i cel powiązanego tematycznie cyklu artykułów .....	14
4.1.2.3. Omówienie osiągniętych wyników .....	15
4.1.2.4. Podsumowanie .....	55
4.2. <b>OSIĄGNIĘCIE II, technologiczne:</b> System pomiarowy w postaci prototypowego hybrydowego tomografu elektrycznego do przestrzennego obrazowania wilgotności w murach .....	57
<b>5. Informacja o wykazywaniu się istotną aktywnością naukową albo artystyczną realizowaną w więcej niż jednej uczelni, instytucji naukowej lub instytucji kultury, w szczególności zagranicznej .....</b>	<b>60</b>
<b>6. Informacja o osiągnięciach dydaktycznych, organizacyjnych oraz popularyzujących naukę lub sztukę.....</b>	<b>61</b>
<b>7. Oprócz kwestii wymienionych w pkt. 1-6, wnioskodawca może podać inne informacje, ważne z jego punktu widzenia, dotyczące jego kariery zawodowej .....</b>	<b>63</b>



### 1. Imię i nazwisko

Anna Hoła

### 2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe lub artystyczne – z podaniem podmiotu nadającego stopień, roku ich uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej

- dyplom magistra inżyniera architekta, kierunek architektura i urbanistyka, specjalność architektura, Politechnika Wrocławska, Wydział Architektury, 2006.  
Tytuł pracy magisterskiej: „Głębocko – park sportu i rekreacji – strefa ciszy” (opiekun: dr inż. arch. Paweł Szkoda).
- **stopień naukowy doktora nauk technicznych** (z wyróżnieniem), w dyscyplinie architektura i urbanistyka, specjalność architektura i urbanistyka, Politechnika Wrocławska, Wydział Architektury, 2013.  
Tytuł rozprawy doktorskiej: „Wystawy i ekspozycje ogrodnicze we Wrocławiu, 1845–1929”  
promotorka: dr hab. inż. Marzanna Jagiełło, prof. uczelni; recenzentki: dr hab. inż. arch. Agata Zachariasz i dr hab. inż. arch. Krystyna Kirschke

### 3. Informacja o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych lub artystycznych

- Politechnika Wrocławska, Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego, Zakład Fizyki Budowli i Komputerowych Metod Projektowania (zlikwidowany w grudniu 2019 r.),  
1.10.2013 – 31.03.2018 asystent naukowo-dydaktyczny,  
1.04.2018 – 31.12.2019 adiunkt naukowo-dydaktyczny.
- Politechnika Wrocławska, Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego, Katedra Budownictwa Ogólnego,  
1.01.2020 – 31.07.2021 adiunkt naukowo-dydaktyczny.
- Politechnika Wrocławska, Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego, Katedra Inżynierii Materiałów i Procesów Budowlanych,  
1.08.2021 – do chwili obecnej adiunkt naukowo-dydaktyczny.

### 4. Omówienie osiągnięć, o których mowa w art. 219 ust. 1 pkt 2 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2021 r. poz. 478 z późn. zm.). Omówienie to winno dotyczyć merytorycznego ujęcia przedmiotowych osiągnięć, jak i w sposób precyzyjny określać indywidualny wkład w ich powstanie, w przypadku, gdy dane osiągnięcie jest dziełem współautorskim, z uwzględnieniem możliwości wskazywania dorobku z okresu całej kariery zawodowej.

Podstawą do ubiegania się przeze mnie o nadanie stopnia doktora habilitowanego są dwa osiągnięcia ściśle wiążące się ze sobą. **Osiągnięciem I, głównym**, jest cykl powiązanych



tematycznie artykułów naukowych. **Osiągnięciem II** jest współautorskie oryginalne osiągnięcie technologiczne.

**4.1. OSIĄGNIĘCIE I, główne: Cykl powiązanych tematycznie artykułów naukowych pt.: „Metodyka nieniszczącej identyfikacji i przestrzenne obrazowanie poziomu wilgotności zabytkowych murów ceglanych z wykorzystaniem algorytmów uczenia maszynowego”**

**4.1.1. Wykaz artykułów naukowych stanowiących I osiągnięcie naukowe**

Osiągnięcie naukowe stanowi cykl **14** powiązanych tematycznie artykułów naukowych opublikowanych w latach 2017-2023. Trzydzieści z nich opublikowanych zostało w czasopiśmie z listy *Journal Citation Reports (JCR)*, w tym 3 w czasopiśmie *Automation in Construction*, które wg rankingu *Thomson Reuters Impact Factor List of Journals* na rok 2021 posiada najwyższy na świecie wskaźnik *Impact Factor* wśród czasopism z kategorii inżynieria lądowa, a jeden w recenzowanych materiałach z konferencji międzynarodowej. Cztery z zawartych w cyklu publikacji, to artykuły samodzielne, natomiast pozostałe powstały w wyniku pracy zespołowej – w czterech z nich, dwuosobowych, jestem pierwszą autorką, w pozostałych drugą lub trzecią. Zespołowość opublikowanych artykułów jest rezultatem podjętej przeze mnie współpracy badawczej i prowadzonych dyskusji naukowych z badaczami z ośrodków naukowych krajowych. W 6 artykułach byłam autorką korespondencyjną, co wiązało się z prowadzeniem krytycznych polemik z ich recenzentami.


Wszystkie wchodzące w skład cyklu artykuły wyszczególniłam poniżej w kolejności chronologicznej z podaniem danych bibliograficznych, a w tabelach 1 i 2 zestawiałam ich parametry naukometryczne oraz liczbę cytowań. Kopie artykułów wraz z oświadczeniami współautorów potwierdzającymi mój wkład autorski zamieściłam w Załączniku 4.

[A1] Hoła A. , Measuring of the moisture content in brick walls of historical buildings - the overview of methods. W: 3rd International Conference on Innovative Materials, Structures and Technologies (IMST 2017) : 27-29 September 2017, Riga, Latvia. [Bristol]: IOP Publishing, **2017**, art. 012067, s. 1-8.

(IOP Conference Series - Materials Science and Engineering, ISSN 1757-899X; vol. 251)

DOI: [10.1088/1757-899X/251/1/012067](https://doi.org/10.1088/1757-899X/251/1/012067)

*Punktacja MEiN z: 2013-2018: 15*







[A2] Goetzke-Pala A., Hoła A., Sadowski Ł. , A non-destructive method of the evaluation of the moisture in saline brick walls using artificial neural networks. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, **2018**, vol. 18, nr 4, s. 1729-1742.

DOI: [10.1016/j.acme.2018.07.004](https://doi.org/10.1016/j.acme.2018.07.004)







*Punktacja MEiN z: 2013-2018: 30*

*Impact Factor: 02.846 (2018)*



- [A3] Hoła A., Sadowski Ł. , A method of the neural identification of the moisture content in brick walls of historic buildings on the basis of non-destructive tests. *Automation in Construction*, **2019**, vol. 106, art. 102850, s. 1-15.  
DOI: [10.1016/j.autcon.2019.102850](https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.102850)  
Punktacja MEiN z: 2019-2021: 140 Impact Factor: 05.669 (2019)
- [A4] Hoła A., Sadowski Ł. , Verification of a nondestructive method for assessing the humidity of saline brick walls in historical buildings. *Applied Sciences*, **2020**, vol. 10, art. 6926, s. 1-12.  
DOI: [10.3390/app10196926](https://doi.org/10.3390/app10196926)  
Punktacja MEiN z: 2019-2021: 100 Impact Factor: 02.679 (2020)
- [A5] Hoła A. , Methodology for the in situ testing of the moisture content of brick walls: an example of application. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, **2020**, vol. 20, art. 114, s. 1-13.  
DOI: [10.1007/s43452-020-00120-3](https://doi.org/10.1007/s43452-020-00120-3)  
Punktacja MEiN z: 2019-2021: 140 Impact Factor: 04.369 (2020)
- [A6] Rymarczyk T., Kłosowski G. , Hoła A., Sikora J., Wołowiec T., Tchórzewski P., Skowron S., Comparison of machine learning methods in electrical tomography for detecting moisture in building walls. *Energies*, **2021**, vol. 14, nr 10, art. 2777, s. 1-22.  
DOI: [10.3390/en14102777](https://doi.org/10.3390/en14102777)  
Punktacja MEiN z: 2019-2021: 140 Impact Factor: 03.252 (2021)
- [A7] Kłosowski G. , Hoła A., Rymarczyk T., Skowron Ł., Wołowiec T., Kowalski M., The concept of using LSTM to detect moisture in brick walls by means of electrical impedance tomography. *Energies*, **2021**, vol. 14, nr 22, art. 7617, s. 1-20.  
DOI: [10.3390/en14227617](https://doi.org/10.3390/en14227617)  
Punktacja MEiN z: 2019-2021: 140 Impact Factor: 03.252 (2021)
- [A8] Rymarczyk T., Kłosowski G. , Hoła A., Sikora J., Tchórzewski P., Skowron Ł. Optimising the use of machine learning algorithms in electrical tomography of building walls: pixel oriented ensemble approach. *Measurement*, **2022**, vol. 188, art. 110581, s. 1-14.  
DOI: [10.1016/j.measurement.2021.110581](https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.110581)  
Punktacja MEiN z: 2019-2021: 200 Impact Factor: 05.600 (2022)  
Punktacja MEiN z 2023: 200



- [A9] Hoła A. , Czarnecki S., Brick wall moisture evaluation in historic buildings using neural networks. *Automation in Construction*, **2022**, vol. 141, art. 104429, s. 1-15.  
DOI: [10.1016/j.autcon.2022.104429](https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104429)  
Punktacja MEiN z: 2019-2021: 140 Impact Factor: 10.517 (2022)  
Punktacja MEiN z 2023: 200
- [A10] Kłosowski G. , Hoła A., Rymarczyk T., Mazurek M., Niderla K., Rzemieniak M., Using machine learning in electrical tomography for building energy efficiency through moisture detection. *Energies*, **2023**, vol. 16, nr 4, art. 1818, s. 1-33.  
DOI: [10.3390/en16041818](https://doi.org/10.3390/en16041818)  
Punktacja MEiN z: 2023: 140 Impact Factor: 03.252 (2022)
- [A11] Hoła A. , Czarnecki S., Random forest algorithm and support vector machine for nondestructive assessment of mass moisture content of brick walls in historic buildings. *Automation in Construction*, **2023**, vol. 149, art. 104793, s. 1-15.  
DOI: [10.1016/j.autcon.2023.104793](https://doi.org/10.1016/j.autcon.2023.104793)  
Punktacja MEiN z: 2023: 200 Impact Factor: 10.517 (2022)
- [A12] Kłosowski G. , Hoła A., Rymarczyk T., Mazurek M., Niderla K., Rzemieniak M., Use of the double-stage LSTM network in electrical tomography for 3D wall moisture imaging. *Measurement*, **2023**, vol. 213, art. 112741, s. 1-13.  
DOI: [10.1016/j.measurement.2023.112741](https://doi.org/10.1016/j.measurement.2023.112741)  
Punktacja MEiN z: 2023: 200 Impact Factor: 05.600 (2022)
- [A13] Hoła A. , Verification of non-destructive assessment of moisture content of historical brick walls using random forest algorithm. *Applied Sciences*, **2023**, vol. 13, nr 10, s. 1-14.  
DOI: [10.3390/app13106006](https://doi.org/10.3390/app13106006)  
Punktacja MEiN z: 2023: 100 Impact Factor: 02.700 (2022)
- [A14] Hoła A. , Methodology of the quantitative assessment of the moisture content of saline brick walls in historic buildings using machine learning. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, **2023**, vol. 23, nr 3, art. 141, s. 1-15.  
DOI: [10.1007/s43452-023-00679-7](https://doi.org/10.1007/s43452-023-00679-7)  
Punktacja MEiN z: 2023: 140 Impact Factor: 04.400 (2022)

**Tabela 1.** Zestawienie parametrów naukowych cyklu powiązanych tematycznie artykułów [A1-A14]

Oznac.	Czasopismo	Rok opublikowania	Jedyny autor	Pierwszy autor	Autor koresp.	IF w roku opublikowania	Punktacja MNiSW (do 2018 r.)	Punktacja MEiN (od 2019 r.)
[A1]	<i>IOP Conference Series</i>	2017	x	-	x	-	15	-
[A2]	<i>Archives of Civil and Mechanical Engineering</i>	2018	-	-	-	02.846	30	-
[A3]	<i>Automation in Construction</i>	2019	-	x	-	05.669	-	140
[A4]	<i>Applied Sciences</i>	2020	-	x	-	02.679	-	100
[A5]	<i>Archives of Civil and Mechanical Engineering</i>	2020	x	-	x	04.369	-	140
[A6]	<i>Energies</i>	2021	-	-	-	03.252	-	140
[A7]	<i>Energies</i>	2021	-	-	-	03.252	-	140
[A8]	<i>Measurement</i>	2022	-	-	-	05.600	-	200
[A9]	<i>Automation in Construction</i>	2022	-	x	x	10.517	-	140
[A10]	<i>Energies</i>	2023	-	-	-	03.252	-	140
[A11]	<i>Automation in Construction</i>	2023	-	x	x	10.517	-	200
[A12]	<i>Measurement</i>	2023	-	-	-	05.600	-	200
[A13]	<i>Applied Sciences</i>	2023	x	-	x	02.700	-	100
[A14]	<i>Archives of Civil and Mechanical Engineering</i>	2023	x	-	x	04.400	-	140
Sumaryczny IF publikacji w cyklu						<b>64.653</b>		
Średni IF na publikację z IF						<b>4.973</b>		
Całkowita suma punktów MNiSW i MEiN nie podzielona na liczbę autorów								<b>1825</b>
Suma punktów MNiSW i MEiN przypadająca na wnioskodawczynię								<b>828,33</b>

**Tabela 2.** Zestawienie liczby cytowań tworzących cykl powiązanych tematycznie artykułów [A1-A14] (na dzień 25.08.2023 r.)

Oznac.	Rok opublikowania	W bazie <i>Web of Science</i>	W bazie <i>Scopus</i>	W bazie <i>Google Scholar</i>
[A1]	2017	31 (19)*	32 (17)*	0 (0)*
[A2]	2018	49 (44)	57 (51)	63 (56)
[A3]	2019	20 (16)	23 (19)	27 (23)
[A4]	2020	4 (3)	4 (3)	6 (5)
[A5]	2020	16 (11)	17 (10)	19 (12)
[A6]	2021	31 (29)	36 (33)	33 (24)
[A7]	2021	9 (7)	11 (9)	13 (11)
[A8]	2022	12 (9)	15 (12)	17 (14)
[A9]	2022	4 (1)	5 (2)	6 (3)
[A10]	2023	0 (0)	0 (0)	1 (1)
[A11]	2023	4 (2)	5 (3)	5 (3)
[A13]	2023	1 (1)	1 (1)	1 (1)
Suma		<b>181 (142)</b>	<b>206 (160)</b>	<b>191 (153)</b>

\* w nawiasie podano liczbę cytowań z pominięciem autocytowań



Z cyklem powiązanych tematycznie artykułów naukowych wiążą się wymienione poniżej wystąpienia na konferencjach naukowych zagranicznych i krajowych, gdzie prezentowane i dyskutowane były częściowe rezultaty prowadzonych przeze mnie badań.

- [AK1] International Conference on Innovative Materials, Structures and Technologies (IMST 2017), Ryga (Łotwa), tytuł wystąpienia: “Measuring of the moisture content in brick walls of historical buildings - the overview of methods”.
- [AK2] 12th European Conference on Non-destructive Testing, ECNDT 2018 (Göteborg, Szwecja), tytuł wystąpienia: “Non-destructive testing of the damp walls of the basements in a gothic monastery”.
- [AK3] 3rd Scientific Conference Environmental Challenges in Civil Engineering, ECCE 2018 (Opole, Polska), tytuł wystąpienia: “The moisture condition of the brick walls in the basements of a medieval monastery”.
- [AK4] Creative Construction Conference, CCC 2019 (Budapeszt, Węgry), tytuł wystąpienia: “Non-destructive in situ identification of the moisture content in saline brick walls using artificial neural networks”.
- [AK5] 66 Konferencja Naukowa Komitetu Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN oraz Komitetu Nauki PZITB, 2020 (Krynica Zdrój, Polska), tytuł wystąpienia: “Weryfikacja nieniszczącego neuronowego sposobu oceny wilgotności zasolonych murów ceglanych w budynkach zabytkowych”.
- [AK6] 12th International Conference on Structural Analysis of Historical Constructions, SAHC 2021 (Barcelona, Hiszpania), tytuł wystąpienia: “The state and condition of historical buildings located on partisan hill in Wrocław”.

#### **4.1.2. Omówienie osiągnięcia naukowego**

##### **4.1.2.1. Wprowadzenie**

Dbłość o utrzymanie w dobrym stanie budynków stanowiących dziedzictwo kultury materialnej ludzkości, przez które rozumie się tą część dawnych dóbr kultury, które przez kolejne pokolenia uznane zostały za wartościowe i dzięki temu dotrwały do chwili obecnej, leży w szeroko pojętym interesie społecznym. Dziedzictwo to jest bowiem zasobem ograniczonym, nieodnawialnym i narażonym na zniszczenie zarówno w wyniku nadmiernej i niekontrolowanej konsumpcji, jak też na skutek działania czynników zewnętrznych. Z tego powodu na całym świecie budynki o dużej wartości historycznej objęte są różnymi formami ochrony prawnej, a pieczę nad nimi sprawują służby konserwatorskie.

W odniesieniu do zabytkowych budynków murowanych z cegły, problemem z którym często przychodzi się mierzyć jest nadmierne zawilgocenie i zasolenie ścian i sklepień kondygnacji przyziemia, a nierzadko także ścian nadziemia. Należy w tym miejscu wyjaśnić, że nadmierne zawilgocenie definiowane jest jako przekroczenie dopuszczalnego poziomu wilgotności, wynoszącego 3% według przyjętej w literaturze klasyfikacji (Tabela 3), natomiast przez poziom





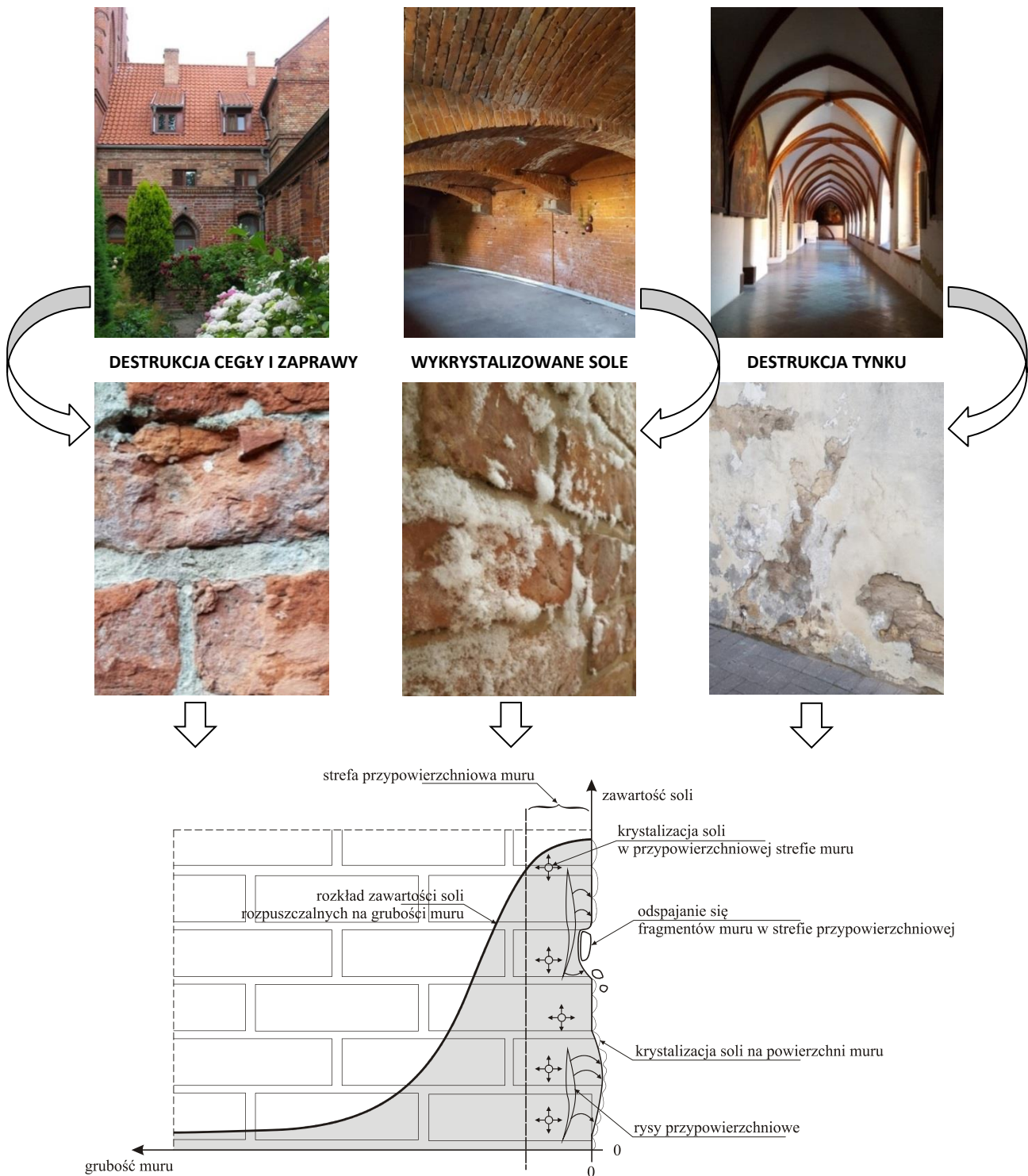
wilgotności należy rozumieć wartość wilgotności masowej  $U_m$  definiowanej jako stosunek procentowy masy wody zawartej w badanym materiale do jego masy w stanie suchym.

**Tabela 3.** Klasyfikacja wilgotności i zasolenia murów ceglanych, za [A5]

Klasyfikacja wilgotności		
Wilgotność $U_m$ w %	<3,0	mur o dopuszczalnej wilgotności
	3,0–5,0	mur o podwyższonej wilgotności
	5,0–8,0	mur średnio zawilgocony
	8,0–12,0	mur mocno zawilgocony
	>12,0	mur mokry
Klasyfikacja zasolenia		
Chlorki ( $\text{Cl}^-$ ) w %	<0,2	niskie
	0,2–0,5	średnie
	>0,5	wysokie
Azotany ( $\text{NO}_3^-$ ) w %	<0,1	niskie
	0,1–0,3	średnie
	>0,3	wysokie
Siarczany ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) w %	<0,5	niskie
	0,5–1,5	średnie
	>1,5	wysokie

Jednym z najistotniejszych czynników powodujących nadmierne zawilgocenie jest bezpośredni, długotrwały kontakt ceglanych murów z przylegającym gruntem, przy jednoczesnym braku zabezpieczeń przeciwwilgociowych tych murów, które to zabezpieczenia do początku XX w. nie były wykonywane. Zawarta w gruncie woda wraz z rozpuszczonymi w niej solami wnika wówczas stopniowo w mur i w wyniku podciągania kapilarnego przemieszcza się w coraz wyższe jego partie zawilgacając i zasalając go. Zawilgocenie to potęgowane jest dodatkowo przez wodę pochłanianą z powietrza przez krystalizujące w kapilarach muru sole, których dopuszczalny poziom również niejednokrotnie bywa przekroczony (za dopuszczalne zasolenie uznaje się takie, którego stężenie nie przekracza poziomów niskich, patrz Tabela 3). Procesy te są dobrze rozpoznane i opisane w literaturze przedmiotu, podobnie, jak ich negatywne konsekwencje m.in. postępująca w czasie destrukcja muru od strefy przypowierzchniowej w coraz głębsze jego partie, obniżenie wytrzymałości i pogorszenie właściwości cieplnych muru, rozwój grzybów i pleśni, czy pogorszenie warunków eksploatacyjnych pomieszczeń (Rys. 1).

Punktem wyjścia do rozwiązywania problemu nadmiernego zawilgocenia i powstrzymania powodowanych nim procesów niszczących mur jest wykonanie wiarygodnych badań poziomu jego wilgotności. W odniesieniu do budynków zabytkowych wykonanie takich badań nie jest zadaniem łatwym, ponieważ służby konserwatorskie tylko w bardzo ograniczonym zakresie wyrażają zgodę na ingerencję w strukturę zabytkowej tkanki. Zgoda taka udzielana jest w drodze postępowania administracyjnego, a uzgodnieniom podlegają zarówno liczba i miejsca wykonania odkrywek oraz pobrania próbek muru, jak i sposób przywrócenia obiektu do stanu sprzed rozpoczęcia badań.



**Rysunek 1.** Przykładowe efekty nadmiernego zawilgocenia i zasolenia murów ceglanych oraz ilustracja procesu destrukcji muru postępującej od strefy powierzchniowej, za [A3]

Objęcie budynku ochroną prawną wyklucza zatem swobodne stosowanie metod niszczących, bazujących na pobieraniu do badań próbek muru, np. metody grawimetrycznej, która uznawana jest za dającą najbardziej wiarygodne wyniki. Z tego powodu, do pomiaru wilgotności murów ceglanych w obiektach zabytkowych stosowane są głównie metody



nieniszczące. W przypadku wielu z nich aparatura badawcza produkowana jest seryjnie. Niewątpliwą zaletą metod nieniszczących jest brak ingerencji w strukturę muru, a co za tym idzie możliwość wykonania badań w dowolnej liczbie punktów badawczych, należy mieć jednak na uwadze to, że metody te pozwalają na identyfikację wilgotności jedynie w strefie przypowierzchniowej.

Metody nieniszczące są zaliczane do grupy metod pośrednich, co znaczy, że wynikiem bezpośredniego pomiaru jest inna, niż wilgotność, fizyczna bądź chemiczna cecha materiału, na wartość której wpływa zawarta w nim woda. W budownictwie znanych jest wiele takich metod, a wybór konkretnej z nich powinien być uzależniony od tego, jakiego rodzaju dane – jakościowe czy ilościowe, z większego obszaru czy w konkretnym punkcie – chcemy pozyskać. I tak, metody jakościowe, umożliwiające pozyskanie danych z większej powierzchni, są głównie wykorzystywane do lokalizowania zawilgoconych stref muru i monitorowania zachodzących w czasie zmian obrazu zawilgocenia. Natomiast metody pozwalające na uzyskanie punktowego pomiaru o charakterze ilościowym są szczególnie przydatne m.in. do określenia poziomu zawilgocenia (w oparciu o przyjętą w literaturze technicznej klasyfikacją), szacowania kosztów i czasu trwania osuszania, oceny skuteczności osuszania czy oceny skuteczności zabezpieczenia przeciwwilgociowego. W przypadku nieniszczących metod ilościowych do zidentyfikowania poziomu wilgotności konieczna jest znajomość zależności korelacyjnej między liczbą bezwymiarową  $X$ , będącą rezultatem pomiaru, a rzeczywistą wilgotnością masową  $U_m$  badanego muru, określaną metodą grawimetryczną. Zasadniczo zależność  $X-U_m$  należy opracować dla każdego nowo badanego obiektu, ponieważ wskazania mierników uzależnione są nie tylko od zawartości wilgoci w badanym materiale, ale również od innych jego cech, np. rodzaju i stężenia występujących w nim soli, a te dla każdego obiektu mogą być inne. Do opracowania zależności korelacyjnej konieczne jest pobranie do badań laboratoryjnych minimum 30 próbek muru, ale na taką ingerencję w zabytkowy mur nie zawsze jest zgoda służb konserwatorskich. Pobranie mniejszej liczby próbek muru również daje możliwość identyfikacji poziomu wilgotności, tyle że z wykorzystaniem zależności hipotetycznej dobranej spośród dostępnych w literaturze. Należy jednak zauważyć, że dostępność zależności hipotetycznych w literaturze jest niewielka, a uzyskiwane na ich podstawie wyniki są dużo mniej dokładne, co nie pozwala uznać tego sposobu identyfikacji poziomu wilgotności za w pełni wiarygodny. Z tego powodu, pomimo licznych zalet metod nieniszczących, w ostatnich latach podejmowane są próby odejścia od opisanego powyżej paradygmatu prowadzenia badań w budynkach o dużej wartości historycznej. W literaturze coraz częściej można spotkać opisy badań prowadzonych w oparciu o dwie lub więcej uzupełniających się metod nieniszczących, w celu uzyskania pełniejszego obrazu zawilgocenia.

Mając na uwadze wzmiankowane powyżej ograniczenia, a także aktualny stan wiedzy, zasadne jest podjęcie badań naukowych skutkujących opracowaniem takiego nieniszczącego sposobu identyfikacji poziomu wilgotności zabytkowych murów ceglanych, który pozwoli na uzyskanie jak najbardziej wiarygodnych rezultatów przy jak najmniejszej ingerencji w strukturę zabytkowej tkanki. W mojej ocenie sposób taki powinien zasadać się na wykorzystaniu sztucznej



inteligencji, która – jak to wynika z literatury przedmiotu – w obszarze budownictwa jest bardzo przydatna do rozwiązywania różnego rodzaju problemów naukowych związanych z miernictwem, nie została jednak dotąd wykorzystana do rozwiązania zasygnalizowanego problemu.

Ponieważ nie zaproponowano do tej pory modelu lub modeli nieniszczącej identyfikacji poziomu wilgotności w murach ceglanych in situ z wykorzystaniem uczenia maszynowego, brakuje wiedzy o tym, które algorytmy uczące mogą być przydatne do tego celu i które najbardziej poprawnie odwzorują rzeczywisty poziom wilgotności. Nie wiadomo ponadto jakie parametry wejściowe mogą być najbardziej przydatne w procesie uczenia sztucznej inteligencji, tak, aby predykowany poziom wilgotności był możliwie najbliższy rzeczywistemu. W konsekwencji tego brakuje również skutecznej metodyki identyfikacji poziomu wilgotności zabytkowych murów ceglanych z wykorzystaniem uczenia maszynowego.

Kolejnym nierozwiązanym zagadnieniem jest kwestia identyfikacji poziomu wilgotności i jej przestrzennego rozkładu na grubości zabytkowych murów ceglanych bez konieczności pobierania próbek do badań. Nie ma aparatury badawczej produkowanej seryjnie i umożliwiającej przestrzenne obrazowanie wilgotności w objętości muru ceglano, tymczasem wiedza o jej rozkładzie miałaby duże znaczenie zarówno poznawcze, jak i aplikacyjne. Możliwe byłyby wówczas m.in. nieinwazyjna identyfikacja przyczyn zawilgocenia oraz monitorowanie zachodzących w czasie zmian obrazu zawilgocenia, w tym prowadzenie badań porównawczych zawilgoconych murów przed i po wykonaniu w nich wtórnych izolacji przeciwwilgociowych i poddanych naturalnemu lub przyspieszonemu osuszaniu na różnych etapach tego procesu.

Studia magisterskie, a następnie doktoranckie na kierunku architektura i urbanistyka odbyte na Wydziale Architektury Politechniki Wrocławskiej uwrażliwiły mnie na kwestie dbania o stan zachowania architektonicznej spuścizny poprzednich pokoleń. W efekcie czego zasygnalizowaną powyżej tematyką zainteresowałam się jeszcze przed uzyskaniem stopnia naukowego doktora nauk technicznych. Świadczą o tym m.in. opublikowane autorskie i współautorskie prace naukowe i naukowo-techniczne (poz. 1 w pkt. 2.2 i poz. 1–4 w pkt. 2.4 w Załączniku 5) oraz współuczestnictwo w pracach badawczych udokumentowanych raportem (poz. 1 w pkt. 3.5 w Załączniku 5).

Naukowo tematem identyfikacji wilgotności w budynkach zabytkowych zajęłam się po obronie doktoratu i po podjęciu decyzji o swoim naukowym rozwoju w dyscyplinie inżynieria lądowa, geodezja i transport (do 2022 r. inżynieria lądowa i transport). Rozpoczęłam od przeprowadzenia gruntownego rozpoznania literaturowego i zidentyfikowania problemów naukowych nierozwiązanych, nawiązałam współpracę naukową z badaczami z ośrodków krajowych, sprecyzowałam ogólny cel badań i opracowałam ich plan, który na bieżąco korygowałam i konsekwentnie realizowałam. Uzyskane rezultaty prezentowałam na konferencjach naukowych i naukowo-technicznych zagranicznych i krajowych, a przede wszystkim sukcesywnie publikowałam w czasopiśmie naukowych budując cykl powiązanych tematycznie artykułów naukowych będący podstawą ubiegania się o nadanie mi stopnia doktora habilitowanego.



#### **4.1.2.2. Przedmiot i cel powiązanego tematycznie cyklu artykułów**

Przedmiotem cyklu powiązanych tematycznie artykułów naukowych są rezultaty własnych badań *in situ* poziomu wilgotności i zasolenia murów ceglanych w budynkach wzniesionych w różnych okresach historycznych. Badania te zrealizowane zostały metodami nieniszczącymi oraz niszczącą i posłużyły do zbudowania zbiorów danych, na których następnie wykonane zostały analizy numeryczne z wykorzystaniem algorytmów uczenia maszynowego. Podczas prac badawczych przeanalizowano w sumie kilkanaście nie stosowanych dotychczas do identyfikacji wilgotności zabytkowych murów ceglanych algorytmów sztucznych sieci neuronowych (*Artificial Neural Network – ANN*), algorytm lasów losowych (*Random Forest – RF*), metodę wektorów nośnych (*Support Vector Machine – SVM*) oraz różne metody algorytmiczne tworzenia przestrzennego obrazu wilgotności z wykorzystaniem tomografii elektrycznej. Uzyskane rezultaty badań i analiz pozwoliły mi na zrealizowanie sformułowanych poniżej celów ogólnego i szczegółowych.

I tak, **celem ogólnym cyklu powiązanych tematycznie artykułów było opracowanie metodyki nieniszczącej identyfikacji poziomu wilgotności zabytkowych murów ceglanych z wykorzystaniem algorytmów uczenia maszynowego oraz walidacja algorytmicznych metod tworzenia przestrzennego obrazu wilgotności na grubości murów z wykorzystaniem tomografii elektrycznej.**

Celami szczegółowymi badań i analiz było:

- krytyczny przegląd i analiza metod badania wilgotności murów ceglanych pod kątem możliwości ich stosowania w odniesieniu do murów zabytkowych, w warunkach *in situ*,
- opracowanie oryginalnej metodyki kompleksowych badań poziomu wilgotności murów ceglanych, zarówno dla budynków objętych, jak i nie objętych ochroną konserwatorską, wraz z jej zweryfikowaniem,
- wykazanie, że możliwa jest wiarygodna neuronowa ocena wilgotności zasolonego muru ceglanoego na podstawie kilku zadanych parametrów uzyskanych na podstawie przeprowadzonych początkowo w warunkach laboratoryjnych badań metodami nieniszczącymi lub powodującymi minimalną ingerencję w strukturę muru,
- zbudowanie na drodze badawczej reprezentatywnych zbiorów danych, z wykorzystaniem metod nieniszczących i minimalnie ingerujących w strukturę muru, na potrzeby identyfikacji poziomu wilgotności *in situ* zabytkowych murów ceglanych z wykorzystaniem uczenia maszynowego oraz na potrzeby walidacji metod algorytmicznych tworzenia przestrzennego obrazu wilgotności w tych murach z wykorzystaniem tomografii elektrycznej,
- analiza przydatności do wiarygodnej identyfikacji poziomu wilgotności i przestrzennego jej obrazowania w zabytkowych murach ceglanych algorytmów i algorytmicznych metod uczenia maszynowego, niestosowanych dotychczas w tym celu,

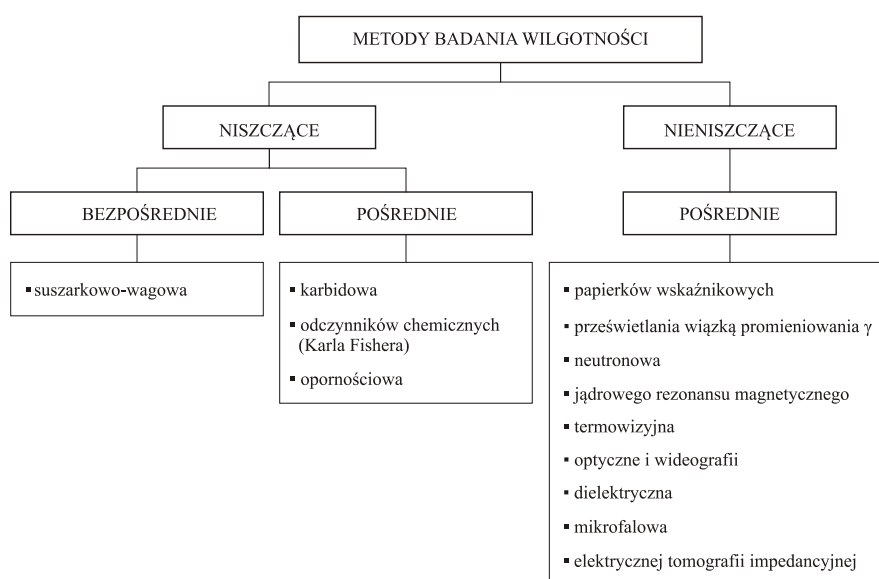




- opracowanie modeli wiarygodnej identyfikacji in situ poziomu wilgotności zabytkowych murów ceglanych z wykorzystaniem własnego reprezentatywnego zbioru danych uzyskanych na drodze badawczej metodami nieniszczącymi i minimalnie ingerującymi w zabytkową tkankę i algorytmów uczenia maszynowego oraz ich weryfikacja,
- opracowanie oryginalnej metodyki wiarygodnej ilościowej identyfikacji poziomu wilgotności zabytkowych murów ceglanych z wykorzystaniem metod nieniszczących i minimalnie ingerujących w zabytkową tkankę oraz algorytmów uczenia maszynowego, wraz z przykładem jej zastosowania,
- przeprowadzenie walidacji wybranych metod algorytmicznych tworzenia przestrzennego obrazu wilgotności w zabytkowych murach ceglanych z wykorzystaniem tomografii elektrycznej i wskazanie metod najwierniej odzwierciedlających obraz rozkładu wilgoci uzyskany na podstawie pomiarów walidacyjnych.

#### 4.1.2.3. Omówienie osiągniętych wyników

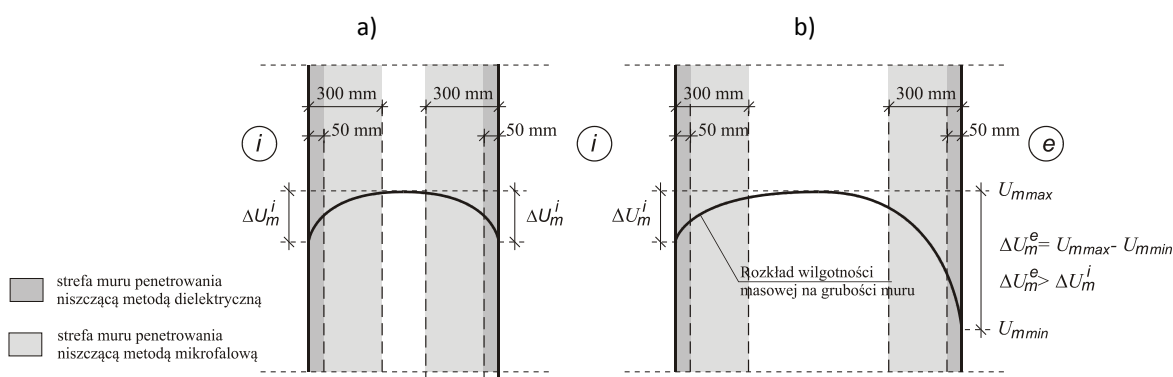
Cykl powiązanych tematycznie artykułów rozpoczyna artykuł [A1] opublikowany w recenzowanych materiałach konferencyjnych *IOP Conference Series - Materials Science and Engineering*, zaprezentowany i przedyskutowany na konferencji naukowej International Conference on Innovative Materials, Structures and Technologies (IMST 2017) w Rydze ([AK1]), w którym dokonałam krytycznego przeglądu i analizy metod badania poziomu wilgotności murów ceglanych pod kątem możliwości ich stosowania w budynkach zabytkowych. Zamieściłam w nim opracowaną przez siebie klasyfikację niszczących i nieniszczących, pośrednich i bezpośrednich metod badania wilgotności (Rys. 2). Wiedzę w tym zakresie uzupełniają rozdział 2 artykułu [A2] „Review and justification of the choice of non-destructive methods of testing moisture content” oraz rozdział 2 artykułu [A3] „A critical review of non-destructive methods of testing the moisture content of brick walls in historic buildings”.



Rysunek 2. Klasyfikacja metod badania wilgotności murów ceglanych, za [A1]



W artykule [A1] jednoznacznie wskazałam, wraz z uzasadnieniem, że spośród obecnie dostępnych nieniszczących pośrednich metod, które są najbardziej predysponowane do stosowania w warunkach in situ w budynkach o dużej wartości historycznej i pozwalające na uzyskanie pomiarów punktowych o charakterze ilościowym, a mianowicie metody dielektryczną i mikrofalową. Wyjaśniłam, że w metodzie dielektrycznej wykorzystywane jest zjawisko zmiany stałej dielektrycznej badanego materiału wskutek zawilgocenia, a w mikrofalowej mierzone jest tłumienie mikrofal przechodzących przez zawilgocony materiał. Wskazałam możliwe sposoby określania zależności  $U_m - X$ , gdzie  $U_m$  jest rzeczywistą wilgotnością masową określoną na podstawie pobranych próbek muru do badań w laboratorium niszczącą metodą grawimetryczną, w zależności od liczby pobranych próbek muru, niezbędnej do identyfikacji poziomu wilgotności. Omówiłam ponadto najistotniejsze uwarunkowania prowadzenia badań w powiązaniu z wyborem właściwej dla danej sytuacji in situ metody. Między innymi naświetliłam problem możliwych rozkładów wilgotności masowej na grubości muru ceglanego w zależności od wartości temperatury i wilgotności względnej powietrza po obu stronach muru, co determinuje wybór niszczącej metody badawczej z uwagi na różnice w głębokości penetrowania muru przez poszczególne urządzenia badawcze (Rys. 3).



**Rysunek 3.** Możliwe rozkłady wilgotności masowej na grubości muru: a) w ścianie wewnętrznej – przypadek gdy po obydwu stronach muru wartości temperatury i wilgotności względnej powietrza są podobne; b) w ścianie zewnętrznej, za [A1]

W artykule [A1] podniosłam również istotny moim zdaniem problem potrzeby sporządzania na podstawie uzyskanych rezultatów badań profili wilgotności na wysokości muru oraz na jego długości – po obwodzie ścian budynku, na różnych wysokościach nad posadzką lub gruntem. Przykłady takich profili, opracowanych na podstawie wyników własnych badań w dwóch różnych budynkach zabytkowych zostały zamieszczone w artykułach [A1] i [A5]. Sporządzanie profili wilgotności nie jest obecnie doceniane i szeroko stosowane, a w mojej ocenie jest niezbędne dla zapewnienia kompleksowości prowadzonych badań, i co za tym idzie wiarygodnego ustalenia przyczyn nadmiernego zawilgocenia. Profile takie stanowią również podstawę do podjęcia trafnych decyzji odnośnie do dalszego postępowania z zawilgoconym murem, takich jak: wybór optymalnej dla danej sytuacji metody zabezpieczenia przeciwwilgociowego i jego zrealizowanie, kontrolowanie w czasie skuteczności działania



wykonanego zabezpieczenia, oszacowanie ilości wody znajdującej się w murze, podjęcie decyzji o konieczności lub braku konieczności pozbycia się zawartych w murze szkodliwych dla niego soli, wybór sztucznego albo naturalnego sposobu osuszenia zawilgoconego muru, czy wreszcie oszacowanie czasu i kosztów takiego osuszenia.

Artykuł **[A1]** został dostrzeżony w środowisku badaczy zajmujących się podobną tematyką i do chwili obecnej był cytowany przez innych badaczy 19 razy w bazie *Web of Science* i 17 razy w bazie *Scopus*. **Moim znacznym wkładem w rozwój uprawianej przeze mnie dyscypliny inżynieria lądowa, geodezja i transport jest dokonanie krytycznego przeglądu i analizy metod badania poziomu wilgotności murów ceglanych i jednoznaczne wskazanie, wraz z uzasadnieniem, metod najbardziej predysponowanych do zastosowań in situ w budynkach zabytkowych, pozwalających na pomiar punktowy o charakterze ilościowym.**

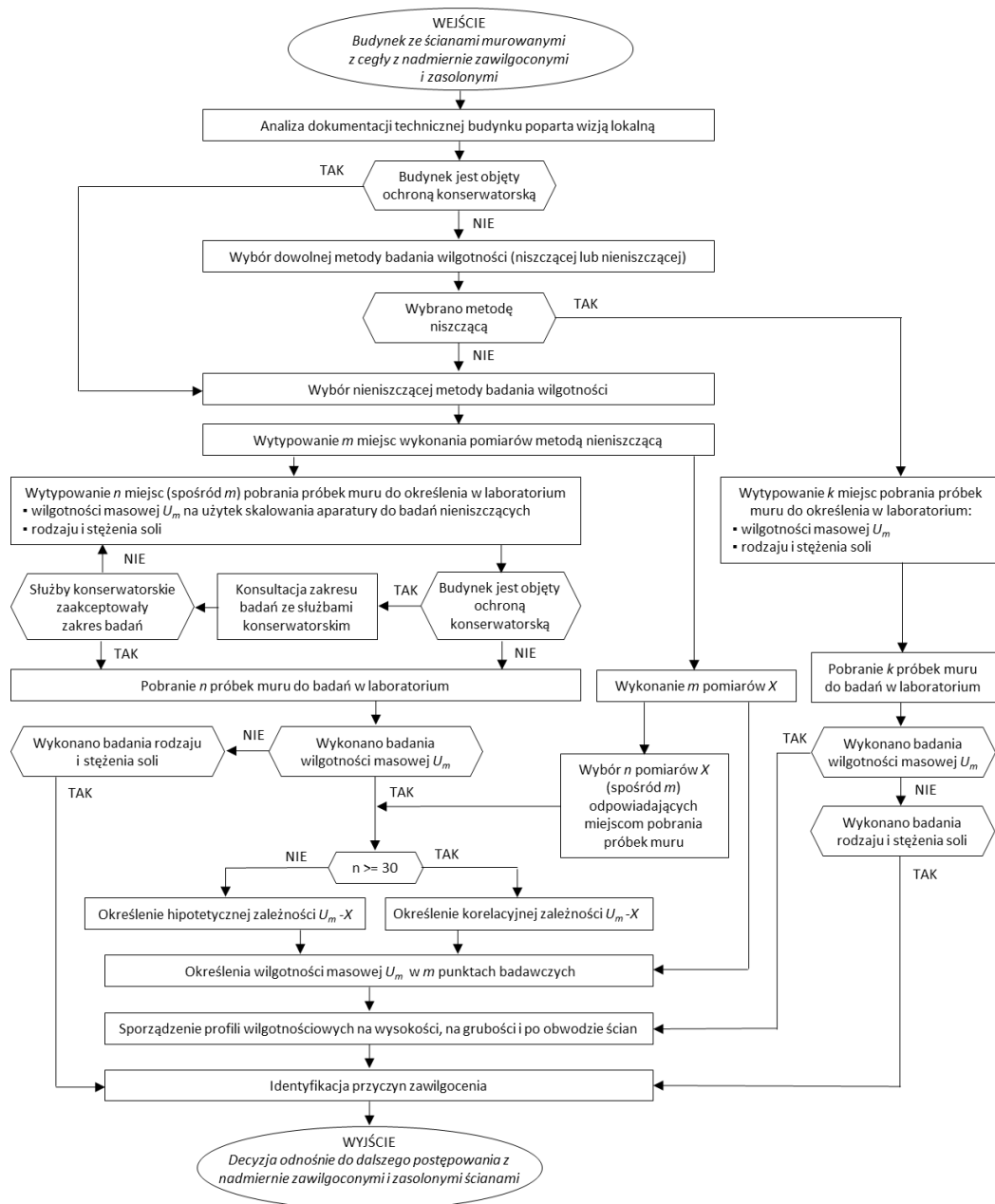
Z moich dotychczasowych doświadczeń zdobytych podczas prowadzenia badań wilgotności murów ceglanych w różnych budynkach, w tym również tych o dużej wartości historycznej, wynika, że aby uzyskane wyniki były wiarygodne, a podjęte na ich podstawie decyzje trafne, badania wilgotności nie powinny być jakościowe, tylko ilościowe. Nie mogą być ponadto pobieżne i fragmentaryczne, tylko kompleksowe i metodyczne. Co więcej, nie mogą być prowadzone bez świadomości ograniczeń stosowanej metody badawczej i wykorzystanej do badań aparatury, co także często ma miejsce. Z przeprowadzonego przeze mnie rozpoznania literaturowego wynika, że wprawdzie w niektórych pracach sygnalizowane są wybrane zalecenia i wskazówki odnośnie do prowadzenia badań wilgotnościowych, jednak nawet po zebraniu ich w całość, nie uzyskamy spójnej metodyki badań. Konsekwencją tego są liczne przypadki nietrafnych — bo opartych o niepełne, a więc mało wiarygodne badania — decyzji, a co za tym idzie działań, które nie tylko nie rozwiązują w pełni problemu nadmiernego zawilgocenia i zasolenia murów ceglanych, ale niejednokrotnie prowadzą również do ponoszenia nieuzasadnionych kosztów. Uznałam zatem za konieczne opracowanie oryginalnej metodyki kompleksowych badań poziomu wilgotności murów ceglanych, którą opublikowałam w *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, w artykule **[A5]**. Bazowałam przy tym przede wszystkim na własnych doświadczeniach oraz na wiedzy zawartej w publikacji **[A1]**. Częściowe wyniki badań opisanych w artykule **[A5]** zostały wcześniej zaprezentowane i przedyskutowane na konferencjach naukowych: European Conference on Non-destructive Testing (ECNDT 2018) w Göteborgu ([AK2]) i Scientific Conference Environmental Challenges in Civil Engineering (ECCE 2018) w Opolu ([AK3]).

Opracowana w artykule **[A5]** oryginalna metodyka zawiera dwie ścieżki postępowania w zależności od tego, czy budynek ze ścianami murowanymi z cegły jest objęty ochroną konserwatorską, czy też nie. Z tego powodu punktem wyjścia do prowadzenia badań zgodnie z zaproponowaną metodyką powinna być analiza dostępnej dokumentacji technicznej poparta wizją lokalną. Pozwala to na uzyskanie wstępnego obrazu sytuacji, a także wiedzy o tym, czy budynek jest objęty ochroną konserwatorską. Wiedza ta jest o tyle istotna, że w znacznym stopniu determinuje dalsze działania na obiekcie, a w szczególności wpływa na wybór metody





badawczej. Opracowaną metodykę szczegółowo opisałam i przedstawiłam w postaci grafu zamieszczonego na Rysunku 4 (wg [A5]).



Rysunek 4. Metodyka badań wilgotności murów ceglanych, wg [A5]

Opracowana przeze mnie oryginalna metodyka badań poziomu wilgotności murów ceglanych ma znaczenie poznawcze i użyteczne, a jej znajomość i stosowanie umożliwi prowadzenie badań w sposób konsekwentny i kompleksowy. Jej poprawność została przeze mnie zweryfikowana podczas badań wilgotności murów ceglanych w budynku z XIV wieku, co również zostało opisane w artykule [A5]. Artykuł ten jak dotąd był cytowany przez innych badaczy 11 razy w bazie *Web of Science*, 10 razy w bazie *Scopus* i 12 razy w bazie *Google Scholar*. **Moim znaczącym wkładem w rozwój uprawianej przeze mnie dyscypliny jest opracowanie oryginalnej metodyki**



**kompleksowych badań poziomu wilgotności murów ceglanych, uwzględniającej ścieżki postępowania zarówno dla muru objętego, jak i nieobjętego ochroną konserwatorską, oraz jej zweryfikowanie.**

Mając na uwadze niedogodność stosowania metod nieniszczących do ilościowych badań wilgotności, polegającą na konieczności każdorazowego wyznaczania dla badanego muru zależności korelacyjnej  $X-U_m$ , chcąc jednocześnie uzyskać bardziej wiarygodne wyniki, niż przy użyciu jednej tylko metody nieniszczącej, przy jak najmniejszej ingerencji w zabytkową tkankę muru, równolegle uwagę swoją skierowałam na możliwość wykorzystania narzędzi sztucznej inteligencji do opracowania sposobu wiarygodnej identyfikacji poziomu wilgotności in situ zabytkowych murów ceglanych, co do tej pory nie zostało opisane w literaturze przedmiotu.

W pierwszej kolejności postanowiłam sprawdzić przydatność sztucznych sieci neuronowych do identyfikacji poziomu wilgotności murów ceglanych. W tym celu nawiązałam współpracę z Adelajdą Goetzke-Palą i Łukaszem Sadowskim z mojego Wydziału, w wyniku której powstał artykuł [A2] opublikowany w *Archives of Civil and Mechanical Engineering*. Nie mając jeszcze bazy danych zawierającej wyniki własnych badań, na użytek przeprowadzenia analiz skorzystałam z bazy wyników udostępni mi przez Adelajdę Goetzke-Palę. Baza ta zawierała rezultaty przeprowadzonych w warunkach laboratoryjnych szerokich badań wilgotności i zasolenia modelowych murków ceglanych przechowywanych w różnych środowiskach wodnych: osobno w azotanowym ( $\text{NO}_3^-$ ), w chlorkowym ( $\text{Cl}^-$ ) i w siarczanowym ( $\text{SO}_4^{2-}$ ). Spośród udostępnionych mi wyników wybrałam część tworząc w ten sposób zbiór danych zawierający około 1100 zestawów danych. Każdy zestaw zawierał sześć wartości liczbowych, nazywanych dalej parametrami, uzyskanych na drodze różnych badań doświadczalnych, w tym pięć nie ingerujących lub ingerujących w stopniu minimalnym w strukturę muru przez co mogły znaleźć akceptację służb konserwatorskich, jeśli proponowany przeze mnie sposób identyfikacji wilgotności okazał by się skuteczny.

Pierwsze dwa wybrane przeze mnie parametry, oznaczone jako  $X_D$  [-] i  $X_M$  [-], uzyskano za pomocą nieniszczących pośrednich metod pomiaru wilgotności dielektrycznej i mikrofalowej, które jak to wykazałam w artykule [A1] predysponowane są do zastosowań in situ w budynkach zabytkowych. Do pomiarów użyto seryjnie produkowaną i powszechnie dostępną aparaturę badawczą: Gann Uni 2 (w metodzie dielektrycznej) i Trotec T600 (w metodzie mikrofalowej). Gann Uni 2 pozwala na pomiar zawilgocenia przegrody w strefie przypowierzchniowej, do głębokości około 50 mm, natomiast Trotec T600 na pomiar zawilgocenia w głębszych partiach muru, tj. do głębokości około 300 mm. Jak to wynika z literatury przedmiotu, rezultaty pomiaru metodami dielektryczną i mikrofalową są w pewnym stopniu uzależnione od obecności w murze soli. A zatem kolejne trzy wybrane przeze mnie parametry, oznaczone jako  $C$  [%],  $S$  [%] i  $A$  [%], opisywały stężenie molowe soli najczęściej występujących w murze w warunkach naturalnych. Były to odpowiednio sole chlorkowe, siarczanowe i azotanowe. Stężenie molowe soli oznaczono metodą półilościową na podstawie analizy chemicznej pobranych próbek muru. Próbki te posłużyły również do określenia rzeczywistej wilgotności masowej muru, opisanej jako parametr



$U_m$  [%]. Wykorzystano w tym celu bezpośrednią metodę grawimetryczną z użyciem suszarki laboratoryjnej. Poniżej, w Tabeli 4 zamieściłam wybrane zestawy wyników, jako przykładowe, za [A2].

**Tabela 4.** Przykładowe zestawy wyników wchodzące w skład bazy danych, za [A2]

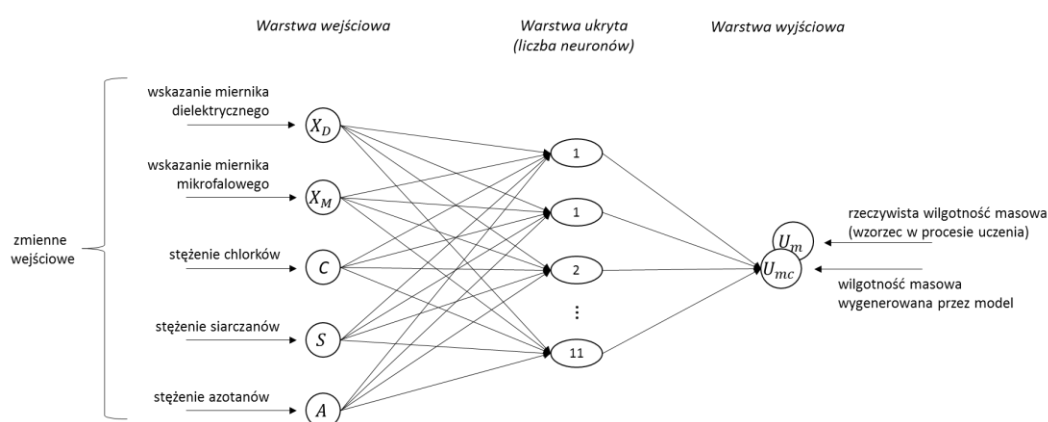
Nr zestawu danych [-]	Wskaźnik dielektrycznego $X_D$ [-]	Wskaźnik mikrofalowego $X_M$ [-]	Stężenie soli azotanowych A [%]	Stężenie soli chlorkowych C [%]	Stężenie soli siarczanowych S [%]	Rzeczywista wilgotność masowa $U_m$ [%]
1.	159,5	65,5	0,100	0,000	0,000	9,42
2.	159,7	68,1	0,100	0,000	0,000	9,42
4.	159,8	70,7	0,100	0,000	0,000	9,42
5.	159,2	67,0	0,100	0,000	0,000	9,42
7.	159,8	68,8	0,100	0,000	0,000	9,42
...	...	...	...	...	...	...
203.	163,8	72,1	0,000	0,260	0,000	7,37
204.	164,4	72,7	0,000	0,260	0,000	7,37
207.	164,9	71,0	0,000	0,260	0,000	7,37
208.	166,0	73,7	0,000	0,260	0,000	7,37
209.	165,1	74,5	0,000	0,260	0,000	7,37
...	...	...	...	...	...	...
601.	160,4	68,8	0,000	0,000	0,850	8,47
602.	159,9	69,1	0,000	0,000	0,850	8,47
603.	160,0	70,1	0,000	0,000	0,850	8,47
606.	160,5	67,5	0,000	0,000	0,850	8,47
609.	160,6	68,8	0,000	0,000	0,850	8,47
...	...	...	...	...	...	...
1170.	155,7	58,1	0,000	0,000	0,900	4,74
1171.	156,8	61,4	0,000	0,000	0,900	4,74
1172.	158,2	62,3	0,000	0,000	0,900	4,74
1173.	142,3	43,0	0,000	0,000	0,900	4,74
1176.	140,0	44,2	0,000	0,000	0,900	4,74

Parametry  $X_D$ ,  $X_M$ , C, S i A posłużyły jako zmienne wejściowe w procesach uczenia, testowania i weryfikacji sztucznej sieci neuronowej, parametr  $U_m$  posłużył dla sieci za wzorzec, natomiast ocenianą zmienną wyjściową był wygenerowany przez model parametr  $U_{mc}$  opisujący predykowaną wartość wilgotności masowej.

Analizy statystyczne i numeryczne przeprowadziłam we współpracy z Łukaszem Sadowskim. Analizy statystyczne wykazały przydatność wybranych parametrów jako wejściowych dla sztucznej sieci neuronowej. Wyniki obliczeń współczynników korelacji *Pearsona* ( $r$ ), *Spearmana* ( $\rho$ ) i *Kendalla* ( $\tau$ ) pomiędzy parametrami  $X_D$ ,  $X_M$ , C, S, A a  $U_m$  oraz wyniki przeprowadzonego dla zmiennych wejściowych testu istotności *Levene'a* wykazały, że w konstruowaniu warstwy wejściowej największe znaczenie mają parametry  $X_D$  i  $X_M$ , natomiast parametry C, S i A należy traktować jako pomocnicze.

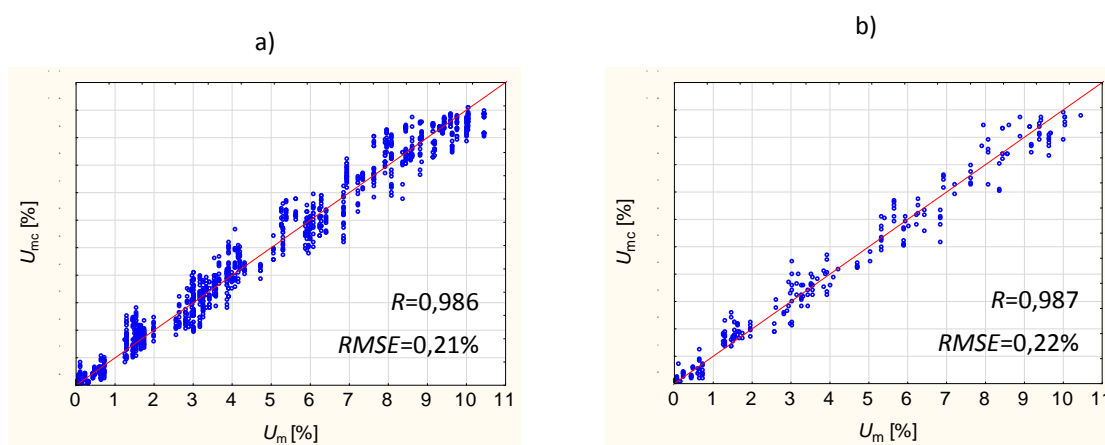


W celu doboru optymalnej struktury sztucznej sieci neuronowej (SSN) przeprowadzone zostały wstępne analizy numeryczne z użyciem wytypowanej na podstawie dokonanego przeze mnie rozpoznania literaturowego SSN jednokierunkowej wielowarstwowej ze wsteczną propagacją błędów (*MLP*) i trzema algorytmami: *Conjugate gradient*, *Gradient descent* i *Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno (BFGS)*. Liczbę neuronów warstwy ukrytej przyjęto w zakresie od 5 do 13. Na podstawie średnich wartości pierwiastka błędów średniokwadratowego *RMSE* i współczynnika korelacji liniowej *R* uzyskanych w procesie uczenia i testowania przeprowadzonego z wykorzystaniem wyżej wymienionych algorytmów do dalszych analiz wybrano sztuczną sieć neuronową jednokierunkową wielowarstwową ze wsteczną propagacją błędów, algorytmem *BFGS*, liczbą neuronów warstwy ukrytej 11 oraz funkcją aktywacji warstwy ukrytej logistyczną. Jej strukturę pokazano na Rysunku 5.



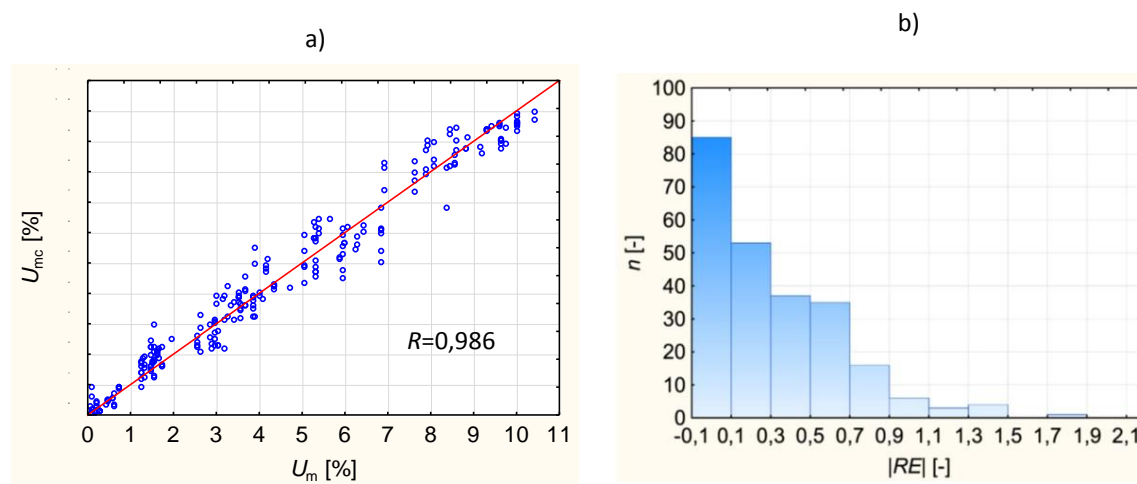
**Rysunek 5.** Struktura sztucznej sieci neuronowej wybranej do oceny wilgotności masowej, wg [A2]

Uzyskane bardzo wysokie wartości współczynnika korelacji liniowej *R* wynoszące dla procesu uczenia i testowania odpowiednio 0,986 i 0,987 oraz niskie wartości błędów *RMSE* wynoszące odpowiednio 0,21% i 0,22% świadczą o tym, że sieć poprawnie odwzorowała dane uczące i testujące (Rys. 6).



**Rysunek 6.** Zależność między wilgotnością masową  $U_m$  uzyskaną na podstawie badań doświadczalnych a wilgotnością  $U_{mc}$  zidentyfikowaną przez SSN w procesach: a) uczenia; b) testowania, za [A2]

Rezultaty weryfikacji doświadczalnej również wskazały na poprawną identyfikację danych walidacyjnych. W procesie tym wartość  $R$  wyniosła 0,986 (Rys. 7a), natomiast średnia wartość błędu względnego  $|RE|$  wilgotności masowej  $U_m$  uzyskanej na podstawie badań doświadczalnych i  $U_{mc}$  zidentyfikowanej przez SSN wyniosła 9,79%, przy jednoczesnym niewielkim rozrzucie uzyskanych wartości tego błędu (Rys. 7b).



**Rysunek 7.** Zależność między wilgotnością masową  $U_m$  uzyskaną na podstawie badań doświadczalnych a wilgotnością  $U_{mc}$  zidentyfikowaną przez SSN w procesie weryfikacji (a) oraz histogram błędu względnego  $|RE|$  wilgotności masowej  $U_m$  uzyskanej na podstawie badań doświadczalnych i wilgotności  $U_{mc}$  zidentyfikowanej przez SSN (b), wg [A2]

Szczegółowe wyniki analiz statystycznych i numerycznych zostały zamieszczone w artykule [A2], który został dostrzeżony w środowisku badaczy i do chwili obecnej był cytowany 44 razy w bazie *Web of Science* i 51 razy w bazie *Scopus* i 56 razy w bazie *Google Scholar*. **Moim znacznym wkładem w rozwój uprawianej przeze mnie dyscypliny jest dowiedzenie, że możliwa jest wiarygodna identyfikacja poziomu wilgotności zasolonego muru ceglanego za pomocą sztucznej sieci neuronowej o odpowiednio dobranej strukturze i algorytmie uczenia, na podstawie 5 zadanych parametrów uzyskanych metodami nieniszczącymi i minimalnie ingerującymi w zabytkową tkanę, w tym wykazanie, że predysponowana jest do tego SSN jednokierunkowa wielowarstwowa ze wsteczną propagacją błędów i algorytmem *Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno*. Wkładem jest ponadto wykazanie, że do tej oceny najbardziej przydatne są parametry  $X_D$  i  $X_M$  opisujące pośrednio wilgotność muru, a parametry  $C$ ,  $S$ ,  $A$  opisujące stężenie molowe soli należy traktować jako pomocnicze.**

Po wykonaniu wstępnych analiz na zbiorze zawierającym dane uzyskane w warunkach laboratoryjnych rozpoczął budowanie własnego reprezentatywnego zbioru danych zawierającego rezultaty badań in situ wilgotności i zasolenia murów ceglanych w budynkach zabytkowych. Zależało mi na pozyskaniu danych z istniejących budynków, których mury poddawane były przez lata naturalnym procesom zawilgacania i zasolenia. Zawarte w takim zbiorze wartości wilgotności i zasolenia mieściłyby się w dużo szerszych przedziałach, niż te

pozyskane w wyniku badań laboratoryjnych, przeprowadzonych w ściśle określonych warunkach, często rozbieżnych z tymi naturalnymi. Odnosi się to na przykład do sposobu zasolenia nadmiernie zawilgoconego muru ceglanego, w którym w warunkach naturalnych jednocześnie występują różne sole w różnych stężeniach.

Na początku badaniom poddałam mury w pięciu budynkach wzniesionych w różnych okresach historycznych, do wybudowania których użyto cegły ceramicznej, a mianowicie:

- ściany zewnętrzne i wewnętrzne oraz sklepienia piwnic pod północnym skrzydłem klasztoru Opactwa Benedyktynki w Żarnowcu, l. 80 XIII w. (Rys. 8c),
- ściany zewnętrzne i wewnętrzne przyziemia w pawilonie perystylowym na Wzgórzu Partyzantów we Wrocławiu, l. 70 XIX w. (Rys. 8a),
- ściany zewnętrzne piwnic w budynku fundacji Heimannów we Wrocławiu, l. 50. XIX w.,
- ściany zewnętrzne i wewnętrzne piwnic i parteru w kamienicy mieszkalnej w Nowej Rudzie, koniec XIX w.
- ściany zewnętrzne i wewnętrzne piwnic w kamienicy we Wrocławiu, początek XX w. (Rys. 8b).

a)



b)



c)



**Rysunek 8.** Przykładowe widoki budynków, w których prowadzono badania w celu zbudowania zbioru danych: a) pawilon perystylowy na Wzgórzu Partyzantów we Wrocławiu; b) kamienica mieszkalna we Wrocławiu; c) klasztoru Opactwa Benedyktynki w Żarnowcu, za [A3], [A11]

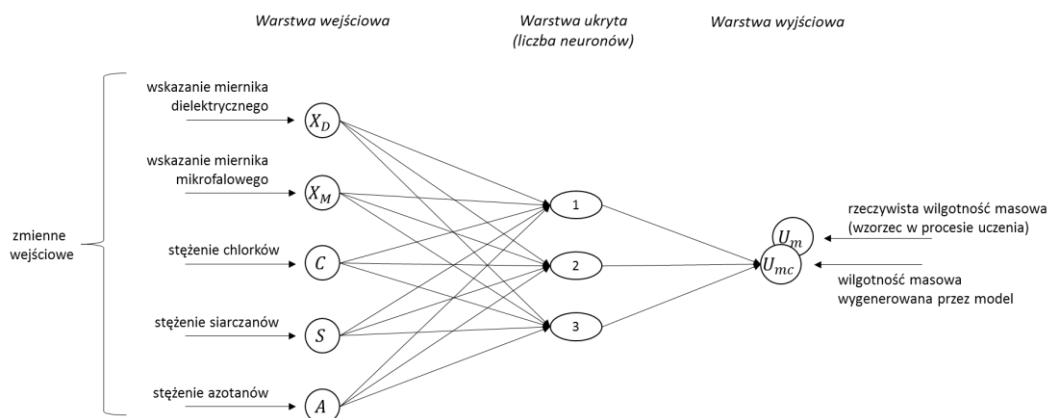
Badania doświadczalne zostały przeprowadzone opisanymi wcześniej metodami: in situ nieniszczącymi dielektryczną i mikrofalową, oraz w laboratorium grawimetryczną i półilościową, na podstawie pobranych próbek muru. Próbki pobierane były z cegieł, ze strefy przypowierzchniowej muru, gdzie zawartość soli jest największa. Gramatura próbek wynosiła około 50 g ( $\pm 5$  g). Aby uzyskane rezultaty badań wilgotnościowych i zasolenia mieściły się w szerokich przedziałach i tym samym aby zbiór danych był jak najbardziej reprezentatywny, w każdym z obiektów próbki pobierano zarówno po obwodzie, jak i na różnych wysokościach ścian. Starano się aby liczba punktów badawczych w każdym z obiektów była zbliżona, chociaż finalnie liczba ta była uzależniona od uzyskanej wcześniej zgody służb konserwatorskich.





Zbudowany przeze mnie zbiór danych liczył początkowo 205 zestawów wyników, z których każdy, tak jak we wcześniejszych badaniach, zawierał 6 parametrów  $X_D$ ,  $X_M$ ,  $X_C$ ,  $X_S$ ,  $X_A$  i  $U_m$  (w celu ujednoczenia oznaczeń przyjęte we wcześniejszych badaniach symbole  $C$ ,  $S$  i  $A$  zostały zastąpione przez  $X_C$ ,  $X_S$ ,  $X_A$ ). Zbiór ten w całości zamieszczony został w pracy [A3], opublikowanej w *Automation in Construction* i cytowanej 16 razy w bazie *Web of Science*, 19 razy w bazie *Scopus* i 23 razy w bazie *Google Scholar*.

Analizy statystyczne i numeryczne z wykorzystaniem nowo zbudowanego zbioru danych przeprowadziłam we współpracy z Łukaszem Sadowskim. Podobnie, jak w dotychczasowych analizach, parametry  $X_D$ ,  $X_M$ ,  $X_C$ ,  $X_S$  i  $X_A$  posłużyły jako zmienne wejściowe w procesach uczenia, testowania i weryfikacji sztucznej sieci neuronowej, parametr  $U_m$  posłużył dla sieci za wzorzec, natomiast ocenianą zmienną wyjściową był wygenerowany przez model parametr  $U_{mc}$  opisujący predykowaną wartość wilgotności masowej. Analizy statystyczne, zamieszczone w pracy [A3], potwierdziły wcześniejsze ustalenia dotyczące przydatności tych parametrów wejściowych na użytek identyfikacji wilgotności z wykorzystaniem sztucznych sieci neuronowych. Na podstawie wstępnych analiz numerycznych mających na celu dobór optymalnej struktury sieci i szczegółowo przedstawionych w pracy [A3], przyjęto do uczenia i testowania inną, niż we wcześniejszych analizach, sztuczną sieć neuronową jednokierunkową wielowarstwową ze wsteczną propagacją błędów, algorytmem gradientów sprzężonych (*Conjugate gradient*) i liczbą neuronów warstwy ukrytej 3 (Rys. 9).

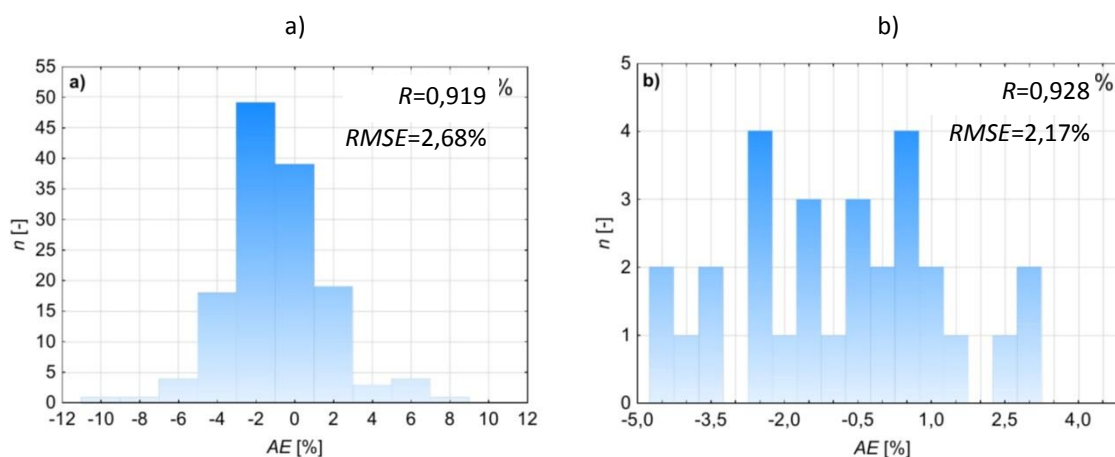


**Rysunek 9.** Struktura sztucznej sieci neuronowej wybranej do oceny wilgotności masowej, wg [A3]

Uzyskane wartości współczynnika korelacji liniowej  $R$  wynoszące dla procesu uczenia, testowania i weryfikacji odpowiednio 0,919, 0,928 i 0,906 oraz niskie wartości błędów  $RMSE$  wynoszące odpowiednio 2,68%, 2,17% i 2,21% (Rys. 10) świadczą o tym, że sieć poprawnie odwzorowała dane uczące i testujące. W procesie weryfikacji uzyskano satysfakcjonującą średnią wartość błędów bezwzględnych  $|AE|$ , która wyniosła 1,79%, średnia wartość błędów względnych  $|RE|$  była jednak dosyć wysoka i wyniosła 60,57%. Rezultaty te zostały przed opublikowaniem w



[A3] zaprezentowane i przedyskutowane na konferencji naukowej Creative Construction Conference (CCC 2019) w Budapeszcie ([AK4]).



**Rysunek 10.** Przykładowe histogramy błędu bezwzględnego  $|AE|$  wilgotności masowej  $U_m$  uzyskanej na podstawie badań doświadczalnych i wilgotności  $U_{mc}$  zidentyfikowanej przez SSN dla procesu: a) uczenia; b) testowania, za [A3]

Postanowiłam ponadto przeprowadzić niezależną weryfikację doświadczalną wskazanej w artykule [A3] sztucznej sieci neuronowej na bazie nowych, niewykorzystanych dotąd danych, żeby sprawdzić jaka będzie w takiej sytuacji dokładność odwzorowania przez tą sieć rzeczywistego poziomu wilgotności. Wyniki tej weryfikacji, którą przeprowadziłam we współpracy z Łukaszem Sadowskim zostały zaprezentowane i przedyskutowane na 66 Konferencji Naukowej Komitetu Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN oraz Komitetu Nauki PZITB, KRYNICA 2020, w Krynicy-Zdroju ([AK]), a następnie opublikowane w czasopiśmie *Applied Sciences*, w artykule [A4] cytowanym po 3 razy w bazach *Web of Science* i *Scopus* oraz 5 razy w bazie *Google Scholar*.

Na potrzebę pozyskania danych do tej niezależnej weryfikacji doświadczalnej badaniom poddałam mury ceglane w dwóch budynkach. Były to:

- ściany zewnętrzne przyziemia budynku pofolwarcznego we wsi Zabrodzie, l. 90 XIX w.
- ściany zewnętrzne i wewnętrzne przyziemia w klasztorze OO. Redemptorystów we Wrocławiu, początek XX w.

Rezultaty analiz numerycznych, przeprowadzonych na 15 zestawach wyników, wskazały na poprawną, ale nieco gorszą, niż wcześniej, identyfikację danych walidacyjnych. Świadczyły o tym uzyskana wartość współczynnika korelacji liniowej  $R$  równa 0,807 (wcześniej 0,906), niska średnia wartość błędu bezwzględnego  $|AE|$  wynosząca 1,16% oraz niezbyt wysoka jak na badania in situ średnia wartość błędu względnego  $|RE|$  wynosząca 19,02%. Co więcej, średnia wartość wilgotności  $U_{mc}$  zidentyfikowanej przez sieć, wynosząca 5,59%, była bliska średniej wartości wilgotności rzeczywistej  $U_m$ , wynoszącej 5,68%, co ilustruje Tabela 5.





**Tabela 5.** Porównawcze rezultaty weryfikacji doświadczalnej potwierdzające poprawną identyfikację danych walidacyjnych przez SSN, za [A4]

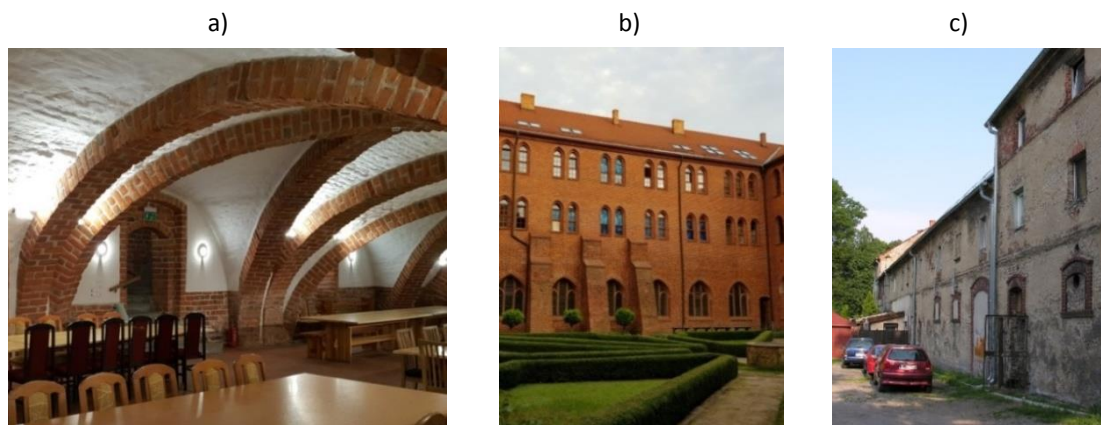
Nr zestawu danych [-]	Rzeczywista wilgotność masowa $U_m$ [%]	Wilgotność masowa określona z wykorzystaniem SSN $U_{mc}$ [%]	Błąd bezwzględny $ \Delta U_m $ [%]	Błąd względny $ RE $ [%]
1.	8,32	10,49	2,17	20,71
2.	9,75	7,77	1,98	25,46
3.	6,87	5,25	1,62	30,82
4.	4,57	5,67	1,10	19,40
5.	5,50	4,72	0,78	16,42
6.	3,00	2,67	0,33	12,53
7.	7,21	5,68	1,53	26,93
8.	6,18	5,34	0,84	15,80
9.	4,00	4,04	0,04	0,87
10.	4,95	4,93	0,02	0,31
11.	4,17	3,25	0,92	28,25
12.	7,14	10,41	3,27	31,43
13.	2,01	2,45	0,44	18,03
14.	5,09	5,16	1,01	17,38
15.	6,43	5,95	1,29	21,01
<b>Wartość średnia</b>	<b>5,68</b>	<b>5,59</b>	<b>1,16</b>	<b>19,02</b>

Moim znacznym wkładem w rozwój uprawianej przeze mnie dyscypliny jest wykazanie, że dokładność identyfikacji poziomu wilgotności in situ zabytkowych murów ceglanych za pomocą sztucznej sieci neuronowej o odpowiednio dobranej strukturze i algorytmie uczenia, a mianowicie SSN jednokierunkowej wielowarstwowej ze wsteczną propagacją błędu i algorytmem *Conjugate gradient*, w oparciu o 5 parametrów uzyskanych metodami nieniszczącymi i minimalnie ingerującymi w strukturę muru, jest satysfakcjonująca. Wkładem jest ponadto przeprowadzenie niezależnej weryfikacji doświadczalnej tej sieci neuronowej.

Analizując wartości parametrów oceniających jakość dopasowania modelu do danych uczących oraz trafność odwzorowania ( $R$  i  $RMSE$ ) uzyskanych w wyniku analiz numerycznych przeprowadzonych na dwóch różnych zbiorach danych: pierwszym zawierającym rezultaty badań otrzymane w warunkach laboratoryjnych (artykuł [A2]) i drugim obejmującym rezultaty badań pozyskane w warunkach in situ (artykuły [A3] i [A4]) widać wyraźnie, że dokładność odwzorowania rzeczywistego poziomu wilgotności przez sztuczną sieć neuronową była mniejsza w przypadku danych in situ. W tej sytuacji uznałam za zasadne kontynuowanie prac badawczych w celu zbudowania modelu, którego dokładność odwzorowywania byłaby większa, a co przełożyłoby się na większą wiarygodność proponowanego sposobu identyfikacji in situ poziomu wilgotności murów ceglanych w budynkach zabytkowych. Rezultaty tych badań i analiz są przedmiotem artykułu [A9] opublikowanego w 2022 roku w *Automation in Construction* i posiadającego 1 cytowanie w bazie *Web of Science*, 2 w bazie *Scopus* i 3 w bazie *Google Scholar*.

Przed wszystkim poszerzyłam dotychczasową bazę danych o wyniki badań wilgotności i zasolenia ceglanych murów kilku kolejnych budynków, w tym datowanych na XIV i XV wiek, a mianowicie:

- ścian zewnętrznych przyziemia pod zachodnim skrzydłem klasztoru pocysterskiego w Pelplinie, początek XIV w. (Rys. 11a),
- ścian zewnętrznych czteroskrzydłowych krużganków klasztoru pocysterskiego w Pelplinie, początek XV w. (Rys. 11b),
- ścian zewnętrznych i wewnętrznych rozbudowy zachodniego skrzydła klasztoru pocysterskiego w Pelplinie, l. 60. XIX w.,
- ścian zewnętrznych przyziemia budynku pofolwarcznego we wsi Zabrodzie, l. 90 XIX w. (Rys. 11a),
- ścian zewnętrznych i wewnętrznych przyziemia w klasztorze OO. Redemptorystów we Wrocławiu, początek XX w.
- ścian zewnętrznych i wewnętrznych przyziemia budynku mieszkalnego we wsi Zachowice, l. 20 XX w.,
- ścian zewnętrznych przyziemia budynku pofolwarcznego we wsi Małkowie, l. 30. XX w.



**Rysunek 11.** Przykładowe widoki budynków, w których prowadzono badania w celu zbudowania zbioru danych: refektarz (a) i krużganki (b) w klasztorze pocysterskim w Pelplinie; c) budynek pofolwarczny we wsi Zabrodzie, za [A9], [A11]

Spowodowało to nie tylko przyrost liczby danych w zbiorze o około 40% i przełożyło się na jego większą reprezentatywność, ale pozwoliło wprowadzić do bazy danych dodatkowy, nie uwzględniany dotychczas parametr. Parametr ten, opisujący rok budowy i oznaczony symbolem  $Y$ , związany jest z wiekiem budynków, a więc z czasem ekspozycji murów na działanie wilgoci i soli. Został on określony na podstawie analizy dostępnej dokumentacji i źródeł archiwalnych.

W efekcie powyższych działań otrzymałam zbiór danych liczący 290 zestawów wyników, z których każdy obejmował 7 parametrów uzyskanych opisanymi już metodami badawczymi. Zbiór ten został w całości opublikowany jako appendix do pracy [A9], a wcześniej część tych danych była przedmiotem prezentacji na konferencji naukowej International Conference on Structural Analysis of Historical Constructions (SAHC 2021) w Barcelonie ([AK6]), natomiast w Tabeli 6 zamieszczono przykładowe zestawy wyników wchodzące w jego skład. Jako zmienne wejściowe w procesach uczenia, walidacji i weryfikacji algorytmów sztucznej sieci neuronowej posłużyły parametry  $X_D$ ,  $X_M$ ,  $X_C$ ,  $X_S$ ,  $X_A$  i  $Y$ , za wzorzec w procesach uczenia posłużył parametr  $U_m$ , natomiast



ocenianą zmienną wyjściową był parametr  $U_{mc}$  opisujący wartość wilgotności masowej wygenerowaną przez model.

**Tabela 6.** Przykładowe zestawy wyników wchodzące w skład zbioru danych, za [A9]

Budynek lub jego część	Nr zestawu danych	Y [-]	$X_D$ [-]	$X_M$ [-]	$X_C$ [%]	$X_S$ [%]	$X_A$ [%]	$U_m$ [%]
Klasztor OO. Redemptorystów we Wrocławiu	1.	1910	104,0	35,7	0,224	0,450	0,050	4,00
	2.	1910	73,3	33,8	0,162	0,300	0,025	3,76
	...	...	...	...	...	...	...	...
	10.	1910	86,1	36,8	0,044	0,200	0,050	5,03
Budynek pofolwarczny we wsi Zabrodzie	11.	1890	149,0	79,2	0,550	0,300	0,250	11,53
	12.	1890	147,0	66,7	0,600	0,200	0,500	10,12
	...	...	...	...	...	...	...	...
Budynek pofolwarczny we wsi Małkowice	29.	1890	133,0	63,3	0,042	0,250	0,050	6,65
	30.	1930	118,0	71,9	0,040	0,800	0,000	9,67
	31.	1930	67,6	38,2	0,425	0,400	0,500	1,35
Budynek mieszkalny we wsi Zachowice	...	...	...	...	...	...	...	...
	39.	1930	70,5	31,3	0,205	0,750	0,500	1,08
	40.	1920	130,5	72,6	0,059	1,600	0,000	14,70
Budynek fundacji Heimannów we Wrocławiu	...	...	...	...	...	...	...	...
	60.	1920	55,6	33,0	0,062	1,200	0,500	5,64
	61.	1850	168,7	63,6	0,163	0,400	0,025	8,37
Kamienica mieszkalna w Nowej Rudzie	...	...	...	...	...	...	...	...
	85.	1850	129,1	43,2	0,195	0,400	0,010	3,31
	86.	1900	134,3	39,6	0,290	1,200	0,500	5,52
Pawilon perystylowy na Wzgórzu Partyzantów we Wrocławiu	...	...	...	...	...	...	...	...
	102.	1900	98,5	49,9	0,039	0,250	0,000	8,04
	103.	1870	141,0	52,0	0,053	0,400	0,000	8,91
	104.	1870	140,0	43,5	0,044	0,450	0,025	7,46
Kamienica mieszkalna we Wrocławiu	...	...	...	...	...	...	...	...
	...	...	...	...	...	...	...	...
	124.	1870	75,0	23,7	0,145	0,200	0,000	2,08
Zachodnie skrzydło klasztora pocysterskiego w Pelplinie	125.	1910	133,8	74,0	0,033	0,250	0,000	8,45
	...	...	...	...	...	...	...	...
	179.	1910	35,4	20,2	0,058	0,250	0,000	1,10
Krużganki klasztoru pocysterskiego w Pelplinie	180.	1300	140,50	71,80	0,037	1,600	0,010	15,64
	...	...	...	...	...	...	...	...
	199.	1300	133,10	71,00	0,017	0,250	0,000	25,79
północne skrzydło klasztora Opactwa Benedyktynek w Żarnowcu	200.	1400	125,20	46,20	0,053	0,700	0,250	2,83
	...	...	...	...	...	...	...	...
	218.	1400	109,80	45,40	0,024	0,400	0,000	9,16
Zachodnie skrzydło klasztora pocysterskiego w Pelplinie	219.	1280	129,00	75,30	0,013	0,200	0,000	22,61
	...	...	...	...	...	...	...	...
	282.	1280	81,30	57,60	0,046	0,300	0,010	5,45
Zachodnie skrzydło klasztora pocysterskiego w Pelplinie	283.	1860	127,30	40,50	0,045	0,400	0,010	7,79
	290.	1860	126,00	57,60	0,045	0,500	0,000	9,86

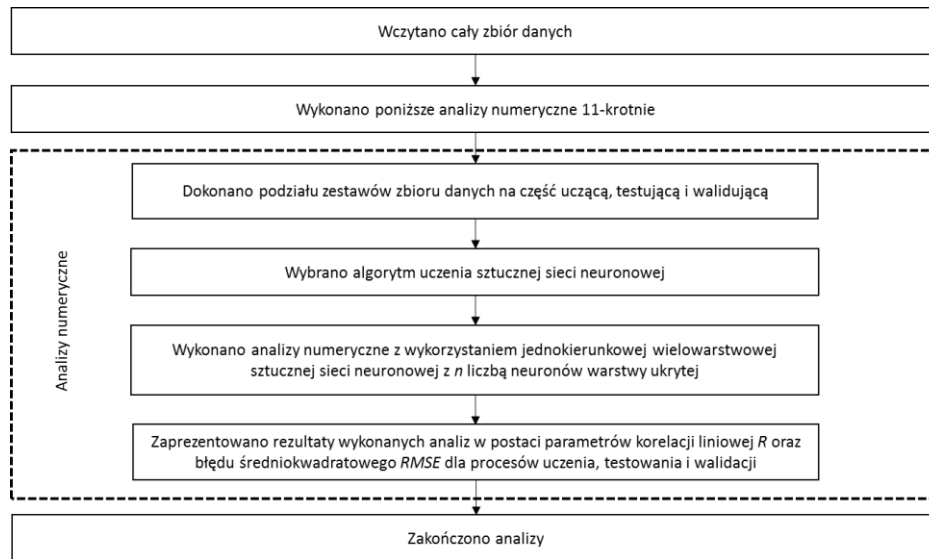


Analizy statystyczne i numeryczne przeprowadziłam we współpracy ze Sławomirem Czarneckim z mojego Wydziału. Wyniki obliczeń współczynnika korelacji *Pearsona* ( $r$ ) pomiędzy parametrami  $Y$  a  $U_m$  wykazały, że parametr ten ma istotne znaczenie w konstruowaniu warstwy wejściowej dla sztucznej sieci neuronowej. Związek między zmiennymi okazał się być ujemny, a zatem im badane mury były starsze, tym wilgotność masowa określona w laboratorium była większa. Jest to zgodne z moimi dotychczasowymi obserwacjami poczynionymi podczas badań prowadzonych w różnych budynkach, wskazującymi że wartość wilgotności masowej z reguły rosła wraz z wiekiem obiektu. W literaturze jest w tym przypadku mowa o potęgowaniu zawilgocenia muru ceglanego wilgocią pochłanianą z powietrza przez skryzalizowane w kapilarach sole. Ocena przydatności pozostałych parametrów ( $X_D$ ,  $X_M$ ,  $X_C$ ,  $X_S$  i  $X_A$ ) jako wejściowych dla SSN po raz kolejny potwierdziła wcześniejsze ustalenia.

W celu wybrania optymalnej struktury sieci, w analizach numerycznych wykorzystałam zdecydowanie więcej, niż dotąd, bo w sumie 11 wybranych na podstawie studiów literatury algorytmów uczenia jednokierunkowej wielowarstwowej sztucznej sieci neuronowej. Były to następujące algorytmy: *BFGS Quasi-Newton*, *Conjugate Gradient with Powell-Beale Restart*, *Fletcher-Powell Conjugate Gradient*, *Polak-Ribière Conjugate Gradient*, *Gradient Descent Backpropagation*, *Gradient Descent with Momentum Backpropagation*, *Variable Learning Rate Backpropagation*, *Levenberg-Marquardt*, *One Step Secant*, *Resilient Backpropagation* oraz *Scaled Conjugate Gradient*.

Co więcej, analizy numeryczne przeprowadziłam w dwóch wariantach. W wariacie I przedmiotem analiz był cały zbiór danych, obejmujący zestawy danych z wilgotnością masową  $U_m$  zawierającą się w szerokim przedziale – od 3% do 12% i więcej. W wariacie II przedmiotem analiz był natomiast zbiór zawężony, obejmujący wilgotności  $U_m$  od 8% w górę. Zbiór ten liczył 97 zestawów danych i również został opublikowany jako appendix do pracy [A9]. Szukałam w ten sposób możliwości dokładniejszej neuronowej oceny ilości wilgoci zawartej w murach mocno zawilgoconych lub mokrych, charakterystycznych dla części obiektów historycznych. Założyłam, że taki model mógłby być z powodzeniem stosowany na przykład do precyzyjniejszego szacowania wielkości nakładów finansowych koniecznych do poniesienia w przypadku działań ukierunkowanych na przyspieszone osuszenie ceglanych murów budynku historycznego, czy też do prognozowania czasu ich naturalnego wysychania. W obydwu wariantach analizy numeryczne, szczegółowo opisane w [A9], przeprowadzone zostały według schematu przedstawionego na rysunku 12.

Natomiast w tabelach 7 i 8, za [A9], przedstawiłam rezultaty analiz przeprowadzonych z użyciem 11 wymienionych powyżej algorytmów uczenia SSN w postaci wartości współczynników  $R$  oraz  $RMSE$  odpowiednio dla wariantu I, w którym wykorzystałam pełny zbiór danych obejmujący zestawy wyników z wilgotnością masową  $U_m$  zawierającą się w szerokim przedziale od 3% do 12% i więcej oraz dla wariantu II, w którym wykorzystałam zawężony zbiór danych obejmujący wilgotności  $U_m$  od 8% w górę.



**Rysunek 12.** Schemat wykonanych analiz numerycznych z wykorzystaniem sztucznych sieci neuronowych, wg [A9]

**Tabela 7.** Wartości współczynników korelacji liniowej  $R$  i błędu średniokwadratowego  $RMSE$  dla analizowanych algorytmów uczenia sztucznej sieci neuronowej, wariant I, za [A9]

Lp.	Algorytm uczenia sztucznej sieci neuronowej	Wartość współczynnika korelacji liniowej $R$ [-] w procesie			Wartość błędu średniokwadratowego $RMSE$ [%] w procesie		
		uczenia	testowania	walidacji	uczenia	testowania	walidacji
1.	<b><i>BFGS Quasi-Newton</i></b>	<b>0,929</b>	<b>0,878</b>	<b>0,938</b>	<b>2,181</b>	<b>3,012</b>	<b>2,216</b>
2.	<i>Conjugate Gradient with Powell-Beale Restart</i>	0,929	0,847	0,907	2,238	2,894	2,784
3.	<i>Fletcher-Powell Conjugate Gradient</i>	0,931	0,887	0,859	2,297	2,393	2,607
4.	<i>Polak-Ribière Conjugate Gradient</i>	0,906	0,948	0,883	2,586	1,934	2,730
5.	<i>Gradient Descent Backpropagation</i>	0,623	0,651	0,541	10,923	11,066	12,289
6.	<i>Gradient Descent with Momentum Backpropagation</i>	0,825	0,794	0,922	3,584	3,385	2,196
7.	<i>Variable Learning Rate Backpropagation</i>	0,887	0,937	0,919	2,691	2,226	2,593
8.	<i>Levenberg-Marquardt</i>	0,958	0,886	0,864	1,641	3,286	3,713
9.	<i>One Step Secant</i>	0,932	0,882	0,864	2,178	3,283	2,765
10.	<i>Resilient Backpropagation</i>	0,928	0,900	0,846	2,177	3,033	3,609
11.	<i>Scaled Conjugate Gradient</i>	0,924	0,886	0,880	2,377	2,773	2,507

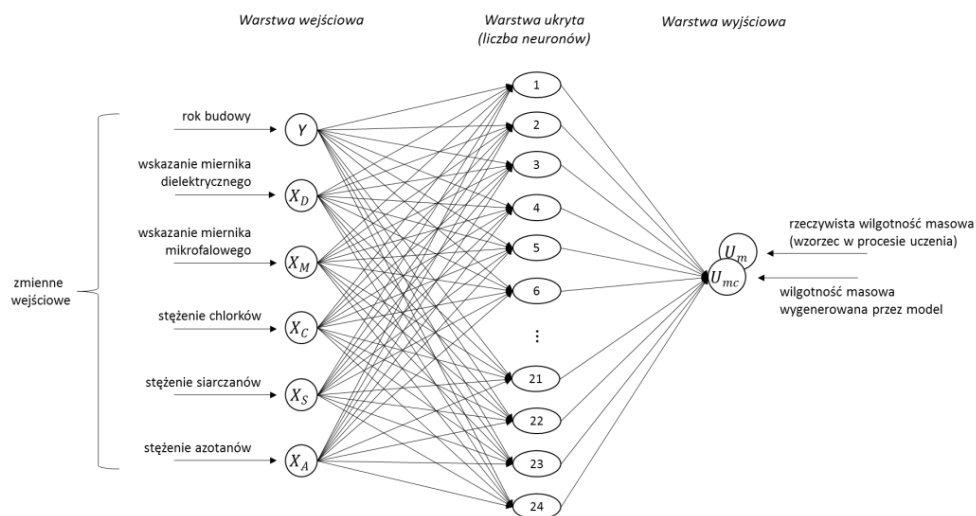
**Tabela 8.** Wartości współczynnika korelacji liniowej  $R$  i błędu średniokwadratowego  $RMSE$  dla analizowanych algorytmów uczenia sztucznej sieci neuronowej, wariant II, za [A9]

Lp.	Algorytm uczenia sztucznej sieci neuronowej	Wartość współczynnika korelacji liniowej $R$ [-] w procesie			Wartość błędu średniokwadratowego $RMSE$ [%] w procesie		
		uczenia	testowania	walidacji	uczenia	testowania	walidacji
1.	<i>BFGS Quasi-Newton</i>	0,894	0,951	0,945	1,934	1,546	1,709



2.	<i>Conjugate Gradient with Powell-Beale Restart</i>	0,919	0,803	0,770	1,786	7,087	3,207
3.	<i>Fletcher-Powell Conjugate Gradient</i>	0,872	0,876	0,832	2,343	2,347	2,430
4.	<i>Polak-Ribière Conjugate Gradient</i>	0,916	0,957	0,708	1,823	1,855	3,445
5.	<i>Gradient Descent Backpropagation</i>	0,624	0,340	0,820	4,464	5,378	3,140
6.	<i>Gradient Descent with Momentum Backpropagation</i>	0,656	0,432	0,578	7,545	10,758	7,628
7.	<i>Variable Learning Rate Backpropagation</i>	0,875	0,666	0,862	2,332	2,995	2,385
<b>8.</b>	<b><i>Levenberg-Marquardt</i></b>	<b>0,946</b>	<b>0,958</b>	<b>0,937</b>	<b>1,592</b>	<b>1,503</b>	<b>1,587</b>
9.	<i>One Step Secant</i>	0,831	0,872	0,900	2,686	2,166	1,961
10.	<i>Resilient Backpropagation</i>	0,903	0,844	0,718	2,032	2,514	4,134
11.	<i>Scaled Conjugate Gradient</i>	0,899	0,792	0,845	2,055	3,974	3,196

Wyboru najbardziej predysponowanej struktury sztucznej sieci neuronowej do oceny wilgotności in situ murów ceglanych dokonałam metodą rankingową. Dla danych uwzględnionych w wariancie I jest to SSN jednokierunkowa wielowarstwowa ze wsteczną propagacją błędów, algorytmem *BFGS Quasi-Newton*, liczbą parametrów wejściowych 6 i liczbą neuronów warstwy ukrytej 24. Strukturę tej sieci pokazano na rysunku 13.



**Rysunek 13.** Struktura sztucznej sieci neuronowej wybranej do oceny wilgotności masowej w wariancie I, wg [A9]

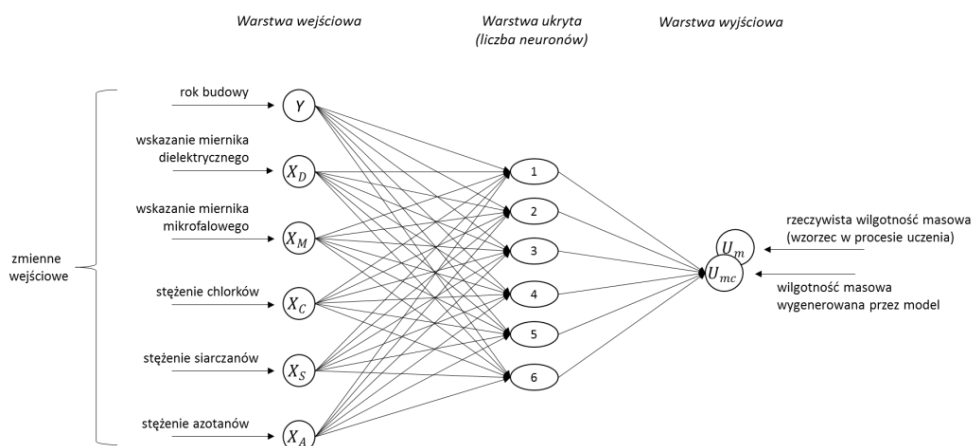
Z porównania, również metodą rankingową, wartości  $R$  i  $RMSE$  uzyskanych dla skonstruowanego przy użyciu tej sieci modelu z wartościami  $R$  i  $RMSE$  uzyskanymi dla modelu opisanego w pracach [A3] i [A4] wynika, że dokładność odwzorowania rzeczywistego poziomu wilgotności przez sztuczną sieć neuronową jest większa w przypadku nowo opracowanego modelu.

Natomiast w wariancie II, gdzie przedmiotem analiz numerycznych był zawężony zbiór danych, obejmujący zestawy wyników z wilgotnością masową od 8% w górę, wykazano, że najbardziej predysponowana do neuronowej nieniszczącej oceny in situ wilgotności murów





ceglanych jest sztuczna sieć neuronowa jednokierunkowa wielowarstwowa ze wsteczną propagacją błędów, o liczbie parametrów wejściowych 6, algorytmem *Levenberg-Marquardt*, liczbą neuronów warstwy ukrytej 6. Strukturę tej sieci pokazano na rysunku 14. Uwagę zwracają uzyskane bardzo wysokie wartości współczynnika korelacji liniowej  $R$ , wynoszące 0,946 w procesie uczenia, 0,958 w procesie testowania i 0,937 w procesie walidacji i najniższe jak dotąd wartości błędów średniokwadratowych  $RMSE$  wynoszące dla tych procesów odpowiednio 1,592%, 1,503% i 1,587%. Z porównania rezultatów analiz numerycznych uzyskanych w obydwu wariantach nasuwa się wniosek, że w przypadku budynków historycznych posiadających mury ceglane mocno zawilgocone i mokre, korzystniejsze jest wykorzystanie modelu opracowanego w wariantcie II.



**Rysunek 14.** Struktura sztucznej sieci neuronowej wybranej do oceny wilgotności masowej w wariantcie II, wg [A9]

Moim znaczącym wkładem w rozwój uprawianej przeze mnie dyscypliny jest utworzenie na podstawie badań murów ceglanych w dwunastu budynkach pochodzących z różnych okresów historycznych reprezentatywnego zbioru danych zawierającego 290 zestawów wyników, z których każdy obejmuje 6 parametrów uzyskanych metodami badawczymi nienaruszającymi ( $X_D$ ,  $X_M$  i  $Y$ ) lub w minimalnym stopniu ingerującymi w zabytkową tkankę ( $X_C$ ,  $X_S$  i  $X_A$ ), na użytek identyfikacji in situ poziomu wilgotności zabytkowych murów ceglanych z wykorzystaniem uczenia maszynowego i ponadto udostępnienie go innym badaczom poprzez jego opublikowanie.

Moim znaczącym wkładem jest także zbudowanie dwóch modeli neuronowej wiarygodnej identyfikacji in situ poziomu wilgotności zabytkowych murów ceglanych na podstawie 6 zadanych parametrów  $X_D$ ,  $X_M$ ,  $Y$ ,  $X_C$ ,  $X_S$  i  $X_A$ , uzyskanych na drodze badawczej metodami nieniszczącymi i minimalnie ingerującymi w strukturę muru, w tym jednego modelu dedykowanego dla murów mocno zawilgoconych i mokrych. Wkładami częściowymi tego dokonania są:

- wykazanie na podstawie analiz, że spośród wybranych na podstawie przeglądu literatury i przeanalizowanych 11 algorytmów uczenia SSN najbardziej przydatne do tego celu są algorytmy *BFGS Quasi-Newton* i *Levenberg-Marquardt*,



- wykazanie, że dla zbioru danych obejmujących zestawy wyników z wilgotnością masową  $U_m$  zawierającą się w szerokim przedziale od 3% do 12% i więcej do identyfikacji in situ poziomu wilgotności zabytkowych murów ceglanych predysponowana jest SSN jednokierunkowa wielowarstwowa ze wsteczną propagacją błędu, algorytmem *BFGS Quasi-Newton* i strukturze 6–24–1,
- wykazanie, że dla zbioru danych obejmujących zestawy wyników z wilgotnością masową  $U_m$  od 8% w górę do identyfikacji in situ poziomu wilgotności zabytkowych murów ceglanych predysponowana jest SSN jednokierunkowa wielowarstwowa ze wsteczną propagacją błędu, algorytmem *Levenberg-Marquardt* i strukturze 6–6–1.

Po przeanalizowaniu rezultatów analiz numerycznych wykonanych dla zbioru danych zawierającego zestawy wyników z wilgotnością masową  $U_m$  mieszczącą się w szerokim przedziale wartości, opisanym w artykułach [A3] i [A9], widać wyraźnie, że zwiększenie liczebności i reprezentatywności tego zbioru, wprowadzenie nowego parametru wejściowego  $Y$ , a także zastosowanie różnych algorytmów uczenia przełożyło się na poprawę dokładności odwzorowania rzeczywistego poziomu wilgotności przez sztuczną sieć neuronową. Dokładność ta jest jednak niższa, niż uzyskana dla zbioru danych pozyskanych w warunkach laboratoryjnych, co opisano w artykule [A2]. Z tego powodu, w poszukiwaniu modelu pozwalającego na uzyskanie dokładniejszych rezultatów postanowiłam wykorzystać inne, niż sztuczne sieci neuronowe, algorytmy uczenia maszynowego, a mianowicie algorytm lasów losowych i metodę wektorów nośnych. Z dokonanego przeglądu literaturowego wynika, że algorytmy te zyskują na popularności i są coraz chętniej stosowane do rozwiązywania różnych problemów związanych z miernictwem, nie były jednak dotąd stosowane do oceny wilgotności murów ceglanych. Rezultaty analiz przeprowadzonych z zastosowaniem ww. algorytmów są przedmiotem artykułu [A11], opublikowanego w 2023 roku w *Automation in Construction* i już posiadającego 2 cytowania w bazie *Web of Science* i po 3 cytowania w bazach *Scopus* i *Google Scholar*.

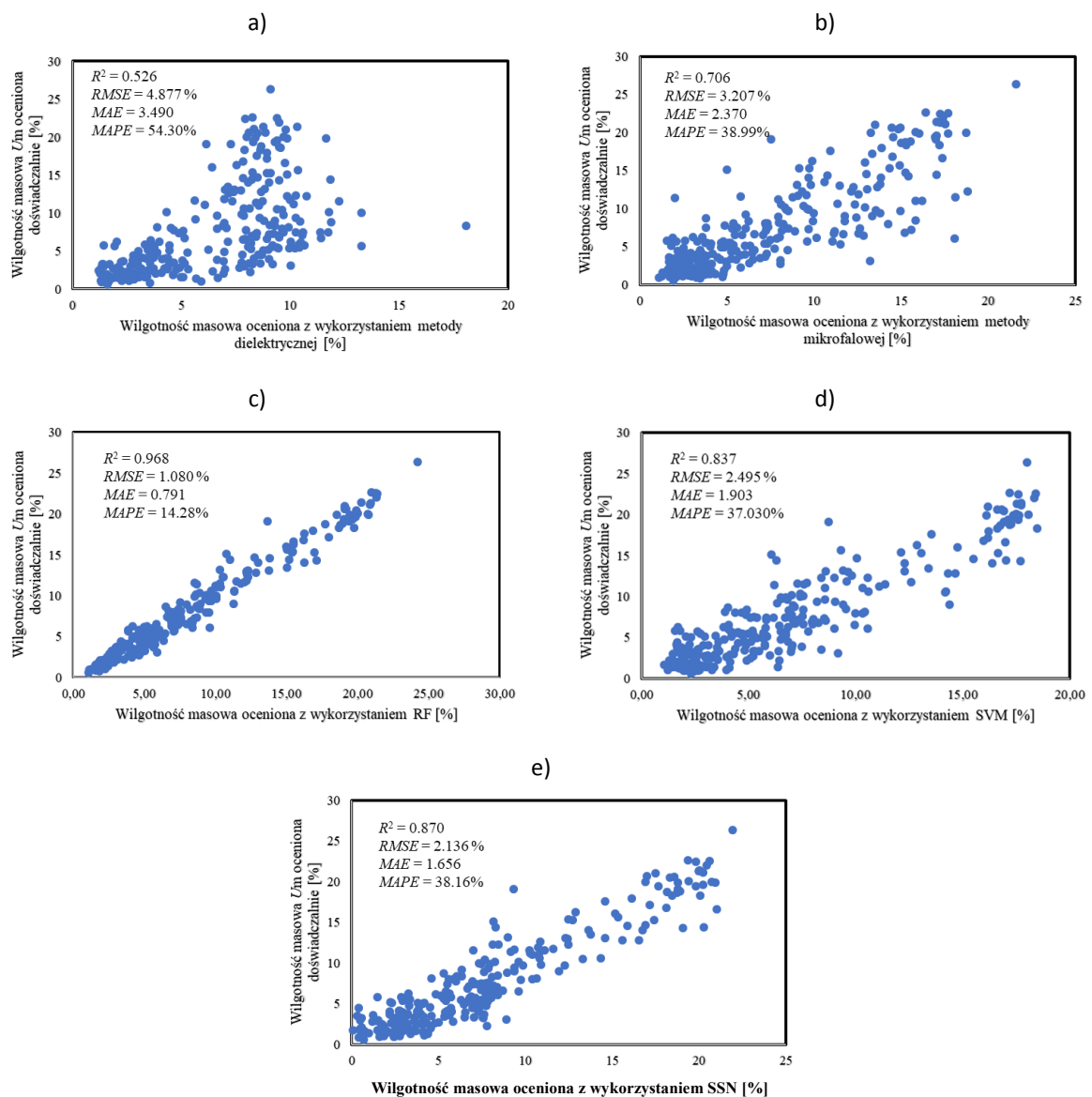
Do analiz numerycznych, które przeprowadziłam we współpracy ze Sławomirem Czarneckim, wykorzystałam zbiór danych liczący 290 zestawów wyników, ten sam, którego użyłam do analiz opartych na sztucznych sieciach neuronowych (patrz artykuł [A9]). Tak, jak we wcześniejszych badaniach, jako zmienne wejściowe w procesach uczenia, walidacji i weryfikacji algorytmów sztucznej sieci neuronowej posłużyły parametry  $X_D$ ,  $X_M$ ,  $X_C$ ,  $X_S$ ,  $X_A$  i  $Y$ , za wzorzec w procesach uczenia posłużył parametr  $U_m$ , natomiast ocenianą zmienną wyjściową był parametr  $U_{mc}$  opisujący wartość wilgotności masowej wygenerowaną przez model.

Proces uczenia i testowania algorytmów został przeprowadzony na podstawie 10-krotnego sprawdzianu krzyżowego, który polega na 10-krotnym wykonaniu analiz numerycznych, w których 9 zestawów danych jest wykorzystywanych w procesie uczenia, a 1 zestaw w procesie testowania (w dotychczasowych analizach z użyciem SSN zbiór danych był dzielony na dane uczące, walidujące i testujące w stosunku 70% – 15% – 15%). W procesach uczenia i testowania metody wektorów nośnych modyfikowano funkcję jądra, a w przypadku algorytmu losowego lasu – wartość minimalnej liczby zestawów danych, którą dzielono w węzle, co szczegółowo opisano w

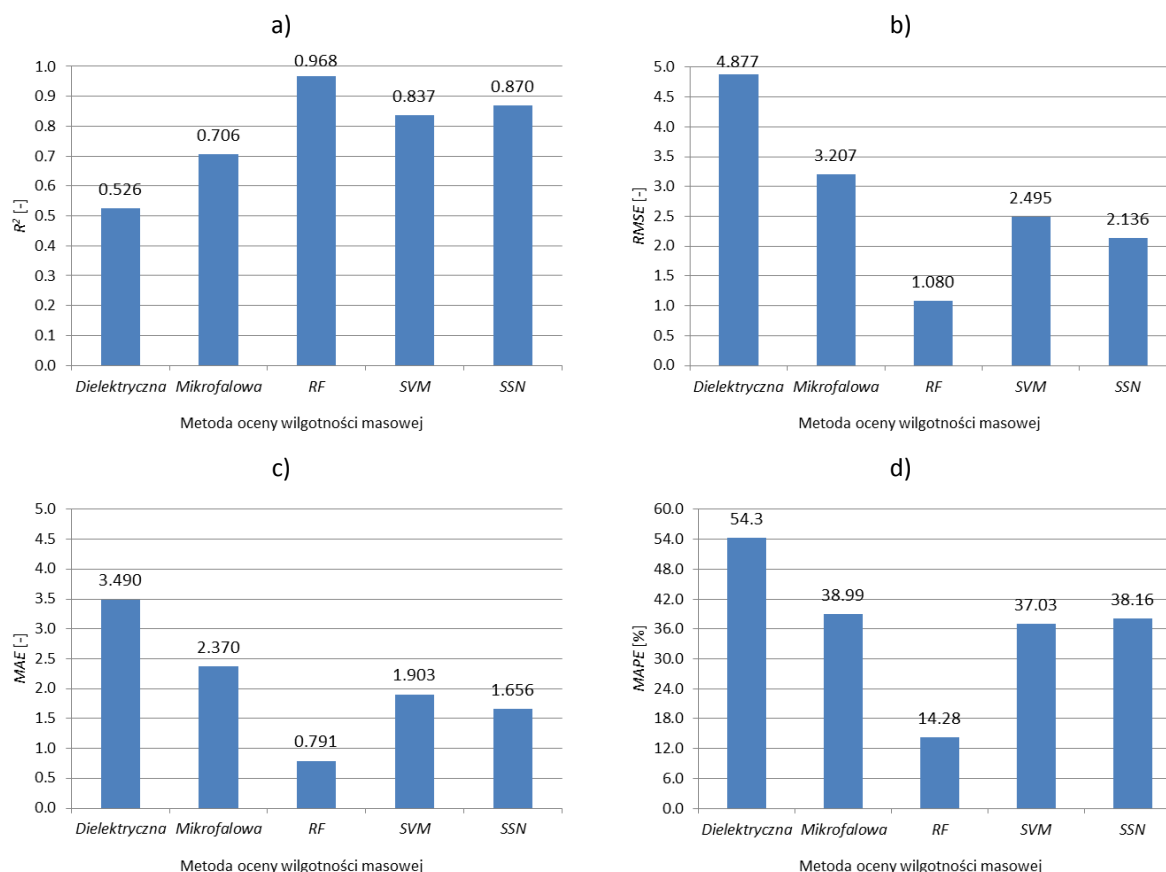




[A11]. Dopasowanie modelu do danych uczących oceniono za pomocą współczynnika determinacji  $R^2$ , natomiast trafność odwzorowania za pomocą pierwiastka błędu średniokwadratowego  $RMSE$ , a także nie stosowanych dotąd miar: błędu absolutnego  $MAE$  oraz bezwzględnego błędu procentowego  $MAPE$ . Dodatkowo, wyniki uzyskane dla algorytmu losowego lasu i metody wektorów nośnych porównano z wynikami uzyskanymi wcześniej za pomocą sztucznej sieci neuronowej jednokierunkowej, wielowarstwowej, ze wsteczną propagacją błędów i algorytmem uczenia  $BFGS$  *Quasi-Newton* (artykuł [A9]), a także wynikami uzyskanymi nieniszczącymi metodami dielektryczną i mikrofalową, na podstawie zależności  $X-U_m$  (Rys. 15 i 16).



**Rysunek 15.** Zależności pomiędzy wartościami rzeczywistej wilgotności masowej  $U_m$  ocenionej doświadczalnie metodą grawimetryczną a wartościami wilgotności masowej ocenionej z wykorzystaniem metody dielektrycznej (a), metody mikrofalowej (b), algorytmu losowego lasu (c), metody wektorów nośnych (d) oraz sztucznej sieci neuronowej (e), za [A11]



\* idealne  $R^2 = 1$ ; idealne  $RMSE, MAE, MAPE = 0$

**Rysunek 16.** Porównawcze zestawienie wartości parametrów oceniających dopasowanie modelu do danych uczących i trafność odwzorowania dla wszystkich analizowanych metod: dielektrycznej, mikrofalowej, algorytmu losowego lasu (RF), metody wektorów nośnych (SVM) oraz sztucznej sieci neuronowej (SSN): a) współczynnika determinacji  $R^2$ ; b) pierwiastka błędu średniokwadratowego  $RMSE$ ; c) błędu absolutnego  $MAE$  i d) bezwzględnego błędu procentowego  $MAPE$ , wg [A11]

Uzyskane wyniki jednoznacznie wskazują, że algorytm losowego lasu (z liczbą drzew decyzyjnych równą 500, liczbą atrybutów branych pod uwagę przy każdym podziale równej 6 i najmniejszemu podzbiorowi, który można podzielić równemu 3) najbardziej poprawnie odwzorował wilgotności masowe  $U_m$  uzyskane podczas badań doświadczalnych. Świadczą o tym najwyższa wartość współczynnika determinacji  $R^2$  wynosząca 0,968 oraz najniższe wartości błędów  $RMSE$ ,  $MAE$  i  $MAPE$  wynoszące odpowiednio 1,080%, 0,791 i 14,28%. Wartości tych parametrów są dużo korzystniejsze, niż uzyskane w pracy [A9] dla sztucznej sieci neuronowej jednokierunkowej wielowarstwowej ze wsteczną propagacją błędów i algorytmem uczenia *BFGS Quasi-Newton*.

W kolejnym kroku przeprowadziłam niezależną weryfikację doświadczalną modelu opartego na algorytmie lasów losowych (RF) na bazie nowych, niewykorzystanych dotąd danych, żeby sprawdzić jaka będzie w takiej sytuacji dokładność odwzorowania rzeczywistego poziomu wilgotności. Wyniki tej weryfikacji opublikowałam w 2023 roku w czasopiśmie *Applied Sciences*, w

artykule **[A13]** posiadającym już po 1 cytowaniu w bazach *Web of Science*, *Scopus* i *Google Scholar*.

Na potrzebę pozyskania danych do weryfikacji przeprowadziłam badania doświadczalne i archiwalne nadmiernie zawilgoconych i zasolonych murów ceglanych w dwóch budynkach. Były to:

- ściany piwnic i nadziemia Złotej Bramy w Gdańsku, początek XVII w. (Rys. 17 a i b).
- ściany zewnętrzne i wewnętrzne piwnic kamienicy mieszkalno-handlowej w Katowicach, l. 70 XIX w. (Rys. 17 c i d).



**Rysunek 17.** Złota Brama w Gdańsku: widok ogólny (a) i fragment sklepienia kolebkowego w jednym z pomieszczeń piwnicznych (b), za **[A14]** oraz kamienica w Katowicach: widok budynku (c) i przykładowy widok piwnic (d), za **[A13]**

Rezultaty opisanych w **[A13]** analiz numerycznych, przeprowadzonych na dwóch niezależnych zestawach danych (18 zestawach dla Złotej Bramy i 17 zestawach dla kamienicy), wskazały na poprawną, ale nieco gorszą, niż wcześniej, identyfikację danych walidacyjnych. Świadczą o tym uzyskane satysfakcjonujące wartości współczynnika korelacji liniowej  $R$  równe 0,801 dla Złotej Bramy w Gdańsku i 0,803 dla kamienicy w Katowicach (wcześniej 0,984), niskie mediany błędu bezwzględnego  $|AE|$  wynoszące odpowiednio 1,79% i 1.46% oraz niezbyt wysokie jak na badania in situ mediany błędu względnego  $|RE|$  wynoszące odpowiednio 16.70% i 13.75% (patrz przykładowo Tabela 9). Co więcej, średnie wartości wilgotności  $U_{mc}$  identyfikowane przez RF są bliskie średnim wartościom wilgotności  $U_m$  uzyskanym na drodze badawczej za pomocą metody grawimetrycznej. W przypadku Złotej Bramy wartości te wynoszą odpowiednio 13.82% i 14.65%, natomiast w przypadku kamienicy 9.80% i 9.83%.

**Tabela 9.** Porównawcze rezultaty weryfikacji doświadczalnej przeprowadzonej na zestawach danych pozyskanych w budynku Złotej Bramy w Gdańsku, potwierdzające poprawną identyfikację danych walidacyjnych przez RF, za **[A13]**

Nr zestawu danych [-]	Rzeczywista wilgotność masowa $U_m$ [%]	Wilgotność masowa określona z wykorzystaniem RF $U_{mc}$ [%]	Błąd bezwzględny $ \Delta U_m $ [%]	Błąd względny $ RE $ [%]
1.	7,88	9,03	1,15	14,59
2.	8,88	10,52	1,64	18,47
3.	9,35	13,38	4,03	43,10



4.	10,19	12,13	1,94	19,04
5.	10,89	12,37	1,48	13,59
6.	11,34	13,38	2,04	17,99
7.	11,60	9,50	2,10	18,10
8.	12,87	13,38	0,51	3,96
9.	13,26	14,01	0,75	5,66
10.	15,60	15,68	0,08	0,51
11.	16,73	15,74	0,99	5,92
12.	16,98	13,75	3,23	19,02
13.	17,70	12,32	5,38	30,40
14.	18,29	17,35	0,94	5,14
15.	18,36	15,53	2,83	15,41
16.	20,28	18,75	1,53	7,54
17.	21,59	15,74	5,85	27,10
18.	21,92	16,28	5,64	25,73
<b>Wartość średni <math>\bar{x}_i</math></b>	<b>14,65</b>	<b>13,82</b>	<b>2,15</b>	<b>16,18</b>
<b>Mediana <math>Me</math></b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>1,79</b>	<b>16,70</b>

Porównując rezultaty analiz numerycznych uzyskane dla algorytmu lasów losowych w procesach uczenia i testowania, opisane w artykule [A11], z rezultatami uzyskanymi podczas weryfikacji modelu, opisanymi w artykule [A13], można zauważyć, że dokładność odwzorowania rzeczywistego poziomu wilgotności była mniejsza dla danych weryfikacyjnych. Jednak jak to wykazałam w artykule [A11], opracowany przeze mnie sposób oceny wilgotności daje zdecydowanie lepsze wyniki, niż te, które są możliwe do uzyskania w oparciu o zależności korelacyjne wykorzystywane w obowiązującym paradygmacie prowadzenia badań murów ceglanych w budynkach zabytkowych. Uzyskane dotychczas wyniki uznałam zatem za zadowalające, a opracowany sposób oceny wilgotności za warty rozpropagowania w praktyce budowlanej.

**Moim znacznym wkładem w rozwój uprawianej przeze mnie dyscypliny jest zbudowanie dwóch kolejnych modeli identyfikacji in situ poziomu wilgotności zabytkowych murów ceglanych na podstawie 6 zadanych parametrów  $X_D$ ,  $X_M$ ,  $Y$ ,  $X_C$ ,  $X_S$  i  $X_A$ , uzyskanych na drodze badawczej metodami nieniszczącymi i minimalnie ingerującymi w strukturę muru, dedykowanych dla zbioru danych obejmujących zestawy wyników z wilgotnością masową  $U_m$  zawierającą się w szerokim przedziale od 3% do 12% i więcej, w tym jednego modelu opartego na algorytmie lasów losowych i jednego opartego na metodzie wektorów nośnych.**

**Znacznym wkładem w dyscyplinę jest również wykazanie, że spośród wszystkich modeli opracowanych dla ww. zbioru danych do identyfikacji in situ poziomu wilgotności zabytkowych murów ceglanych najbardziej predysponowany jest ten, do którego budowy użyto algorytmu lasów losowych, oraz przeprowadzenie jego niezależnej weryfikacji.**

Podsumowując rezultaty osiągnięte na poszczególnych etapach prac badawczych, szczegółowo opisane w artykułach [A2], [A3], [A9] i [A11], w Tabeli 10 zamieściłam porównawcze zestawienie wartości parametrów  $R$ ,  $RMSE$  i  $a20$ -index oceniających jakość dopasowania kolejnych zbudowanych modeli do danych uczących oraz trafność odwzorowania tych danych.



**Tabela 10.** Zestawienie wartości parametrów  $R$ ,  $RMSE$  i  $a20-index$  oceniających jakość dopasowania kolejnych modeli do danych uczących oraz trafność ich odwzorowania

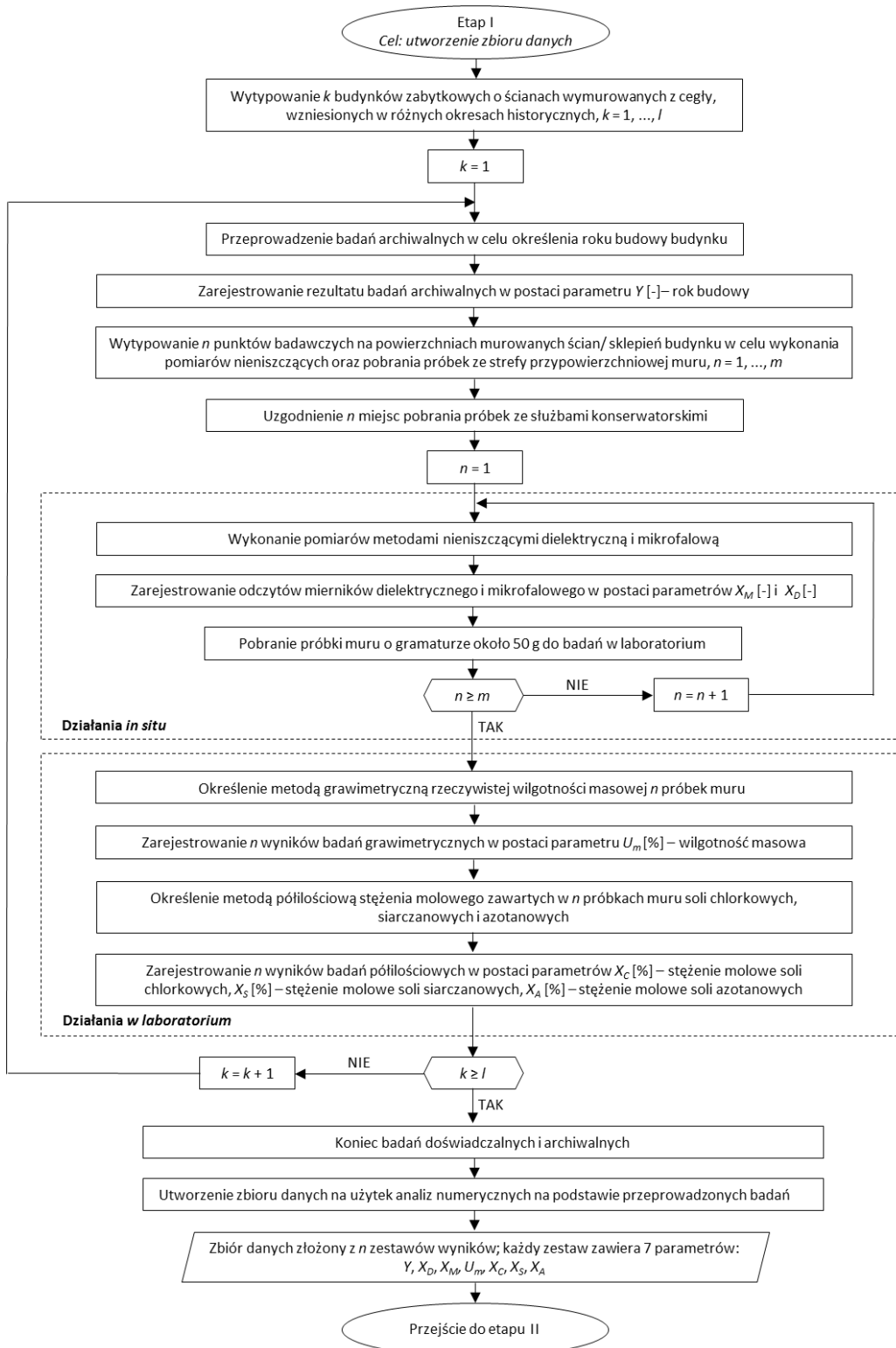
<b>Szeroki zbiór danych obejmujący zestawy wyników z wartościami wilgotności masowej <math>U_m</math> zawierającymi się w przedziale od 3% do 12% i więcej</b>			
Charakterystyka danych i zastosowanego modelu uczenia maszynowego	Wartość uśredniona dla procesów uczenia, testowania i weryfikacji		
	$R [-]^*$	$RMSE [%]^*$	$a20-index^*$
Dane pozyskane w warunkach laboratoryjnych, 5 parametrów wejściowych, ~1100 zestawów wyników, sztuczna sieć neuronowa (SSN) [A2]	0,986	0,22	-
Dane pozyskane in situ, 5 parametrów wejściowych, 205 zestawów wyników, sztuczna sieć neuronowa (SSN) [A3]	0,918	2,35	-
Dane pozyskane in situ, 6 parametrów wejściowych, 290 zestawów wyników, sztuczna sieć neuronowa (SSN) [A9]	0,923	2,47	0,43
Dane pozyskane in situ, 6 parametrów wejściowych, 290 zestawów wyników, algorytm lasów losowych (RF) [A11]	<b>0,984</b>	<b>1,08</b>	<b>0,77</b>
<b>Zawężony zbiór danych obejmujący zestawy wyników z wartościami wilgotności masowej <math>U_m</math> od 8% w górę</b>			
Charakterystyka zbioru danych i zastosowanego modelu uczenia maszynowego	Wartość uśredniona dla procesów uczenia, testowania i weryfikacji		
	$R [-]^*$	$RMSE [%]^*$	$a20-index^*$
Dane pozyskane in situ, 6 parametrów wejściowych, 290 zestawów wyników, sztuczna sieć neuronowa (SSN) [A9]	<b>0,946</b>	<b>1,57</b>	<b>0,75</b>

\*idealne  $R$  i  $a20-index = 1$ , idealny  $RMSE = 0$

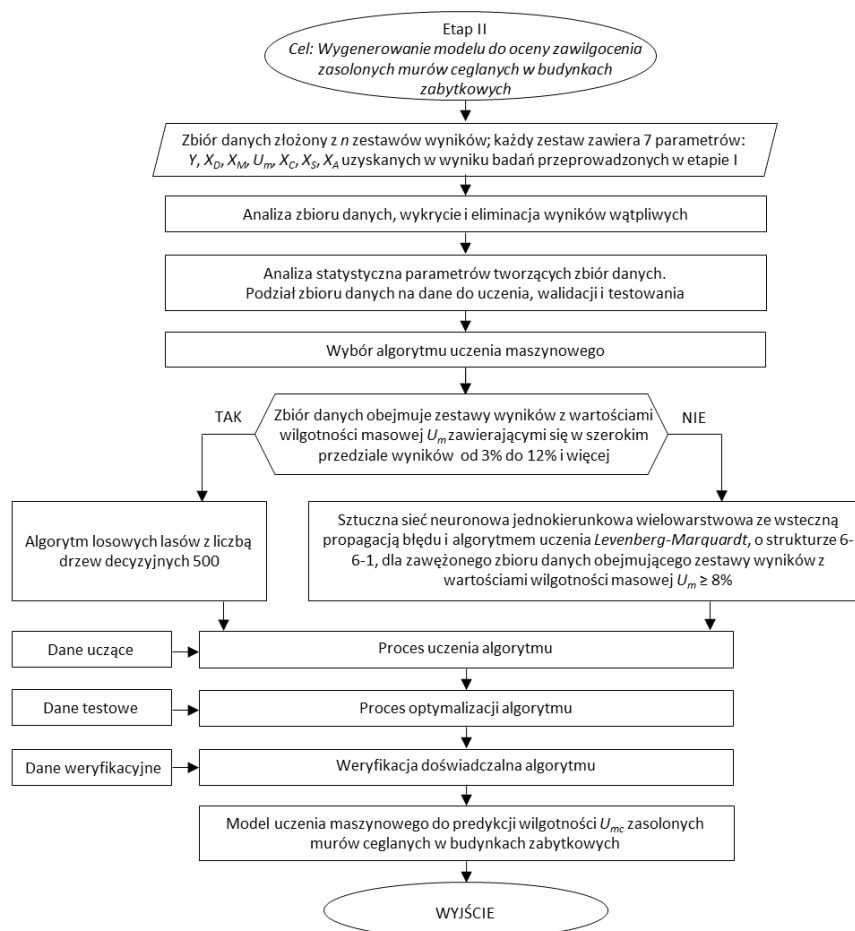
Zaprezentowane powyżej wyniki badań, opublikowane w artykułach [A2–A4], [A9], [A11] i [A13], stały się podstawą do opracowania przeze mnie metodyki ilościowej oceny wilgotności zasolonych murów ceglanych w budynkach zabytkowych z wykorzystaniem uczenia maszynowego. Została ona szczegółowo opisana w pracy [A14], opublikowanej w *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, jako podsumowanie moich dotychczasowych badań w tym zakresie. Celem artykułu jest nie tylko wniesienie nowej wiedzy do uprawianej przeze mnie dyscypliny, ale również spopularyzowanie metody oraz wyjaśnienie innym badaczom zajmującym się m.in. renowacją obiektów zabytkowych, jakie kroki należy podjąć w celu zbudowania własnego zbioru danych i opracowania na jego podstawie modelu do własnych badań. Metodyka składa się z dwóch etapów. Etap pierwszy, szczegółowo opisany w [A14] i pokazany w postaci schematu na rysunku 18, uwzględnia przeprowadzenie w wytypowanych obiektach zabytkowych badań doświadczalnych metodami nieniszczącymi i minimalnie ingerującymi w strukturę muru oraz archiwalnych w celu utworzenia zbioru danych. Etap drugi, również szczegółowo opisany w [A14] i przedstawiony schematycznie na rysunku 19, obejmuje zbudowanie modelu uczenia



maszynowego w oparciu o wcześniej zbudowany zbiór i wybrane na podstawie własnych badań i analiz algorytmy.



**Rysunek 18.** Schemat obrazujący I etap metodyki ilościowej oceny wilgotności zasolonych murów ceglanych w budynkach zabytkowych z wykorzystaniem uczenia maszynowego, za [A14]



**Rysunek 19.** Schemat obrazujący II etap metodyki ilościowej oceny wilgotności zasolonych murów ceglanych w budynkach zabytkowych z wykorzystaniem uczenia maszynowego, za [A14]

W opracowanej metodyce, opierając się na wynikach moich dotychczasowych badań, do budowy modeli zarekomendowałam dwa algorytmy uczenia maszynowego: algorytm lasów losowych dla szerokiego zbioru danych, obejmującego zestawy wyników z wartościami wilgotności masowej zawierającymi się w przedziale od 3% do 12% i więcej, oraz sztuczną sieć neuronową jednokierunkową wielowarstwową ze wsteczną propagacją błędów, algorytmem uczenia *Levenberg-Marquardt*, o strukturze 6–6–1 dla zawężonego zbioru danych, obejmującego zestawy wyników z wartościami wilgotności masowej od 8% w górę. Przydatność tych algorytmów potwierdzają wysokie wartości wskaźnika *a20-index*, zaproponowanego ostatnio do oceny niezawodności technik obliczeniowych opartych na sztucznej inteligencji, a nie stosowanego przeze mnie w dotychczasowych analizach. Wyniosły one odpowiednio 0,77 i 0,75 (idealny *a20-index* = 1), co informuje o tym, że 77% i 75% wygenerowanych przez sztuczną inteligencję wartości  $U_{mc}$  odpowiada z odchyleniem  $\pm 20\%$  wartościom referencyjnym  $U_m$  uzyskanym na drodze doświadczalnej.

W artykule [A14] zamieściłam również przykład zastosowania opisanej metodyki do oceny wilgotności murów ceglanych w budynku Złotej Bramy w Gdańsku, pokazujący jej wiarygodność i przydatność praktyczną. **Moim znacznym wkładem w rozwój dyscypliny inżynieria lądowa, geodezja i transport jest opracowanie skutecznej metodyki ilościowej oceny**





**wilgotności zasolonych murów ceglanych w budynkach zabytkowych z wykorzystaniem uczenia maszynowego, w tym wskazanie przydatnych do tego celu metod badawczych nieniszczących i minimalnie ingerujących w strukturę muru oraz parametrów i algorytmów.**

Opracowana przeze mnie metoda ilościowej oceny wilgotności zasolonych murów ceglanych w budynkach zabytkowych z wykorzystaniem uczenia maszynowego pozwala na wiarygodną nieniszczącą identyfikację wilgotności w strefie przypowierzchniowej. Jednak, jak to zasygnalizowałam we wprowadzeniu, istotną kwestią jest również identyfikacja poziomu i przestrzennego rozkładu wilgotności wewnątrz zabytkowych murów. Identyfikacja taka bez konieczności pobierania próbek muru do badań nie była możliwa z powodu braku odpowiedniej do tego celu aparatury pomiarowej.

Interesując się możliwościami rozwiązania tego problemu, nawiązałam współpracę z Tomaszem Rymarczykiem z Wyższej Szkoły Ekonomii i Innowacji w Lublinie i Grzegorzem Kłosowskim z Wydziału Zarządzania Politechniki Lubelskiej i równolegle z prowadzeniem własnych badań, opisanych powyżej, w latach 2016–2018 weszłam jako wykonawczynie w skład interdyscyplinarnego zespołu badawczego, złożonego z naukowców reprezentujących kilka jednostek naukowych (wyszczególnionych w pkt. 4.2 Autoreferatu), realizującego projekt badawczy pt. „Tomograf hybrydowy do badania zawilgocenia i stanu budynków”. Projekt ten, współfinansowany ze środków pozyskanych z Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego w ramach Programu Operacyjnego Inteligentny Rozwój, realizowany był w Centrum Badawczo-Rozwojowym NETRIX S.A. w Lublinie.

Efektom zrealizowanego projektu jest system pomiarowy stanowiący **osiągnięcie II technologiczne**, współautorskie, składający się z urządzenia pomiarowego w postaci prototypowego przenośnego hybrydowego tomografu elektrycznego oraz oprogramowania opartego o metody algorytmiczne i służący do przestrzennego obrazowania wilgotności w murach, w tym tych zabytkowych. To technologiczne osiągnięcie opisałam w punkcie 4.2 Autoreferatu.

Po zakończeniu projektu badawczego, to jest od roku 2019 do chwili obecnej, moja współpraca z Tomaszem Rymarczykiem, Grzegorzem Kłosowskim i ośrodkami naukowymi wyszczególnionymi w punkcie 4.2 Autoreferatu jest kontynuowana i dotyczy badań naukowych związanych z dalszym testowaniem tomografu w warunkach in situ na kolejnych budynkach zabytkowych. Badania te mają na celu wypracowanie optymalnych, opartych na metodach algorytmicznych, rozwiązań do przestrzennego obrazowania wilgotności wewnątrz muru, a także stworzenie ostatecznej wersji aparatury pomiarowej w postaci kompaktowego urządzenia przenośnego. Weryfikacja tych rozwiązań odbywa się zarówno w oparciu o dane rzeczywiste uzyskane metodami badawczymi nieniszczącymi i niszczącą, za pomocą wizualnej analizy porównawczej, jak i o dane wygenerowane symulacyjne, a jej dotychczasowe rezultaty zostały opublikowane w sumie w sześciu artykułach, z których pięć, oznaczonych jako **[A6]**, **[A7]**, **[A8]**, **[A10]** i **[A12]**, włączyłam do cyklu powiązanych tematycznie artykułów naukowych stanowiącego **I osiągnięcie**.

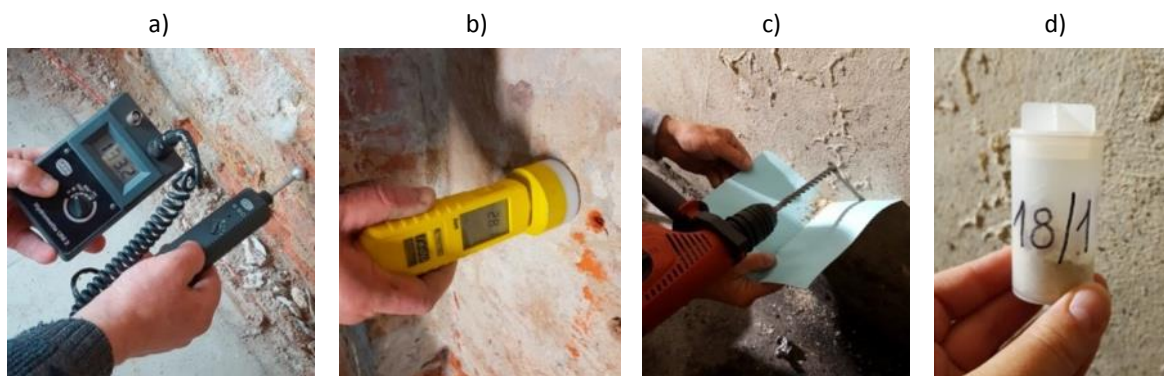




Na potrzeby opisanej szczegółowo w wyżej wymienionych artykułach weryfikacji przydatności algorytmicznych metod tworzenia przestrzennego obrazu zawilgocenia murów w oparciu o dane rzeczywiste, zbudowałam pięć zbiorów danych. Zbiory te zawierały rezultaty badań wilgotności murów ceglanych w pięciu różnych budynkach zabytkowych, a mianowicie:

- w zachodnim skrzydle klasztoru pocysterskiego w Pelplinie (ściany zewnętrzne przyziemia), początek XIV w.,
- w krużgankach klasztoru pocysterskiego w Pelplinie (ścian zewnętrzne przyziemia), początek XV w.,
- w Złotej Bramie w Gdańsku (ściany piwnic i nadziemia), początek XVII w.,
- w budynku fundacji Heimannów we Wrocławiu (ściany zewnętrzne piwnic), l. 50. XIX w.,
- w pawilonie perystylowym na Wzgórzu Partyzantów we Wrocławiu (ściany zewnętrzne i wewnętrzne przyziemia), l. 70 XIX w.

Badania wilgotności wykonałam w warunkach in situ metodami nieniszczącymi: dielektryczną, z użyciem miernika a Gann Uni 2 i sondą kulową B50, i mikrofalową, z użyciem miernika Trotec T600, oraz w warunkach laboratoryjnych niszczącą metodą grawimetryczną, z wykorzystaniem suszarki laboratoryjnej (Rys. 20).



**Rysunek 20.** Aparatura badawcza do badań nieniszczących: miernik dielektryczny Gann Uni 2 (a) i miernik mikrofalowy Trotec T600 (b), za [A9] oraz proces pobierania próbki muru do badań w laboratorium metodą grawimetryczną, za [A11]

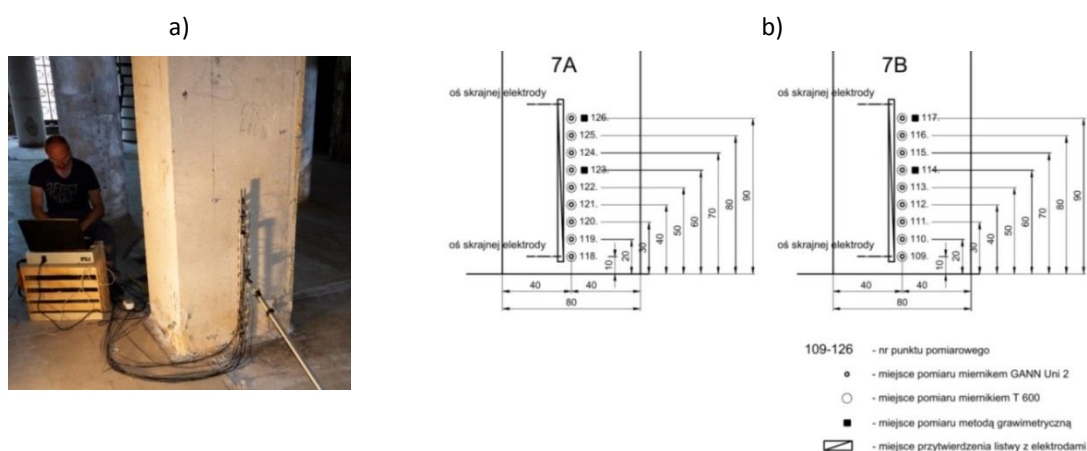
Pomiary wykonałam w różnych wariantach; różnicowałam zarówno liczbę punktów pomiarowych (pomiarów punktowych wykonywano w tych samych miejscach, w których elektrody tomografu dotykały ściany lub co drugą elektrodę), jak i liczbę zastosowanych metod pomiarowych, co m.in. uwarunkowane było uzyskaniem zgody służb konserwatorskich. W efekcie tego poszczególne zbiory różniły się liczebnością danych. Przykładowe fragmenty tych zbiorów przedstawiono w Tabelach 11, 13 i 16 oraz opublikowano w artykułach naukowych [A6–A8, A10 i A12].

**Moim znacznym wkładem w rozwój dyscypliny inżynieria lądowa, geodezja i transport jest zbudowanie na drodze badawczej pięciu zbiorów danych na potrzeby walidacji metod algorytmicznych tworzenia przestrzennego obrazu wilgotności w zabytkowych murach ceglanych z wykorzystaniem tomografii elektrycznej.**



Weryfikacja metod algorytmicznych została rozpoczęta od sprawdzenia czy szeroko pojęte metody uczenia maszynowego są przydatne do przestrzennego obrazowania wilgotności wewnątrz ceglanego muru z wykorzystaniem tomografii elektrycznej. W tym celu porównane zostały w pierwszej kolejności trzy modele oparte na uczeniu maszynowym, a mianowicie metoda regresji liniowej z uczeniem za pomocą maszyny wektorów nośnych (LR-SVM), metoda regresji liniowej z uczeniem metodą najmniejszych kwadratów (LR-LS) i sztuczne sieci neuronowe (SSN) oraz klasyczny model matematyczny Gaussa-Newtona (GN). Modele te wytypowano na podstawie rezultatów wstępnych analiz numerycznych przeprowadzonych na wygenerowanym symulacyjnie zestawie przypadków szkoleniowych, których liczba dla każdej z metod wyniosła 44000, co szczegółowo opisano w artykule [A6].

Weryfikacja przydatności ww. metod została przeprowadzona na zbiorze danych rzeczywistych, liczącym 126 zestawów wyników uzyskanych metodami dielektryczną, mikrofalową i grawimetryczną, za pomocą wizualnej analizy porównawczej. Na użytek tej weryfikacji opracowałam koncepcję pomiarów wilgotności muru ceglanego w Pawilonie Perystylowym na Wzgórzu Partyzantów we Wrocławiu, przygotowałam stanowiska badawcze, opracowałam metodykę pomiarów wilgotności, wykonałam pomiary i przeanalizowałam uzyskane wyniki. Przykładowy widok stanowiska pomiarowego oraz schemat rozmieszczenia punktów pomiarowych pokazano na Rysunku 21, natomiast fragment zbioru danych zamieszczono w Tabeli 11, za [A6]. Ponieważ pomiary punktowe nie pozwalają na określenie przestrzennego rozkładu wilgotności wewnątrz badanego muru, brakuje obrazów referencyjnych umożliwiających obiektywną ocenę wierności odwzorowania rzeczywistych danych walidacyjnych przez poszczególne modele. Z tego powodu weryfikację przeprowadzono również na danych wygenerowanych symulacyjnie. Umożliwiły one przypisanie wygenerowanych obrazów rekonstrukcji do obrazów referencyjnych, a co za tym idzie, porównanie i obiektywną ocenę poszczególnych modeli za pomocą wskaźników ilościowych: współczynnika korelacji obrazu  $ICC$ , pierwiastka błędu średniokwadratowego  $RMSE$ , względnego błędu obrazu  $RIE$  i błędu procentowego  $PE$ .



**Rysunek 21.** Przykładowy widok stanowiska pomiarowego (a) oraz schemat rozmieszczenia punktów pomiarowych na przeciwnych bokach filaru (b), wg [A6]



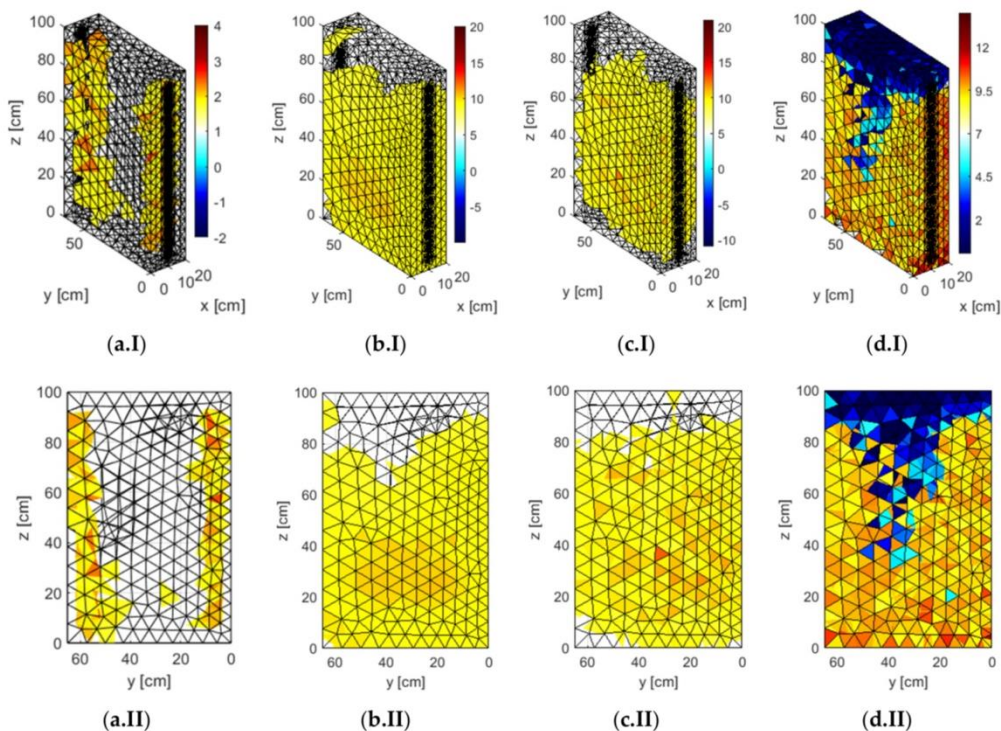
**Tabela 11.** Fragment bazy danych zawierającej wyniki pomiarów uzyskanych metodami dielektryczną, mikrofalową i grawimetryczną na potrzebę walidacji modeli GN, LR-SVM, LR-LS i SSN ,za [A6]

Nr	Strona ściany	Odległość punktu pomiarowego od posadzki	Wskazanie miernika dielektrycznego		Wskazanie miernika mikrofalowego		Wilgotność określona w laboratorium
			$X_D$ [-]	$U_m^D$ [%]	$X_M$ [-]	$U_m^M$ [%]	$U_m$ [%]
109.		10 cm	98,5	10,25	36,8	5,8	-
110.		20 cm	87,3	8,3	30,1	3,5	-
111.		30 cm	77,6	6,7	42,5	7,7	-
112.		40 cm	94,8	9,6	43,0	7,9	-
113.	7B	50 cm	84,2	7,8	44,6	8,4	-
114.		60 cm	78,1	6,8	40,0	6,9	2,70
115.		70 cm	84,6	7,9	34,1	4,8	-
116.		80 cm	51,6	2,3	29,5	3,3	-
117.		90 cm	41,2	0,6	33,2	4,5	1,70
118.		10 cm	131,2	15,8	39,9	6,8	-
119.		20 cm	84,8	7,9	46,3	9,0	-
120.		30 cm	97,5	10,1	48,1	9,6	-
121.		40 cm	111,9	12,5	45,2	8,6	-
122.	7A	50 cm	109,6	12,1	52,0	11,0	-
123.		60 cm	104,4	11,2	37,5	6,0	2,41
124.		70 cm	81,8	7,4	31,1	3,8	-
125.		80 cm	70,6	5,5	25,7	2,0	-
126.		90 cm	41,8	0,7	23,5	1,2	1,59

Wyniki weryfikacji, szczegółowo opisane w artykule naukowym [A6] opublikowanym w czasopiśmie *Energies*, wykazały, że metody oparte na uczeniu maszynowym mają większy potencjał do tworzenia poprawnych rekonstrukcji tomograficznych, niż tradycyjne metody matematyczne, a spośród analizowanych metod rekonstrukcje obrazu przeprowadzone z wykorzystaniem sztucznych sieci neuronowych najwierniej odzwierciedliły obraz rozkładu wilgotności uzyskany na podstawie pomiarów walidacyjnych. Potwierdziły to uzyskana najwyższa dla SSN wartość współczynnika *ICC* równa 0,984, a także najniższe wartości błędów *RMSE*, *RIE* i *PE* wynoszące odpowiednio 0,743, 0,135 i 14% (Tabela 12). Przykładowe rekonstrukcje tomograficzne rozkładu wilgotności w murze, sporządzone na podstawie rzeczywistych pomiarów, przedstawiono na Rysunku 22, za [A6].

**Tabela 12.** Wartości wskaźników *RMSE*, *RIE*, *PE* i *ICC*, charakteryzujących jakość rekonstrukcji dla poszczególnych metod rekonstrukcji obrazu, wg [A6]

Wskaźnik	Metoda rekonstrukcji			
	GN	LR-SVM	LR-LS	SSN
<i>RMSE</i> [-]	4,3799	1,7329	1,8647	<b>0,7428</b>
<i>RIE</i> [-]	0,7944	0,3143	0,3382	<b>0,1347</b>
<i>PE</i> [%]	79%	31%	34%	<b>14%</b>
<i>ICC</i> [-]	0,5542	0,9077	0,8915	<b>0,9836</b>



**Rysunek 22.** Rekonstrukcje tomograficzne rozkładu wilgotności w murze sporządzone na podstawie rzeczywistych pomiarów metodami: a) GN; b) LR-SVM; c) LR-LS; d) SSN, za [A6]

Artykuł [A6] został dostrzeżony w środowisku badaczy zajmujących się podobną tematyką i do chwili obecnej był przez nich cytowany 29 razy w bazie *Web of Science*, 33 razy w bazie *Scopus* i 24 razy w bazie *Google Scholar*. **Moim znacznym wkładem w rozwój uprawianej przeze mnie dyscypliny jest udział, w zweryfikowaniu przydatności metod GN, SSN, LR-SVM i LR-LS do tworzenia przestrzennego obrazu wilgotności murów ceglanych z wykorzystaniem tomografii elektrycznej oraz w wykazaniu, że uczenie maszynowe ma większy potencjał do tworzenia poprawnych rekonstrukcji tomograficznych, niż tradycyjne metody matematyczne, a spośród analizowanych metod sztuczne sieci neuronowe najwierniej odzwierciedlają obraz rozkładu wilgotności uzyskany na podstawie pomiarów walidacyjnych.**

Na podstawie analizy rezultatów analiz opisanych w artykule [A6] autorzy zauważyli, że jakość rekonstrukcji poszczególnych pikseli obrazu może się znacząco różnić w zależności od badanego fragmentu muru oraz zastosowanej metody predykcji. Zainspirowało to Grzegorza Kłosowskiego do opracowania autorskiego hybrydowego podejścia o nazwie *Pixel Oriented Ensemble* (POE), polegającego na jednoczesnym wykorzystaniu kilku metod uczenia maszynowego. Podejście to opiera się na założeniu, że jeśli dla każdego piksela obrazu wyjściowego wytrenowanych zostanie kilka modeli predykcyjnych, to możliwe będzie zoptymalizowanie predykcji poprzez wybór dla każdego piksela najlepszego z tych modeli. Zadaniem POE jest zatem zagwarantowanie rekonstrukcji o jakości przewyższającej tą uzyskaną przy zastosowaniu którejkolwiek z jednorodnych metod algorytmicznych zastosowanych w ramach prezentowanego podejścia.



Na danych wygenerowanych symulacyjnie wytrenowano cztery modele oparte na uczeniu maszynowym, a mianowicie: metodę jednorodnej sieci elastycznej (EN), metodę regresji liniowej z uczeniem metodą najmniejszych kwadratów (LR-LS), metodę regresji liniowej z uczeniem za pomocą maszyny wektorów nośnych (LR-SVM) i sztuczne sieci neuronowe (SSN). Oprócz wymienionych modeli wytrenowany został również klasyfikacyjny model predykcyjny, oparty na metodzie k-najbliższych sąsiadów (kNN), którego zadaniem było wybranie dla każdego piksela obrazu wyjściowego tej spośród czterech metod, która wygenerowała wartość najbardziej zbliżoną do referencyjnej. Szczegółowo opisano to w artykule [A8].

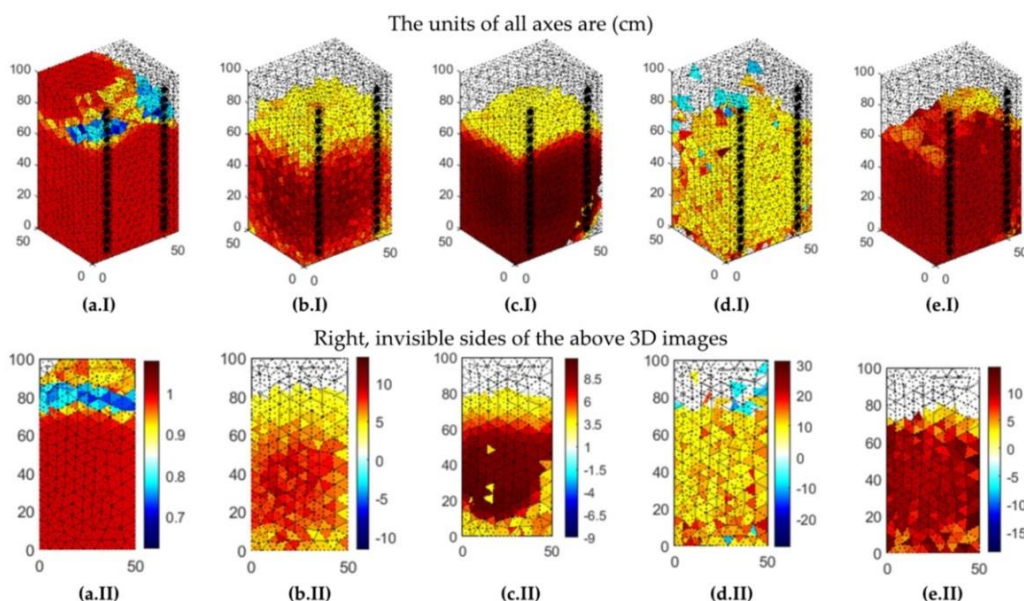
Weryfikacja przydatności metody POE została w pierwszej kolejności przeprowadzona na zbiorze danych rzeczywistych, liczącym 90 zestawów wyników, uzyskanych metodami dielektryczną, mikrofalową i grawimetryczną, za pomocą wizualnej analizy porównawczej. Na użytek tej weryfikacji opracowałam koncepcję pomiarów wilgotności muru ceglanego w zabytkowym budynku fundacji Heimanna we Wrocławiu, przygotowałam stanowiska badawcze, opracowałam metodykę pomiarów wilgotności, wykonałam pomiary i przeanalizowałam uzyskane wyniki. Przygotowałam również dane walidacyjne do analiz numerycznych. Fragment bazy danych zawierającej wyniki przeprowadzonych pomiarów zawiera Tabela 13, za [A8].

Jak to szczegółowo opisano w artykule [A8] opublikowanym w czasopiśmie *Measurement*, wizualne porównanie wygenerowanych rekonstrukcji z obrazem referencyjnym jest bardzo subiektywne, jednak analizując Rysunek 23 wyraźnie widoczne jest to, że rekonstrukcje tomograficzne uzyskane metodą POE wyglądają najlepiej spośród wszystkich porównywanych metod.

**Tabela 13.** Fragment bazy danych zawierającej wyniki pomiarów uzyskanych metodami dielektryczną, mikrofalową i grawimetryczną na potrzebę walidacji modelu POE, za [A8]

Nr	Odległość punktu pomiarowego od posadzki	Wskazanie miernika dielektrycznego		Wskazanie miernika mikrofalowego		Wilgotność określona w laboratorium
		$X_D$ [-]	$U_m^D$ [%]	$X_M$ [-]	$U_m^M$ [%]	$U_m$ [%]
73.	15 cm	136,4	6,83	54,2	6,58	6,11
74.	25 cm	128,1	6,16	55,8	6,92	–
75.	35 cm	127,4	6,11	53,5	6,44	–
76.	45 cm	126,4	6,03	54,7	6,69	–
77.	55 cm	116,8	5,30	45,3	4,84	–
78.	65 cm	126,6	6,04	50,2	5,77	5,42
79.	75 cm	117,6	5,36	51,3	5,99	–
80.	85 cm	120,9	5,60	46,7	5,10	–
81.	95 cm	111,9	4,94	51,8	6,09	3,25
82.	15 cm	124,0	5,84	54,1	6,56	–
83.	25 cm	126,0	6,00	48,1	5,37	–
84.	35 cm	133,1	6,56	53,2	6,38	–
85.	45 cm	133,3	6,57	48,8	5,50	–
86.	55 cm	132,1	6,48	48,7	5,48	–
87.	65 cm	120,1	5,54	57,7	7,32	–
88.	75 cm	106,7	4,57	57,6	7,30	–
89.	85 cm	107,4	4,62	58,2	7,43	–
90.	95 cm	120,1	5,54	60,0	7,83	–





**Rysunek 23.** Rekonstrukcje tomograficzne rozkładu wilgotności w murze uzyskane na podstawie rzeczywistych pomiarów, uzyskane przy użyciu metod: a) EN; b) LR-SVM; c) LR-LS; d) SSN; e) POE, za [A8]

Potwierdziły to rezultaty walidacji przeprowadzonej na danych wygenerowanych symulacyjnie, ocenione za pomocą obiektywnych miar, takich jak: współczynnik korelacji obrazu *ICC*, pierwiastek błędu średniokwadratowego *RMSE*, względny błąd obrazu *RIE* i średni bezwzględny błąd procentowy *MAPE*, które dla metody POE były najkorzystniejsze i wyniosły odpowiednio 0,96, 0,62, 0,14 i 0,05 (Tabela 14).

**Tabela 14.** Wartości wskaźników *RMSE*, *RIE*, *MAPE* i *ICC* charakteryzujących jakość rekonstrukcji dla metod EN, LR-LS, LR-SVM, SSN i POE, wg [A8]

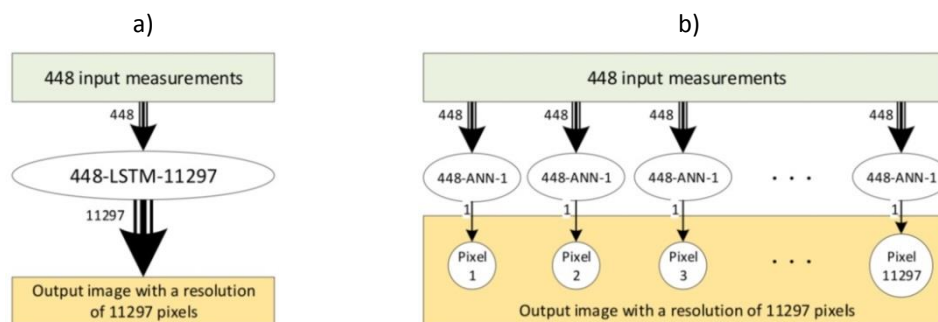
Wskaźnik	Metoda rekonstrukcji				
	EN	LR-LS	LR-SVM	SSN	POE
<i>RMSE</i> [-]	4,93	2,32	2,19	1,15	<b>0,62</b>
<i>RIE</i> [-]	0,86	0,51	0,46	0,26	<b>0,14</b>
<i>MAPE</i> [-]	0,45	1,06	0,79	0,27	<b>0,05</b>
<i>ICC</i> [-]	0,61	0,64	0,68	0,87	<b>0,96</b>

Artykuł [A8] był dotąd cytowany 9 razy w bazie *Web of Science*, 12 razy w bazie *Scopus* i 14 razy w bazie *Google Scholar*. **Moim znacznym wkładem w rozwój uprawianej przeze mnie dyscypliny jest udział w zweryfikowaniu przydatności autorskiej hybrydowej metody *Pixel Oriented Ensemble* (POE) do tworzenia przestrzennego obrazu wilgotności murów ceglanych z wykorzystaniem tomografii elektrycznej oraz w wykazaniu, że dokładność odwzorowania wilgotności uzyskana za pomocą POE jest wyższa, niż uzyskana za pomocą każdej z jednorodnych metod algorytmicznych zastosowanych w ramach tego podejścia.**

Dalsze badania walidacyjne miały na celu zweryfikowanie słuszności koncepcji wykorzystania rekurencyjnej głębokiej sieci neuronowej typu LSTM do przestrzennego

obrazowania wilgotności wewnątrz ceglanego muru z wykorzystaniem tomografii elektrycznej, która to sieć w takim celu nie była wcześniej stosowana. Ideą rekurencyjnych głębokich sieci neuronowych jest bowiem wykorzystanie danych sekwencyjnych, tymczasem dane pozyskane z wykorzystaniem tomografii elektrycznej mają charakter statyczny. Wykorzystanie sieci LSTM było możliwe dzięki konwersji danych wejściowych na wektory (sekwencje).

W ramach przeprowadzonych analiz wytrenowane zostały dwa modele predykcyjne: model składający się z pojedynczej sieci LSTM i, dla celów porównawczych, model składający się z wielu oddzielnych płytek sieci neuronowych z pojedynczym wyjściem. Do uczenia obu modeli wykorzystano zestaw danych wygenerowanych symulacyjnie liczący 30000 przypadków. Warstwa wejściowa zawierała 448 wartości, które odpowiadały spadkom napięcia między poszczególnymi parami elektrod, natomiast obraz wyjściowy został podzielony na 11 297 pikseli. Schemat konwersji 448 wartości wejściowych na obraz o rozdzielczości 11297 pikseli dla jednorodnej sieci LSTM i wielu SSN przedstawiono na Rysunku 24, natomiast szczegółowe informacje na temat struktur i parametrów obu sieci, a także opis przebiegu procesu ich uczenia zamieszczono w artykule [A7], opublikowanym w czasopiśmie *Energies*.



**Rysunek 24.** Schemat konwersji pomiarów wejściowych na obraz wyjściowy dla: a) jednorodnej sieci LSTM; b) wielu sieci SSN (ang. ANN) z pojedynczym wyjściem, za [A7]

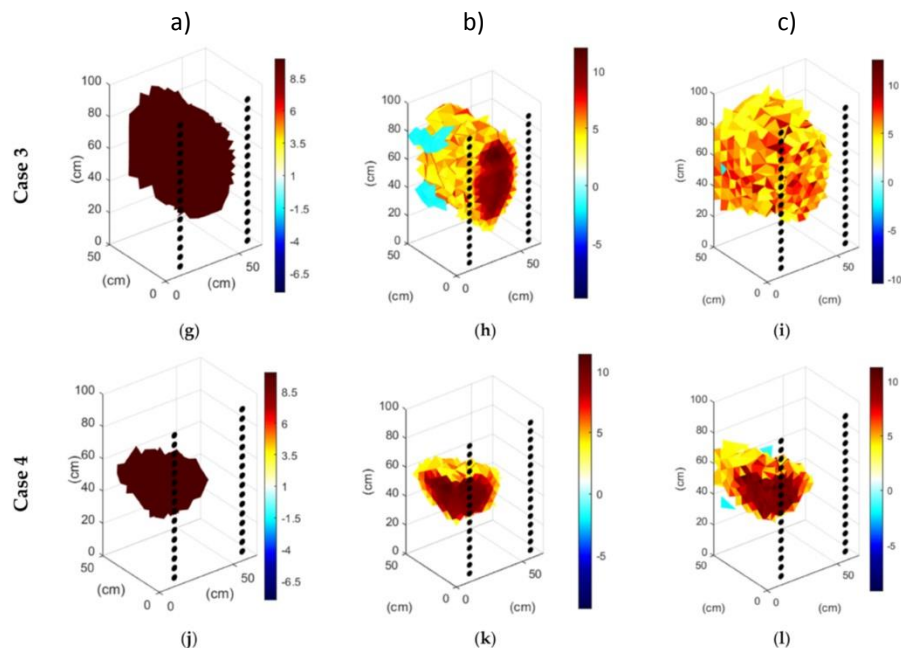
Tak, jak w to miało miejsce w przypadku badań opisanych w artykułach [A6] i [A8], weryfikacja przydatności modelu LSTM została przeprowadzona w oparciu o dane rzeczywiste, za pomocą wizualnej analizy porównawczej, oraz w oparciu o dane wygenerowane symulacyjnie, z wykorzystaniem obiektywnych wskaźników ilościowych.

Dane rzeczywiste, w liczbie 24 zestawów wyników, pozyskano badając wilgotność murowanych ścian zewnętrznych przyziemia zachodniego skrzydła klasztoru pocysterskiego w Pelplinie nieniszczącymi metodami dielektryczną i mikrofalową. W celu pozyskania tych danych opracowałam koncepcję pomiarów wilgotności, przygotowałam stanowiska badawcze, opracowałam metodykę pomiarów wilgotności i wykonałam pomiary. Uzyskane wyniki przeanalizowałam i przygotowałam dane walidacyjne do analiz numerycznych.

Z kolei, dane wygenerowane przez symulację objęły 4 różne przypadki; przykładowe rekonstrukcje tomograficzne rozkładu wilgotności dla dwóch z tych przypadków pokazano na Rysunku 25, za [A7].



Wyniki weryfikacji, szczegółowo opisane w artykule naukowym [A7], wykazały, że obrazy zrekonstruowane w oparciu o rzeczywiste pomiary metodą LSTM są bardziej jednoznaczne, niż rekonstrukcje metodą SSN. Potwierdziły to rezultaty walidacji przeprowadzonej na danych wygenerowanych symulacyjnie, ocenione za pomocą następujących miar: pierwiastka błędu średniokwadratowego  $RMSE$ , znormalizowanego błędu średniokwadratowego  $NMSE$ , względnego błędu obrazu  $RIE$  i współczynnika korelacji obrazu  $ICC$ , przedstawione w Tabeli 15. Istotną zaletą metody LSTM jest również bardzo duża w porównaniu z metodą SSN, szybkość rekonstrukcji, co wynika z wielokrotnie mniejszej złożoności modelu LSTM.



**Rysunek 25.** Przykładowe rekonstrukcje tomograficzne rozkładu wilgotności w murze uzyskane na podstawie pomiarów wygenerowanych symulacyjnie: a) obrazy referencyjne; b) obrazy zrekonstruowane metodą LSTM; c) obrazy zrekonstruowane metodą SSN, za [A7]

**Tabela 15.** Wartości wskaźników  $RMSE$ ,  $NMSE$ ,  $RIE$  i  $ICC$  charakteryzujących jakość rekonstrukcji tomograficznych metodami LSTM i SSN, wg [A7]

Metoda rekonstrukcji	Wskaźnik	Rekonstruowany przypadek			
		Przypadek 1	Przypadek 2	Przypadek 3	Przypadek 4
LSTM	$RMSE$ [-]	<b>1,419</b>	<b>0,812</b>	<b>1,445</b>	<b>0,548</b>
	$NMSE$ [-]	<b>0,190</b>	<b>0,076</b>	<b>0,179</b>	<b>0,070</b>
	$RIE$ [-]	<b>0,259</b>	<b>0,178</b>	<b>0,321</b>	<b>0,219</b>
	$ICC$ [-]	<b>0,945</b>	<b>0,972</b>	<b>0,918</b>	<b>0,963</b>
SSN	$RMSE$ [-]	1,436	1,040	3,332	0,690
	$NMSE$ [-]	0,192	0,097	0,414	0,089
	$RIE$ [-]	0,260	0,201	0,488	0,246
	$ICC$ [-]	0,943	0,966	0,812	0,954
Zwycięska metoda:		LSTM	LSTM	LSTM	LSTM
		LSTM	LSTM	LSTM	LSTM
		LSTM	LSTM	LSTM	LSTM
		LSTM	LSTM	LSTM	LSTM



Artykuł [A7] był dotąd cytowany 7 razy w bazie *Web of Science*, 9 razy w bazie *Scopus* i 11 razy w bazie *Google Scholar*. **Moim znacznym wkładem w rozwój uprawianej przeze mnie dyscypliny jest udział w zweryfikowaniu przydatności głębokiej rekurencyjnej sieci neuronowej typu LSTM do tworzenia przestrzennego obrazu wilgotności murów ceglanych z wykorzystaniem tomografii elektrycznej oraz w wykazaniu, że jednorodna sieć LSTM z większą dokładnością i w krótszym czasie rekonstruuje obrazy wilgotnych ceglanych murów, niż metoda oparta na wielu oddzielnych płytkich sieci neuronowych z pojedynczym wyjściem.**

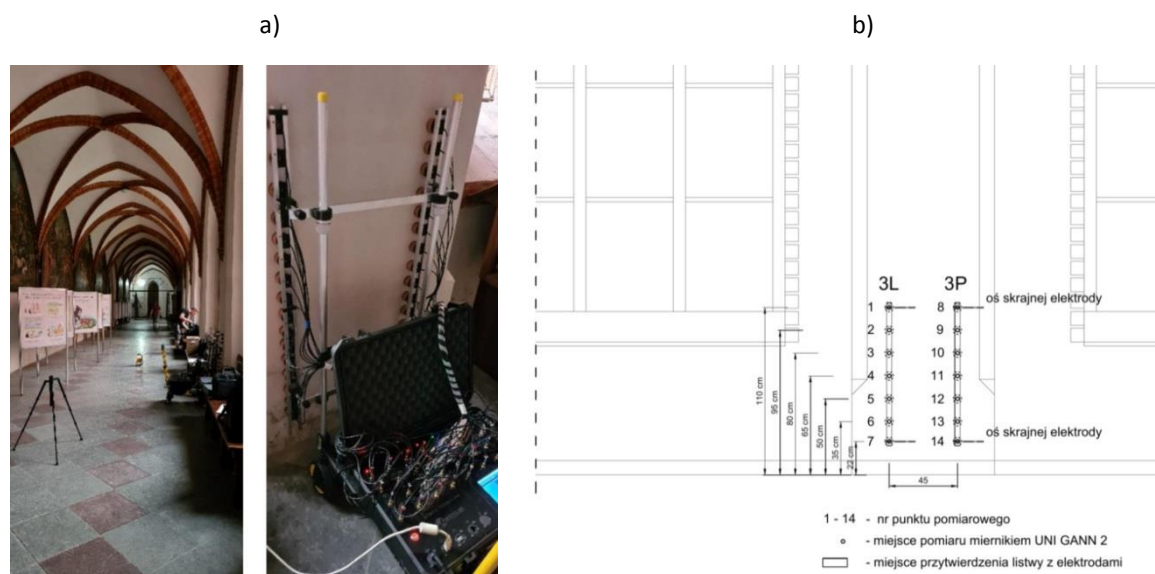
Satysfakcjonujące wyniki uzyskane przy użyciu głębokiej rekurencyjnej sieci neuronowej typu LSTM, opisane w artykule [A7], wskazały autorom dalszy kierunek badań walidacyjnych, które objęły analizy z zastosowaniem tej sieci, a których wyniki opublikowano w czasopismach *Energies* i *Measurement*, w artykułach naukowych [A10] i [A12].

W artykule [A10] zaprezentowano wyniki badań, w których porównaniu poddano wydajność konwolucyjnych sieci neuronowych (CNN), które jak to wynika z dokonanego przeze mnie przeglądu literatury doskonale radzą sobie z rozwiązywaniem problemów związanych z obrazem, sieci z długą pamięcią krótkotrwałą (LSTM) oraz autorskiego modelu hybrydowego CNN+LSTM, zawierającego zarówno warstwę CNN, jak i LSTM, opracowanego przez Grzegorza Kłosowskiego.

Wspomniane modele predykcyjne zostały wytrenowane przy użyciu wygenerowanego zbioru danych liczącego 40000 przypadków odzwierciedlających naturalne obserwacje. Porównywalność modeli zapewniono przyjmując podczas opracowywania ich architektury takie same parametry i wykorzystując identyczne zestawy treningowe i testowe podczas szkolenia i walidacji.

Weryfikacja jakości rekonstrukcji tomograficznych została przeprowadzona na zbiorze danych rzeczywistych, liczącym 70 wyników uzyskanych nieniszczącą metodą dielektryczną. Na użytek tej weryfikacji opracowałam koncepcję pomiarów wilgotności muru ceglanego w krużgankach zabytkowego pocysterskiego zespołu katedralnego w Pelplinie, przygotowałam stanowiska badawcze, opracowałam metodykę pomiarów wilgotności oraz wykonałam pomiary. Przeanalizowałam ponadto uzyskane wyniki badań i przeprowadziłam walidację za pomocą wizualnej analizy porównawczej.

Dane te pozyskano w wyniku badań wilgotności murowanych ścian zewnętrznych przyziemia w krużgankach klasztoru pocysterskiego w Pelplinie. Przykładowy widok stanowiska pomiarowego oraz schemat rozmieszczenia punktów pomiarowych pokazano na Rysunku 26, natomiast fragment zbioru danych zamieszczono w Tabeli 16, za [A10].



**Rysunek 26.** Przykładowy widok stanowiska pomiarowego (a) oraz rysunek rozmieszczenia punktów pomiarowych (b), wg [A10]

**Tabela 16.** Fragment bazy danych zawierającej wyniki pomiarów uzyskanych metodą dielektryczną na potrzebę walidacji modeli CNN, LSTM i CNN+LSTM, za [A10]

Nr	Odległość punktu pomiarowego od posadzki	Wskazanie miernika dielektrycznego	
		$X_D$ [-]	$U_m^D$ [%]
1.	22 cm	116,6	8,19
2.	35 cm	120,0	9,17
3.	50 cm	119,0	8,87
4.	65 cm	111,0	6,79
5.	80 cm	111,7	6,95
6.	95 cm	107,0	5,94
7.	110 cm	102,0	5,03
8.	22 cm	121,3	9,58
9.	35 cm	120,0	9,17
10.	50 cm	119,8	9,11
11.	65 cm	112,7	7,19
12.	80 cm	112,8	7,21
13.	95 cm	121,4	9,61
14.	110 cm	108,8	6,31

Weryfikację przeprowadzono również na wygenerowanych danych w postaci czterech przypadków, dla których pomiary były symulowane. Umożliwiło to przypisanie rekonstrukcji tomograficznych do obrazów referencyjnych, a co za tym idzie porównanie i obiektywną ocenę modeli za pomocą takich wskaźników ilościowych, jak: współczynnik korelacji obrazu *ICC*, błąd średniokwadratowy *MSE*, względny błąd obrazu *RIE* i średni bezwzględny błąd procentowy *MAPE*. Dokonano ponadto uogólnionej oceny jakości wszystkich trzech analizowanych modeli predykcyjnych na podstawie uśrednionych dla 10000 przypadków testowych wartości



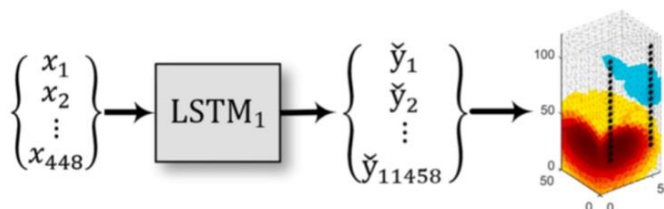
współczynników MSE, RIE, MAPE i ICC, które przedstawiono w Tabeli 17. Wyniki badań walidacyjnych wykazały, że odpowiednie połączenie warstw CNN i LSTM zwiększa jakość modelu predykcyjnego i dowiodły wyraźnej przewagi hybrydowej metody CNN+LSTM nad metodami jednorodnymi.

**Tabela 17.** Uśrednione dla 10000 przypadków testowych wartości wskaźników *MSE*, *RIE*, *MAPE* i *ICC* charakteryzujących jakość rekonstrukcji dla metod CNN, LSTM i CNN+LSTM, za [A10]

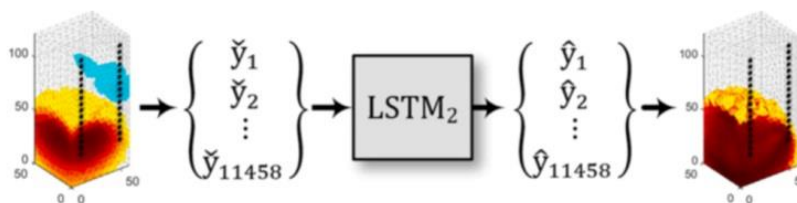
Wskaźnik	Metoda rekonstrukcji		
	CNN	LSTM	CNN+LSTM
<i>MSE</i> [-]	7,534	6,971	<b>0,609</b>
<i>RIE</i> [-]	0,634	0,643	<b>0,183</b>
<i>MAPE</i> [-]	1,306	1,453	<b>0,299</b>
<i>ICC</i> [-]	0,753	0,602	<b>0,913</b>

Artykuł [A10] został opublikowany w 2023 roku w czasopiśmie *Energies* i był dotąd cytowany 1 raz w bazie *Google Scholar*. **Moim znacznym wkładem w rozwój uprawianej przeze mnie dyscypliny jest udział w zweryfikowaniu przydatności autorskiej hybrydowej metody CNN+LSTM do tworzenia przestrzennego obrazu wilgotności murów ceglanych z wykorzystaniem tomografii elektrycznej oraz w wykazaniu, że odpowiednie połączenie warstw CNN i LSTM zapewnia większą dokładność rekonstrukcji, niż jednorodne metody CNN i LSTM.**

Z kolei w artykule [A12] zaprezentowano wyniki badań walidacyjnych nowej dwuetapowej metody opartej na sieci neuronowej LSTM, opracowanej przez Grzegorza Kłosowskiego z myślą o poprawie jakości rekonstruowanych obrazów. Pierwszy etap rekonstrukcji to proces konwersji pomiarów napięcia w obrazy wstępne (Rys. 27), natomiast drugi etap polega na przekształceniu wstępnych obrazów w obrazy końcowe (Rys. 28). W ramach tej dwuetapowej metody konieczne jest wytrenowanie dwóch sieci neuronowych LSTM na podobnym zestawie obrazów wzorcowych. Zadaniem pierwszej z wytrenowanych sieci ( $LSTM_1$ ) jest wygenerowanie obrazów treningowych wykorzystywanych następnie do nauczania drugiej sieci ( $LSTM_2$ ) korygowania niedoskonałych obrazów rekonstrukcyjnych wygenerowanych w pierwszym kroku.

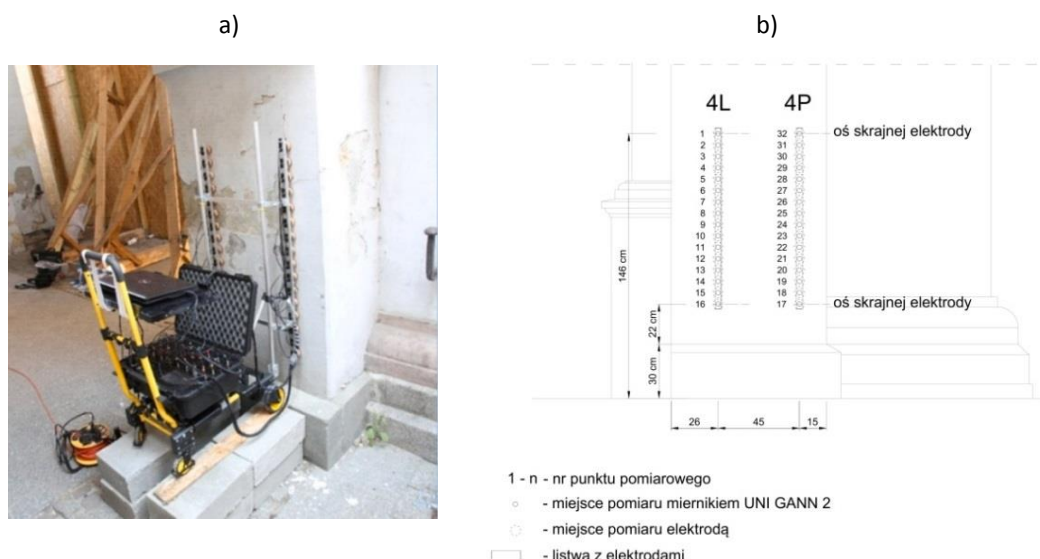


**Rysunek 27.** Etap pierwszy rekonstrukcji tomograficznej – przekształcenie przez sieć  $LSTM_1$  pomiarów w obrazy 3D, za [A12]

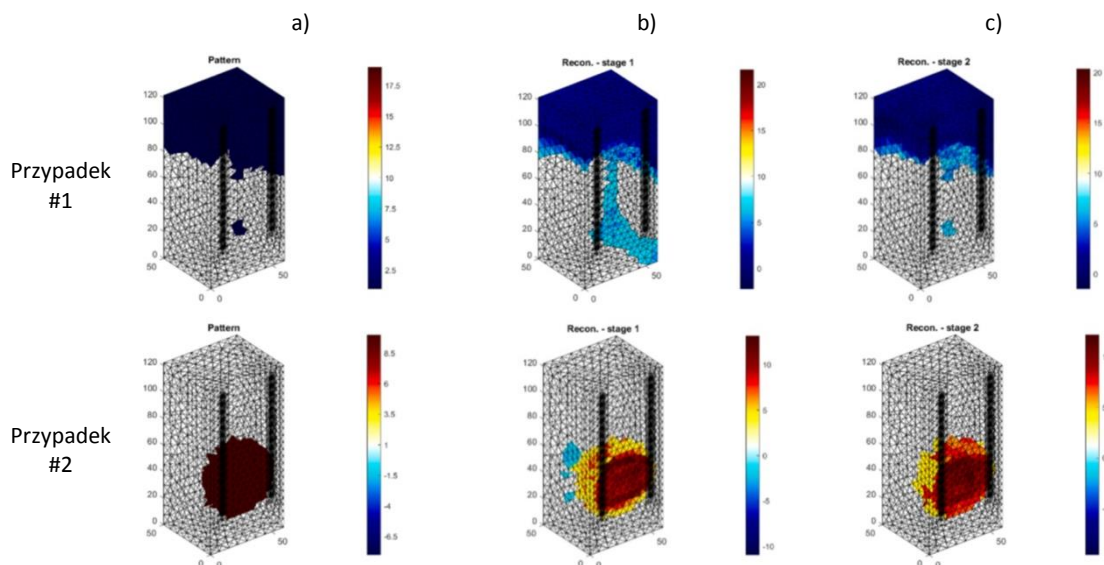


**Rysunek 28.** Etap drugi rekonstrukcji tomograficznej – korekta rekonstrukcji poprzez korektę przez sieć LSTM2 obrazu 3D wygenerowanego przez sieć LSTM<sub>1</sub>, za [A12]

Walidacja dwustopniowej sieci LSTM, poprzedzona wykonanym przeze mnie rozoznaniem literaturowym, polegała na porównawczej ocenie rekonstrukcji uzyskanych przez sieć LSTM<sub>1</sub> w etapie 1 ze skorygowanymi przez LSTM<sub>2</sub> rekonstrukcjami w uzyskanych w etapie 2. Analogicznie, jak we wcześniejszych badaniach, w pierwszej kolejności walidację przeprowadzono w oparciu o dane rzeczywiste, w liczbie 128 wyników, za pomocą wizualnej analizy porównawczej. Na użytek tej weryfikacji opracowałam koncepcję pomiarów wilgotności murowanych ścian piwnic i nadziemna Złotej Bramy w Gdańsku, przygotowałam stanowiska badawcze, wykonałam pomiary i przeanalizowałam uzyskane wyniki. Przygotowałam ponadto dane walidacyjne do analiz numerycznych i przeprowadziłam walidację za pomocą wizualnej analizy porównawczej. Przykładowy widok stanowiska pomiarowego oraz schemat rozmieszczenia punktów pomiarowych pokazano na Rysunku 29, za [A12]. Następnie, walidację przeprowadzono na pięciu wygenerowanych przypadkach, dla których pomiary były symulowane; przykładowe rekonstrukcje tomograficzne rozkładu wilgotności dla dwóch z tych przypadków pokazano na Rysunku 30, za [A12]. Umożliwiło to przypisanie rekonstrukcji tomograficznych do obrazów referencyjnych, a co za tym idzie, obiektywną ocenę modeli za pomocą wskaźników ilościowych.



**Rysunek 29.** Przykładowy widok stanowiska pomiarowego (a) oraz rysunek rozmieszczenia punktów pomiarowych (b), za [A12]



**Rysunek 30.** Przykładowe rekonstrukcje tomograficzne rozkładu wilgotności w murze uzyskane na podstawie pomiarów wygenerowanych symulacyjnie: a) obrazy referencyjne; b) pierwszy etap rekonstrukcji; c) pierwszy etap rekonstrukcji, za [A12]

Wyniki walidacji, szczegółowo opisane w artykule [A12] opublikowanym w czasopiśmie *Measurement*, wykazały, że zastosowanie sieci LSTM<sub>2</sub> zwiększa dokładność rekonstrukcji, a opisane podejście daje najlepsze wyniki przy zróżnicowanym rozkładzie wilgotności. Potwierdziły to rezultaty walidacji przeprowadzonej na danych wygenerowanych symulacyjnie, ocenione za pomocą następujących miar: współczynnika korelacji obrazu *ICC*, błędu średniokwadratowego *MSE*, oraz nie stosowanych we wcześniejszych analizach wskaźnika podobieństwa strukturalnego *SSIM* oraz szczytowego stosunku sygnału do szumu *PSNR*, przedstawione w Tabeli 18. Wartości wszystkich tych wskaźników we wszystkich pięciu przypadkach rekonstrukcyjnych były korzystniejsze w drugim etapie rekonstrukcji.

**Tabela 18.** Porównanie rekonstrukcji po etapie 1 i etapie 2 za pomocą wskaźników ilościowych, wg [A12]

Etap rekonstrukcji	Wskaźnik ilościowy	Rekonstruowany przypadek					Wartość średnia
		#1	#2	#3	#4	#5	
Etap 1	<i>MSE</i> [-]	3,88	14,25	1,69	2,87	3,68	5,27
	<i>PSNR</i> [-]	-5,89	-11,53	-2,30	-4,57	-5,66	-5,99
	<i>SSIM</i> [-]	0,76	0,39	0,06	0,22	0,45	0,37
	<i>ICC</i> [-]	0,88	0,53	0,36	0,64	0,78	0,64
Etap 2	<i>MSE</i> [-]	<b>1,41</b>	<b>3,71</b>	<b>1,10</b>	<b>1,72</b>	<b>2,24</b>	<b>2,04</b>
	<i>PSNR</i> [-]	<b>-1,51</b>	<b>-5,69</b>	<b>-0,43</b>	<b>-2,37</b>	<b>-3,50</b>	<b>-2,76</b>
	<i>SSIM</i> [-]	<b>0,88</b>	<b>0,58</b>	<b>0,19</b>	<b>0,39</b>	<b>0,62</b>	<b>0,53</b>
	<i>ICC</i> [-]	<b>0,95</b>	<b>0,83</b>	<b>0,65</b>	<b>0,80</b>	<b>0,89</b>	<b>0,83</b>

\*idealne *SSIM*, *ICC* = 1, idealny *PSNR*, *MSE* = 0





Moim znacznym wkładem w rozwój uprawianej przeze mnie dyscypliny jest udział w zweryfikowaniu przydatności dwustopniowej sieci LSTM do tworzenia przestrzennego obrazu wilgotności murów ceglanych z wykorzystaniem tomografii elektrycznej oraz w wykazaniu, że rekonstrukcja dwuetapowa, z wykorzystaniem sieci LSTM<sub>1</sub> i LSTM<sub>2</sub> zapewnia większą dokładność rekonstrukcji, niż jednoetapowa, uzyskiwana za pomocą pojedynczej sieci.

Podsumowując rezultaty zamieszczone w artykułach [A6–A8], [A10], [A12] dotyczące przestrzennego obrazowania wilgotności w zabytkowych murach ceglanych z wykorzystaniem zbudowanego systemu pomiarowego składającego się z urządzenia pomiarowego w postaci przenośnego hybrydowego tomografu elektrycznego i oprogramowania opartego o metody algorytmiczne, stwierdzono że system ten jest przydatny do celu, w jakim go opracowano. Przeprowadzone badania walidacyjne kilkunastu różnych metod algorytmicznych pozwoliły wskazać te, które najwierniej odwzorowały obrazy rozkładów wilgotności wewnątrz muru. Zestawiłam je w Tabeli 19 z podaniem wskaźników ilościowych charakteryzujących jakość rekonstrukcji.

**Tabela 19.** Zestawienie metod algorytmicznych, które najwierniej odwzorowały obrazy rozkładów wilgotności z podaniem wartości wskaźników ilościowych charakteryzujących jakość rekonstrukcji

Wskaźnik	Metoda rekonstrukcji				
	SSN [A6]	POE [A8]	LSTM [A7] (uśrednione wartości dla 4 przypadków)	CNN+LSTM [A10]	LSTM <sub>1</sub> + LSTM <sub>2</sub> [A12] (uśrednione wartości dla 5 przypadków)
RMSE [-]	0,7428	0,620	1,056	–	–
RIE [-]	0,1347	0,140	0,294	0,183	–
MSE [-]	–	–	–	0,609	2,04
NMSE [-]	–	–	0,129	–	–
MAPE [-]	–	0,05	–	0,299	–
PE [%]	14%	–	–	–	–
ICC [-]	0,9836	0,960	0,949	0,913	0,83
PSNR [-]	–	–	–	–	-2,76
SSIM [-]	–	–	–	–	0,53

Każda z metod wyszczególnionych w Tabeli 19 może być z powodzeniem wykorzystywana do przestrzennego obrazowania rozkładu wilgotności w zabytkowych murach ceglanych. W mojej opinii najbardziej przydatna wydaje się być jednak metoda *Pixel Oriented Ensemble* (POE), która jak to opisano powyżej, za artykułem [A8], wykorzystuje kilka wytrenowanych modeli predykcyjnych.

#### 4.1.2.4. Podsumowanie

Za najważniejsze osiągnięcia naukowe prezentowanego cyklu powiązanych tematycznie artykułów pt.: „Metodyka nieniszczącej identyfikacji i przestrzenne obrazowanie poziomu wilgotności zabytkowych murów ceglanych z wykorzystaniem algorytmów uczenia





maszynowego” stanowiące mój znaczny wkład w rozwój dyscypliny inżynieria lądowa, geodezja i transport uważam:

- jednoznaczne wskazanie, wraz z uzasadnieniem, metod predysponowanych do badania in situ poziomu wilgotności zabytkowych murów ceglanych pozwalających na pomiar punktowy o charakterze ilościowym,
- opracowanie oryginalnej, skutecznej metodyki kompleksowych badań in situ poziomu wilgotności murów ceglanych, uwzględniającej ścieżki postępowania zarówno dla budynków objętych, jak i nie objętych ochroną konserwatorską, oraz jej zweryfikowanie,
- dowiedzenie, że możliwa jest wiarygodna identyfikacja poziomu wilgotności zasolonego muru ceglanego za pomocą sztucznej sieci neuronowej o odpowiednio dobranej strukturze i algorytmie uczenia, na podstawie 5 zadanych parametrów uzyskanych metodami nieniszczącymi i minimalnie ingerującymi w zabytkową tkanę, w tym wykazanie, że predysponowana jest do tego SSN jednokierunkowa wielowarstwowa ze wsteczną propagacją błędu i algorytmem *Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno*,
- utworzenie na podstawie badań murów ceglanych w budynkach pochodzących z różnych okresów historycznych, metodami nieniszczącymi i minimalnie ingerującymi w strukturę muru, reprezentatywnego zbioru danych na użytek identyfikacji poziomu wilgotności z wykorzystaniem uczenia maszynowego,
- opracowanie dwóch modeli wiarygodnej neuronowej identyfikacji in situ poziomu wilgotności zabytkowych murów ceglanych i wykazanie, że dla zbioru danych obejmujących wyniki nieniszczących badań wilgotności masowej  $U_m$  zawierające się w szerokim przedziale od 3% do 12% i więcej predysponowana jest SSN jednokierunkowa wielowarstwowa ze wsteczną propagacją błędu, algorytmem *BFGS Quasi-Newton* i o strukturze 6–24–1, a dla zbioru danych obejmujących wyniki nieniszczących badań wilgotności masowej  $U_m$  od 8% w górę predysponowana jest SSN jednokierunkowa wielowarstwowa ze wsteczną propagacją błędu, algorytmem *Levenberg-Marquardt* i strukturze 6–6–1 oraz przeprowadzenie dla tego algorytmu niezależnej weryfikacji doświadczalnej,
- opracowanie dwóch modeli wiarygodnej identyfikacji in situ poziomu wilgotności zabytkowych murów ceglanych z wykorzystaniem algorytmu lasów losowych oraz metody wektorów nośnych i zbioru danych obejmującego wyniki nieniszczących badań wilgotności masowej  $U_m$  zawierające się w szerokim przedziale od 3% do 12% i więcej; wykazanie, że najbardziej predysponowany do przedmiotowego celu jest algorytm lasów losowych oraz przeprowadzenie dla tego algorytmu niezależnej weryfikacji doświadczalnej,
- zarekomendowanie do praktyki budowlanej dwóch algorytmów uczenia maszynowego: algorytmu lasów losowych dla zbioru danych, obejmującego wyniki nieniszczących badań wilgotności masowej  $U_m$  zawierające się w przedziale od 3% do 12% i więcej, oraz sztucznej sieci neuronowej jednokierunkowej wielowarstwowej ze wsteczną propagacją błędu,



- algorytmem uczenia *Levenberg-Marquardt*, o strukturze 6–6–1 dla zawężonego zbioru danych, obejmującego wyniki nieniszczących badań wilgotności masowej  $U_m$  od 8% w górę,
- opracowanie oryginalnej metodyki wiarygodnej ilościowej identyfikacji poziomu wilgotności zabytkowych murów ceglanych z wykorzystaniem metod nieniszczących i minimalnie ingerujących w strukturę muru oraz algorytmów uczenia maszynowego, wraz z przykładem jej zastosowania,
  - zbudowanie na drodze badawczej zbiorów danych na potrzeby walidacji metod algorytmicznych tworzenia przestrzennego obrazu wilgotności w zabytkowych murach ceglanych z wykorzystaniem tomografii elektrycznej,
  - przeprowadzenie walidacji metod algorytmicznych tworzenia przestrzennego obrazu wilgotności w zabytkowych murach ceglanych z wykorzystaniem tomografii elektrycznej i wskazanie na tej podstawie metod najwierniej odzwierciedlających obraz rozkładu wilgoci uzyskany na podstawie pomiarów walidacyjnych, a mianowicie: sztuczne sieci neuronowe (SSN), hybrydowa metoda POE, głęboka rekurencyjna sieć neuronowa typu LSTM, hybrydowa metoda CNN+LSTM i dwustopniowa sieć LSTM.

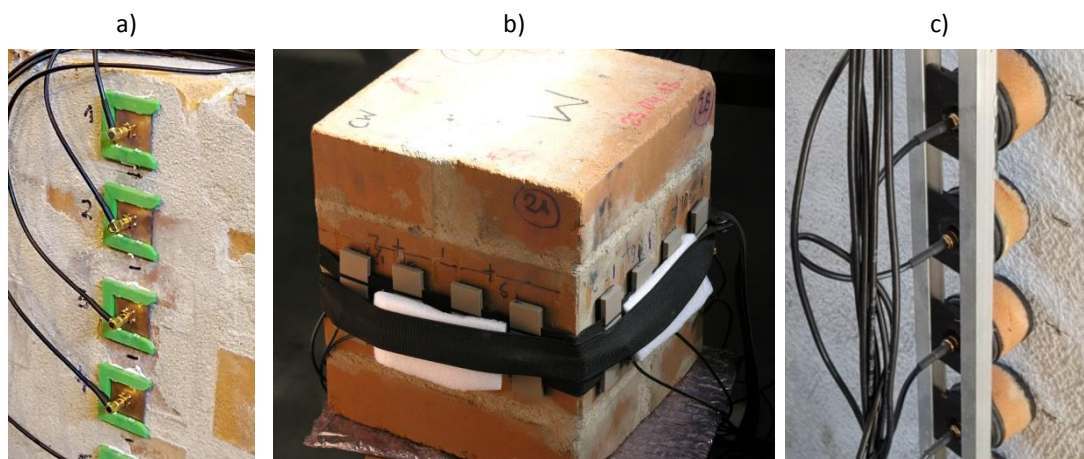
#### **4.2. OSIĄGNIĘCIE II, technologiczne: System pomiarowy w postaci prototypowego hybrydowego tomografu elektrycznego do przestrzennego obrazowania wilgotności w murach**

Osiągnięciem technologicznym jest system pomiarowy składający się z oryginalnego urządzenia pomiarowego w postaci przenośnego prototypowego hybrydowego tomografu elektrycznego i oprogramowania opartego o metody algorytmiczne służącego do przestrzennego obrazowania wilgotności w murach, w tym zabytkowych, w opracowaniu którego mam współudział. System ten został wykorzystany w badaniach naukowych, których wyniki stały się podstawą opracowania artykułów naukowych [A6–A8], [A10] i [A12] wchodzących w skład cyklu powiązanych tematycznie artykułów stanowiących **osiągnięcie I**.

Tomograf ten został skonstruowany w Centrum Badawczo-Rozwojowym NETRIX S.A. w Lublinie przy współpracy z interdyscyplinarnym zespołem badaczy z kilku krajowych jednostek naukowych: Tomasza Rymarczyka i Konrada Niderli z Instytutu Informatyki i Innowacyjnych Technologii Wyższej Szkoły Ekonomii i Innowacji w Lublinie, Grzegorza Kłosowskiego, Łukasza Skowrona i Stanisława Skowrona z Wydziału Zarządzania Politechniki Lubelskiej, Jana Sikory z Wydziału Elektrotechniki i Informatyki Politechniki Lubelskiej, a wcześniej z Wydziału Elektroniki i Techniki Informacyjnych Politechniki Warszawskiej oraz mojej osoby reprezentującej Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego Politechniki Wrocławskiej. Podstawą do jego realizacji był projekt badawczy pt. „Tomograf hybrydowy do badania zawilgocenia i stanu budynków” współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego w ramach Programu Operacyjnego Inteligentny Rozwój, działanie 1.1. Projekty B+R przedsiębiorstw, na podstawie umowy nr POIR.01.01.01-00-0167/15, w którym byłam wykonawczynią.

Ten przenośny prototypowy tomograf hybrydowy łączy w sobie dwie techniki tomografii elektrycznej: elektryczną tomografię pojemnościową (*Electrical Capacitance Tomography – ECT*) oraz tomografię impedancyjną (*Electrical Impedance Tomography – EIT*) i może wykonywać cykle pomiarowe *ECT* i *EIT* naprzemiennie lub badać obiekty przy użyciu tylko jednej z metod. Badania mające na celu pomiar wilgotności murów wykonywane są w trybie *EIT*, który wysyła do umieszczonych na powierzchni badanego obiektu elektrod sygnał prądowy o niskiej częstotliwości powodujący niewielkie zmiany napięcia w badanym obiekcie. Analizując zmiany tego napięcia w elektrodach określa się wartości przewodności poszczególnych elementów siatki elementów skończonych i na tej podstawie możliwe jest uzyskanie rekonstrukcji obrazu tomograficznego reprezentującego rozkład przewodności badanego obiektu.

Urządzenie pomiarowe składa się z jednostki centralnej w kształcie walizki, systemu elektrod, platformy transportowej, zasilacza 12 V i kabla USB. Mając na uwadze wilgotne lub mokre i równocześnie nierówne powierzchnie zabytkowych murów ceglanych, konstrukcja elektrod pomiarowych i sposób ich mocowania ewoluowały na poszczególnych etapach prac związanych z budową urządzenia, co obrazuje rysunek 31.

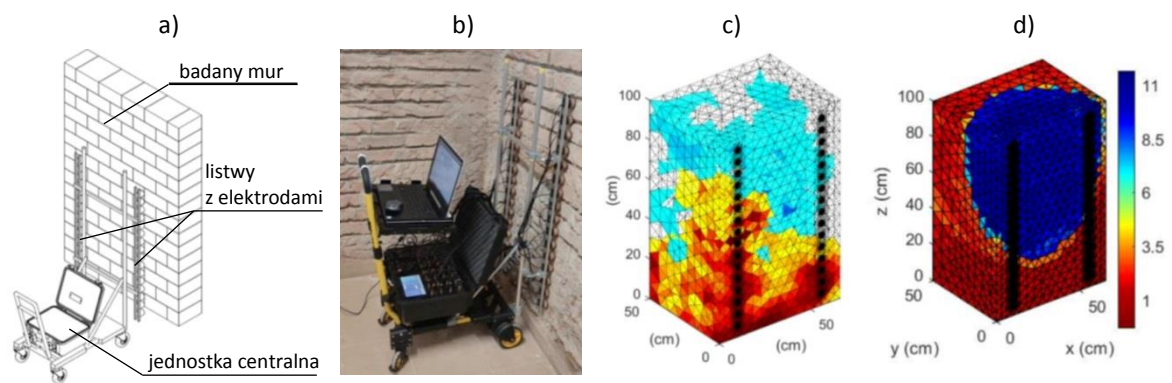


**Rysunek 31.** Ewolucja skonstruowanych na użytek prowadzonych badań punktowych elektrod pomiarowych: a) I etap prac – pojedyncze elektrody mocowane w ramach plastikowych przyklejonych do powierzchni muru, za [poz. 12 pkt. 3.5 w Załączniku 5]; b) II etap prac – pojedyncze elektrody mocowane za pomocą specjalnej opaski dociskowej, za [poz. 12 pkt. 3.5 w Załączniku 5]; c) III etap prac – grupa elektrod zamocowana na metalowej listwie

Ostatecznie skonstruowano 32 aktywne punktowe elektrody pomiarowe zamocowane liniowo na dwóch metalowych listwach dociskanych teleskopowo do powierzchni muru, po 16 elektrod na każdej (Rys. 16). Użycie do budowy elektrod materiałów takich jak elastyczny silikon przewodzący prąd, czy gąbka amortyzująca umożliwiły dobry powietrzny kontakt elektrod z nierówną powierzchnią badanego muru umożliwiając tym samym niezakłócony przepływ przez nie prądu elektrycznego. Elektrody są podłączone do modułu cyfrowego realizującego odczyt danych i ich transmisję do modułu sterującego. Moduł sterujący zapewnia natomiast konfigurację urządzenia, realizację cyklu pomiarowego, wstępne przetwarzanie danych pomiarowych oraz komunikację z komputerowym systemem akwizycji i wizualizacji danych. Urządzenie posiada

pamięć, w której zapisuje wyniki pomiarów. Może również przysyłać je w czasie rzeczywistym do serwera bazy danych za pośrednictwem sieci Ethernet, co umożliwia współpracę z systemami Big Data, które wykonują analizy w czasie rzeczywistym. Drugą część systemu stanowi oprogramowanie do rekonstrukcji obrazu oparte o metody algorytmiczne. Wynikiem rekonstrukcji jest trójwymiarowy obraz muru z zaznaczonymi różnicami w przewodności elektrycznej.

Opis budowy tomografu i sposobu jego działania został zamieszczony w artykułach naukowych [A8], [A10] i [A12], których jestem współautorką wraz z członkami interdyscyplinarnego zespołu badawczego z ww. jednostek naukowych. Natomiast na rysunku 32 przedstawiono przykładowo stanowisko badawcze z systemem pomiarowym, za [A12] oraz przykładowe widoki zrekonstruowanych obrazów wilgotności muru, za [A7] i [A10].



**Rysunek 32.** Przenośny tomograf hybrydowy do identyfikacji przestrzennego obrazowania wilgotności wewnątrz muru: (a) rysunek poglądowy tomografu i (b) widok tomografu na stanowisku badawczym, za [A12], (c-d) przykładowe widoki zrekonstruowanego obrazu wilgotności muru z zaznaczonymi różnicami w przewodności elektrycznej, za [A7] i [A10]

Wykonane przeze mnie prace badawcze polegały m.in. na zaprojektowaniu i wykonaniu w laboratorium Wydziału Budownictwa Lądowego i Wodnego Politechniki Wrocławskiej modelowych murów ceglanych, opracowaniu programu badań wilgotności tych murów uwzględniającego różne warianty zawilgocenia, przygotowaniu stanowisk badawczych w dwóch wytypowanych budynkach zabytkowych oraz na wykonaniu badań wilgotności kilkoma metodami. Prace te, wykonane w ramach ww. projektu badawczego, były podstawą testowania prototypu tomografu najpierw w warunkach laboratoryjnych, a następnie in situ, w celu optymalizacji doboru podzespołów, konstrukcji i sposobu mocowania elektrod pomiarowych oraz rozwiązań informatycznych zapewniających prawidłowe działanie urządzenia.

Po zakończeniu projektu, to jest od roku 2019 do 2023, system pomiarowy był udoskonalany poprzez walidację oprogramowania do interpretacji wyników pomiarów, to znaczy różnych metod algorytmicznych tworzenia przestrzennego obrazu wilgotności w murze. Celem tych prac było wskazanie metod najwierniej odwzorowujących dane walidacyjne. Do walidacji wykorzystane zostały zbudowane przeze mnie zbiory danych, będące rezultatem badań wilgotności in situ murów ceglanych w sześciu różnych budynkach zabytkowych. Wyniki walidacji



wraz z ich analizą zostały opublikowane w latach 2020-2023 w czasopismach z listy *JCR* (pozycje [A6–A8], [A10], [A12] i 18 w pkt. 2.4 Załącznika 5). Natomiast w Tabeli 19 Autoreferatu zestawiałam te metody algorytmiczne, które najwierniej odwzorowały dane walidacyjne.

Docelowo przewidywane jest opracowanie kompaktowej wersji tomografu nadającej się do produkcji w wielu egzemplarzach i wykorzystywania w badaniach naukowych i w praktyce budowlanej przez innych badaczy.

##### **5. Informacja o wykazywaniu się istotną aktywnością naukową albo artystyczną realizowaną w więcej niż jednej uczelni, instytucji naukowej lub instytucji kultury, w szczególności zagranicznej**

Mogę wykazać się istotną aktywnością naukową realizowaną w więcej niż jednej uczelni, a mianowicie:

- w Politechnice Lubelskiej: z Wydziałem Budownictwa i Architektury; z Wydziałem Zarządzania; z Wydziałem Elektrotechniki i Informatyki,
- w Politechnice Łódzkiej z Wydziałem Budownictwa, Architektury i Inżynierii Środowiska,
- w Wyższej Szkole Ekonomii i Innowacji w Lublinie z Instytutem Informatyki i Innowacyjnych Technologii.

Z politechnikami Lubelską i Łódzką aktywnie współpracowałam w latach 2016–2018 jako wykonawczynie projektu badawczego pt. „Model oceny ryzyka wystąpienia katastrof budowlanych, wypadków i zdarzeń niebezpiecznych na stanowiskach pracy z wykorzystaniem rusztowań budowlanych” finansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju w ramach Programu Badań Stosowanych PBS3 na podstawie umowy nr PBS3/A2/19/2015. Współpraca ta obejmowała uczestnictwo w regularnych spotkaniach, seminariach i wizytach naukowych odbywających się na Wydziale Budownictwa i Architektury Politechniki Lubelskiej, na Wydziale Zarządzania Politechniki Lubelskiej oraz na Wydziale Budownictwa, Architektury i Inżynierii Środowiska Politechniki Łódzkiej, a także kontakty zdalne z realizującymi projekt pracownikami naukowymi ww. jednostek. Potwierdzeniem współpracy jest zaświadczenie podpisane przez kierownika projektu, prof. dr hab. Ewę Błazik-Borową z Wydziału Budownictwa i Architektury Politechniki Lubelskiej, zamieszczone w Załączniku 6. Wymiernym efektem tej współpracy jest współautorstwo: 3 raportów z badań (pozycje 3, 4, 8 w pkt. 3.5 Załącznika 5), 4 artykułów naukowych (pozycje 7, 8, 11, 13 w pkt. 2.4 Załącznika 5), 4 wystąpień na zagranicznych konferencjach naukowych (pozycje 3, 7, 8, 12 w pkt. 2.7 Załącznika 5).

Z Politechniką Lubelską oraz z Wyższą Szkołą Ekonomii i Innowacji w Lublinie aktywnie współpracowałam w latach 2016–2018 jako wykonawczynie projektu badawczego pt. „Tomograf hybrydowy do badania zawilgocenia i stanu budynków” współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego w ramach Programu Operacyjnego Inteligentny Rozwój, działanie 1.1. Projekty B+R przedsiębiorstw na podstawie umowy nr POIR.01.01.01-00-0167/15. Współpraca ta obejmowała uczestnictwo w spotkaniach naukowych z członkami zespołu realizującego projekt, odbywających się na Wydziałach Zarządzania oraz Elektrotechniki i





Informatyki Politechniki Lubelskiej i w Instytucie Informatyki i Innowacyjnych Technologii Wyższej Szkoły Ekonomii i Innowacji w Lublinie, a także kontakty zdalne. Potwierdzeniem współpracy jest zaświadczenie podpisane przez kierownika projektu, dra hab. inż. Tomasza Rymarczyka, prof. Wyższej Szkoły Ekonomii i Innowacji w Lublinie, zamieszczone w Załączniku 6, a jej udokumentowaniem jest raport z badań (pozycja 12 w pkt. 3.5 Załącznika 5). Po roku 2018 współpraca z ww. jednostkami naukowymi trwa nadal, a jej wynikiem jest 6 współautorskich artykułów naukowych (pozycje [A6], [A7], [A8], [A10], [A12] i 18 w pkt. 2.4 w Załączniku 5) opublikowanych w latach 2020-2023 w czasopismach z listy *JCR* i wysoko punktowanych przez MEiN (140 i 200 punktów), co zaświadcza o wysokiej wartości naukowej prowadzonych badań.

## **6. Informacja o osiągnięciach dydaktycznych, organizacyjnych oraz popularyzujących naukę lub sztukę**

### Osiągnięcia dydaktyczne

Zostałam powołana na promotorkę pomocniczą do opieki naukowej nad przygotowaniem rozprawy doktorskiej mgr inż. Natalii Szemiot ze Szkoły Doktorskiej Politechniki Wrocławskiej w dyscyplinie naukowej: inżynieria lądowa, geodezja i transport (patrz Załącznik 7). Promotorem głównym rozprawy jest prof. dr hab. inż. Łukasz Sadowski.

Prowadziłam i (lub) prowadzę zajęcia z kursów: *Rysunek techniczny* (ćwiczenia), *Rysunek techniczny* (projekt), *Podstawy projektowania architektonicznego* (seminarium), *Budownictwo ogólne I* (projekt) oraz *Komputerowe wspomaganie kreślenia* (laboratorium). Do ww. przedmiotów opracowałam własne materiały dydaktyczne, które na bieżąco aktualizowałam i udostępniałam studentom w trakcie zajęć zarówno w formie papierowej, jak i elektronicznej na portalu e-learningowym Politechniki Wrocławskiej. Byłam ponadto opiekunką w sumie 46 prac dyplomowych magisterskich (26) i inżynierskich (20).

Opracowałam karty przedmiotów do nowych kursów: *Rysunek techniczny i projektowanie architektoniczne* oraz *Projektowanie architektoniczne* na Wydziale Budownictwa Lądowego i Wodnego Politechniki Wrocławskiej, a także *Grafika inżynierska* na międzywydziałowej specjalności Inżynieria Materiałowa. Byłam ponadto odpowiedzialna za aktualizowanie treści kart przedmiotów z kursów: *Rysunek techniczny* (ćwiczenia), *Rysunek techniczny* (projekt) i *Podstawy projektowania architektonicznego* (seminarium), co kilkakrotnie zrobiłam.

Ukończyłam *Kurs Dydaktyczny Szkoły Wyższej* (2014 r.) dla pracowników naukowo-dydaktycznych i dydaktycznych Politechniki Wrocławskiej, mający na celu doskonalenie warsztatu dydaktycznego w zakresie planowania, organizowania i realizowania procesu kształcenia i wychowywania studentów.

Odbyłam szkolenie pt. „W świecie różnorodnych możliwości” (2021 r.) zorganizowane przez Politechnikę Wrocławską w ramach projektu „Politechnika nowych szans” współfinansowanego przez Unię Europejską, Europejski Fundusz Społeczny i Program Operacyjny Wiedza Edukacja Rozwój. Celem szkolenia było podniesienie kompetencji osób uczestniczących w edukacji na poziomie wyższym w zakresie funkcjonowania osób z niepełnosprawnościami. Będąc



absolwentką studiów magisterskich na kierunku architektura, a także studentką studiów magisterskich na kierunku psychologia na Uniwersytecie Humanistycznospołecznym SWPS we Wrocławiu mam świadomość trudności z jakimi borykają się osoby z różnego rodzaju niepełnosprawnościami, zarówno fizycznymi, jak i psychicznymi, wynikającymi m.in. z istnienia barier architektonicznych, czy braku świadomości społeczeństwa w zakresie ich funkcjonowania. Staram się uwrażliwiać studentów na powyższą problematykę m.in. poprzez formułowanie odnoszących się do niej tematów prac dyplomowych. Przykładami obronionych prac dyplomowych z tej tematyki, których byłam opiekunką są: „Projekt domu studenckiego dla osób ze szczególnymi potrzebami” – praca inż., „Projekt domu jednorodzinnego bez barier usytuowanego na skarpie” – praca inż., „Dostępność przestrzeni publicznych dla osób z niepełnosprawnościami” – praca mgr., „Modernizacja piętrowego domu jednorodzinnego na potrzeby osoby z niepełnosprawnością ruchową” – praca mgr.

Ukończyłam studia magisterskie na kierunku psychologia na Uniwersytecie Humanistycznospołecznym SWPS we Wrocławiu (uzyskałam absolutorium, a termin obrony pracy magisterskiej zaplanowany został na przełom października i listopada 2023 r.). Studia te wymagały to ode mnie dużo wysiłku, czasu i zaangażowania, co w pewnym stopniu ograniczyło moją dotychczasową aktywność organizacyjną. Jednak zdobyte w trakcie tych studiów umiejętności psychospołeczne i wiedzę z powodzeniem już wykorzystuję podczas prowadzenia zajęć dydaktycznych, prac dyplomowych i konsultacji ze studentami.

#### Osiągnięcia organizacyjne oraz popularyzujące naukę

Angażuję się na Wydziale Budownictwa Lądowego i Wodnego Politechniki Wrocławskiej w prace związane z remontami i aranżacją pomieszczeń w budynku Wydziału. Między innymi opracowałam koncepcję stanowisk badawczych w wybranych pomieszczeniach laboratoryjnych na użytek prowadzonych tam zajęć dydaktycznych, konsultowałam projekt wyposażenia meblowego ww. pomieszczeń, opracowałam koncepcję Galerii Dziekanów Wydziału Budownictwa Lądowego i Wodnego Politechniki Wrocławskiej zrealizowanej następnie w hallu budynku Wydziału oraz pocztu dziekanów w Sali Rady Wydziału.

Byłam członkinią Komitetu Organizacyjnego V Międzynarodowej Konferencji Naukowej „Trwałość i skuteczność napraw obiektów budowlanych”, TISNOB 2016, która w 2016 r. odbyła się we Wrocławiu, a której organizatorami były: Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska Politechniki Poznańskiej, Wydział Inżynierii Środowiska i Gospodarki Przestrzennej Uniwersytetu Przyrodniczego w Poznaniu, Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego Politechniki Wrocławskiej i Department of Civil Engineering Auburn University USA.

Pełniłam funkcję wiceprzewodniczącej Komitetu Organizacyjnego I Konferencji Naukowo-Technicznej „Aktualne problemy związane z zarządzaniem bezpieczeństwem i higieną pracy w budownictwie”, która odbyła się w 2022 r. we Wrocławiu, a której organizatorami były: Wydział Inżynierii Lądowej Politechniki Warszawskiej, Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego Politechniki Wrocławskiej, Okręgowy Inspektorat Pracy w Warszawie i Porozumienie dla





Bezpieczeństwa w Budownictwie. Podstawowym celem tej konferencji była popularyzacja osiągnięć naukowych wśród pracowników i kadry kierowniczej przedsiębiorstw budowlanych.

Pełnię funkcję sekretarza naukowej Komisji Naukowej II Konferencji Naukowo-Technicznej pod hasłem „Zarządzanie Bezpieczeństwem Pracy w Budownictwie”, która odbędzie się we Wrocławiu w październiku 2023 r., a której celem jest również popularyzacja osiągnięć naukowych wśród pracowników i kadry kierowniczej przedsiębiorstw budowlanych. Jej organizatorami są: Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego Politechniki Wrocławskiej, Ośrodek Szkolenia Państwowej Inspekcji Pracy we Wrocławiu, Wydział Inżynierii Lądowej Politechniki Warszawskiej i Wydział Inżynierii Lądowej Politechniki Krakowskiej.

Walory popularyzujące naukę mają również opublikowane przeze mnie w latach 2009–2023 autorskie i współautorskie artykuły w liczbie 13, w takich czasopismach naukowo-technicznych, jak *Materiały Budowlane* (11), *Izolacje* (1), *inżynieria i Budownictwo* (1) (patrz pkt 2.4 w Załączniku 5).

Byłam członkinią jury oceniającego prace konkursowe studenckie na projekt mini-domu. Konkurs zorganizowany został przez Wydział Architektury Politechniki Wrocławskiej w 2019 r.

**7. Oprócz kwestii wymienionych w pkt. 1-6, wnioskodawca może podać inne informacje, ważne z jego punktu widzenia, dotyczące jego kariery zawodowej**

*Dodatkowe obszary zainteresowań naukowych i badawczych*

Moje zainteresowania naukowo-badawcze po uzyskaniu stopnia naukowego doktora, poza tematyką przedstawioną w cyklu powiązanych tematycznie artykułów naukowych, były skoncentrowane na:

- a) diagnostyce elementów i konstrukcji w różnych obiektach budowlanych z wykorzystaniem metod nieniszczących i semi-nieniszczących. Wynikiem tych zainteresowań jest współautorstwo w opracowaniu: (1) metodyki kontroli procesu technologii wykonania posadzek z materiałów cementowych oraz (2) metodyki badania elementów kablobetonowych z wykorzystaniem komplementarnych metod nieniszczących. Mój dorobek naukowo-badawczy będący wynikiem działań w obszarze tej tematyki obejmuje współautorstwo: 4 raportów z badań (pozycje 5, 15, 19, 24 w pkt. 3.5 Załącznika 5), 4 artykułów naukowych, w tym 2 w czasopismach z listy *JCR* (pozycje 12, 15, 16, 19 w pkt. 2.4 Załącznika 5), 4 wystąpień na krajowych (2) i zagranicznych (2) konferencjach naukowych (pozycje 6, 10, 11, 13 w pkt. 2.7 Załącznika 5).
- b) badaniach i analizach przyczyn wypadkowości w polskim budownictwie, w szczególności tej związanej z pracą na rusztowaniach, w tym opracowanie metodyki klasyfikacji przyczyn wypadków przy pracy na rusztowaniach budowlanych. Mój dorobek naukowy poświęcony tej tematyce obejmuje współautorstwo: 3 raportów z badań (pozycje 3, 4, 8 w pkt. 3.5 Załącznika 5), 4 artykułów naukowych, w tym 1 w czasopiśmie z listy *JCR* (pozycje 7, 8, 11, 13 w pkt. 2.4 Załącznika 5), 4 wystąpień na zagranicznych konferencjach naukowych



(pozycje 3, 7, 8, 12 w pkt. 2.7 Załącznika 5). Jest on efektem realizacji projektu badawczego pt. „Model oceny ryzyka wystąpienia katastrof budowlanych, wypadków i zdarzeń niebezpiecznych na stanowiskach pracy z wykorzystaniem rusztowań budowlanych” finansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju w ramach Programu Badań Stosowanych PBS3 na podstawie umowy nr PBS3/A2/19/2015, którego byłam wykonawczynią.

#### *Uczestnictwo w pracach zespołów badawczych realizujących projekty badawcze*

Byłam **główną wykonawczynią** w projekcie badawczym promotorskim pt. „Wystawy i ekspozycje ogrodnicze we Wrocławiu” finansowanym ze środków Narodowego Centrum Nauki (umowa nr 2336/B/T02/2010/39), zrealizowanym w latach 2010 – 2013.

Byłam **wykonawczynią** w projekcie badawczym pt. „Model oceny ryzyka wystąpienia katastrof budowlanych, wypadków i zdarzeń niebezpiecznych na stanowiskach pracy z wykorzystaniem rusztowań budowlanych” finansowanym przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju (umowa nr PBS3/A2/19/2015), zrealizowanym w latach 2016 – 2018.

Byłam **wykonawczynią** w projekcie badawczym pt. „Tomograf hybrydowy do badania zawilgocenia i stanu budynku” współfinansowanym ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego w ramach Programu Operacyjnego Inteligentny Rozwój, działanie 1.1. Projekty B+R przedsiębiorstw (umowa nr POIR.01.01.01-00-0167/15), zrealizowanym w latach 2016 – 2018.

#### *Członkostwo w organizacjach naukowych*

Zostałam powołana na **członkinię Komisji Budownictwa i Mechaniki Oddziału Polskiej Akademii Nauk** we Wrocławiu w kadencji 2023 – 2026 (patrz Załącznik 7).

#### *Recenzje artykułów w czasopismach naukowych*

W ramach współpracy z wydawcami czasopism naukowych opracowałam do tej pory **5 recenzji artykułów**: 1 dla wydawnictwa Elsevier (czasopismo *Construction & Building Materials*), 3 dla wydawnictwa MDPI (czasopisma *Atmosphere*, *Sensors*, *Sustainability*), 1 dla Oficyny Wydawniczej Uniwersytetu Zielonogórskiego (czasopismo *Civil and Environmental Engineering Reports*). Opracowałam również recenzję 1 referatu na konferencję International Scientific Conference People, Buildings and Environment 2012, Lednice, 7-9 listopada 2012, Czechy.

#### *Edytorstwo wydania specjalnego w czasopiśmie*

Byłam **edytorką wydania specjalnego** czasopisma *Applied Sciences*: "The Latest Scientific Problems Related to the Implementation and Diagnostics of Construction Objects", 2020 - 2021 r. (*Punktacja MEiN z 2019-2021: 100; Impact Factor w 2021: 02.838*).



### Współpraca z otoczeniem społecznym i gospodarczym

Jak to już wspomniałam w punkcie 4.2 niniejszego Autoreferatu, od roku 2016 do chwili obecnej **współpracuję z Centrum Badawczo-Rozwojowym NETRIX S.A. w Lublinie**. W latach 2016–2018 współpraca ta była związana z realizacją projektu badawczego „Tomograf hybrydowy do badania zawilgocenia i stanu budynków”, czego efektem jest opracowanie systemu pomiarowego służącego do przestrzennego obrazowania wilgotności w murach, w postaci prototypowego przenośnego hybrydowego tomografu elektrycznego, a potwierdzeniem tego jest raport z badań (pozycja 12 w pkt. 3.5 niniejszego Załącznika 5). Po zakończeniu projektu, to jest od roku 2019, współpraca ta jest kontynuowana celem udoskonalania systemu pomiarowego w zakresie doboru metod algorytmicznych tworzenia przestrzennego obrazu wilgotności, a jej efekty zostały opublikowane w 6 artykułach naukowych w czasopismach z listy JCR (pozycje [A6], [A7], [A8], [A10], [A12] i 18 w pkt. 2.4 Załącznika 5).

Brałam czynny **udział w pracach zespołów eksperckich** wykonujących **opracowania naukowo-badawcze w tym ekspertyzy**. Jestem współautorką w sumie **26** takich opracowań wykonanych na zamówienie instytucji zewnętrznych, co dokumentują raporty badawcze wyszczególnione w punkcie 3.5. Załącznika 5.

### Doświadczenie w zakresie projektowania architektonicznego

Posiadam **kilkuletnie doświadczenie w zakresie projektowania architektonicznego** budynków o różnym przeznaczeniu i funkcji nabyte w latach 2006 – 2012 w ramach pracy na stanowisku asystenta projektanta w Pracowni Architektury i Obsługi Inwestycyjnej „KWADRAT” we Wrocławiu. W analogicznym zakresie współpracowałam także z uprawnionymi architektami: mgr inż. arch. Anną Rukasz, mgr inż. arch. Anną Sokół i dr inż. arch. Pawłem Szkodą. Jestem autorką i współautorką w sumie 17 projektów architektoniczno-budowlanych, budowlanych, wykonawczych i koncepcyjnych wyszczególnionych w pkt 2.5 Załącznika 5.

### Udział w kursach i szkoleniach

Poszerzam swoją wiedzę zarówno w obszarze dydaktyki, kompetencji społecznych, jak i zainteresowań naukowych. Jak już wspomniałam w punkcie 6 Autoreferatu, odbyłam Kurs Dydaktyczny Szkoły Wyższej (2014 r.) mający na celu doskonalenie warsztatu dydaktycznego, oraz szkolenie pt. „W świecie różnorodnych możliwości” (2021 r.), którego celem było podniesienie kompetencji osób uczestniczących w edukacji na poziomie wyższym w zakresie funkcjonowania osób z niepełnosprawnościami.

Uczestniczyłam ponadto w szkoleniach podnoszących mój warsztat naukowy oraz poszerzających zainteresowania naukowe. Ukończyłam szkolenie zorganizowane przez firmę StatSoft Polska pt. „Statistica kurs podstawowy” (2022 r.). Uczestniczyłam również w AI Day@WroclawTech 2023 zorganizowanym na Politechnice Wrocławskiej, którego celem było zwrócenie uwagi środowiska naukowego na możliwości i zagrożenia płynące z zastosowania sztucznej inteligencji. Były to wykłady i prezentacje na temat prowadzonych na Politechnice



Wrocławskiej badań z wykorzystaniem sztucznej inteligencji, panel dyskusyjny z udziałem ekspertów, a także wykład światowej klasy specjalisty z zakresu rozwoju i wdrażania sztucznej inteligencji, prof. Nitesha Chawli z Uniwersytetu Notre Dame w USA, pt. „Data, AI & Society: The Journey from Innovation to Translational Impact”.

#### Nagrody i wyróżnienia

Zostałam uhonorowana **czterema nagrodami Rektora Politechniki Wrocławskiej** za wyróżniający wkład w działalność uczelni za lata 2016, 2019, 2020 i 2022.

Jestem **beneficjentką uczelnianego programu Primus** dla autorów publikacji w najlepszych czasopismach lub wydawnictwach naukowych:

- Primus (Działanie 2) za lata 2020, 2021, 2022 – za znaczącą aktywność naukową,
- Primus (Działanie 1) za lata 2022 i 2023 – za autorstwo artykułów opublikowanych w najwyższej sklasyfikowanych w wykazie MNiSW czasopismach i konferencjach (200 pkt).

#### Dorobek naukowy w dyscyplinie architektura i urbanistyka

Posiadam **dorobek naukowy w dyscyplinie architektura i urbanistyka**, na który składa się w sumie 13 pozycji wyszczególnionych w pkt 6 Załącznika 5, w tym: 2 raporty badawcze, 1 artykuł naukowo-techniczny, 1 referat konferencyjny oraz 9 haseł w publikacji zbiorowej pt. „Leksykon zieleni Wrocławia”, sfinansowanej przez Miasto Wrocław i wydanej przez Wydawnictwo Via Nova we Wrocławiu w 2013 r. Publikację tą dwukrotnie nagrodzono w 2014 r. podczas XX Wrocławskich Targów Książki Naukowej m.in. za najlepszą książkę promującą region Dolnego Śląska.

(podpis wnioskodawczyni)