

Autoreferat

**o osiągnięciach w działalności naukowo-badawczej,
dydaktycznej i organizacyjnej**

Spis treści

1. Imię i nazwisko.....	3
2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe lub artystyczne – z podaniem podmiotu nadającego stopień, roku ich uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej.....	3
3. Informacja o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych lub artystycznych	3
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.).....	4
5. Informacja o wykazywaniu się istotną aktywnością naukową albo artystyczną realizowaną w więcej niż jednej uczelni, instytucji naukowej lub instytucji kultury, w szczególności zagranicznej.....	50
6. Informacja o osiągnięciach dydaktycznych, organizacyjnych oraz popularyzujących naukę lub sztukę.....	53
7. Oprócz kwestii wymienionych w pkt. 1-6, wnioskodawca może podać inne informacje, ważne z jego punktu widzenia, dotyczące jego kariery zawodowej.....	54

1. Imię i nazwisko

Kamil Pochwat

ORCID: 0000-0003-3190-9551

Scopus: 57194048108

Web of Science: T-5022-2018

PBN-ID: 5e7092d0878c28a04739d546

2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe lub artystyczne – z podaniem podmiotu nadającego stopień, roku ich uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej**Doktorat 28.10.2015 r.**

Politechnika Rzeszowska im. Ignacego Łukasiewicza, Wydział Budownictwa, Inżynierii Środowiska i Architektury

doktor nauk technicznych

Dyscyplina: inżynieria środowiska

Specjalność: wodociągi i kanalizacja

Rozprawa doktorska pt. *Retencja wód opadowych w małych zlewniach miejskich*

Promotor: prof. dr hab. inż. Daniel Słyś,

Recenzenci: prof. dr hab. inż. Janusz Jeżowiecki,

prof. dr hab. inż. Maciej Maciejewski

Studia 25.06.2021 r.**podyplomowe** Politechnika Rzeszowska im. Ignacego Łukasiewicza, Wydział Budownictwa, Inżynierii Środowiska i ArchitekturyStudia podyplomowe: *Technologia BIM w projektowaniu i realizacji inwestycji budowlanych***Studia 15.06.2011 r.**

Politechnika Rzeszowska im. Ignacego Łukasiewicza, Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska

magister inżynier inżynierii środowiska (studia jednolite)

Kierunek: inżynieria środowiska

Specjalność: inżynieria komunalna

Praca magisterska pt. *Projekt techniczny wariantowych rozwiązań zbiornika retencyjnego uśredniającego dopływ do oczyszczalni ścieków*

Promotor: prof. dr hab. inż. Józef Dziopak,

Recenzent: prof. dr hab. inż. Barbara Tchórzewska-Cieślak

3. Informacja o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych lub artystycznych03.12.2024 – Członek komitetu sterującego Rządowym Programem Strategicznym
obecnie Hydrostrateg *Innowacje dla gospodarki wodnej żeglugi śródlądowej*01.10.2018 – Adiunkt w Katedrze Infrastruktury i Gospodarki Wodnej Politechniki
obecnie Rzeszowskiej

- 04.03.2016 – Zatrudnienie w Wyższej Szkole Inżynieryjno-Ekonomicznej z siedzibą
07.07.2017 w Rzeszowie
19.09.2011 – Asystent w Katedrze Infrastruktury i Ekorozwoju Politechniki
30.09.2018 Rzeszowskiej.

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.)

4.1. Dziedzina i dyscyplina

📖 **Dziedzina** Nauki inżynieryjno-techniczne

📖 **Dyscyplina** Inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka

4.2. Osiągnięcia naukowe

4.2.1. Tytuły osiągnięć oraz wykazy publikacji naukowych i rozwiązań konstrukcyjnych

Jako osiągnięcia naukowe, wynikające z 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.), stanowiące wkład w rozwój dyscypliny naukowej *Inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka* oraz podstawę do ubiegania się o uzyskanie stopnia naukowego doktora habilitowanego, wskazuję trzy osiągnięcia:

Osiągnięcie I - Retencja wymuszona i sterowanie przepływem w nowoczesnych systemach odwodnieniowych

Cykl 6 publikacji naukowych pod wspólnym tytułem ***Retencja wymuszona i sterowanie przepływem w nowoczesnych systemach odwodnieniowych***. Osiągnięcie obejmuje badania nad opracowaniem koncepcji retencji wymuszonej (**Załącznik 4, kod: [C_A6]**), rozwój procedury oceny efektywności struktur retencyjnych (**Załącznik 4, kod: [C_A2, C_A3, C_A4]**) oraz integrację zdecentralizowanych obiektów retencyjnych funkcjonujących w ramach retencji wymuszonej z siecią odwodnieniową z wykorzystaniem technik cyfrowych i modelu dzierżawy potencjału retencyjnego (**Załącznik 4, kod: [C_A5, C_A1]**).

[C_A1] **Pochwat K.** (2025). Digital upgrade of drainage detention devices for forced retention. *Journal of Environmental Management*, 373, Article 123840. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.123840>

- Liczba punktów MNiSW: 200
- Impact factor: **8.4** (IF₂₀₂₄), **8.6** (IF_{5letni})
- CiteScore₂₀₂₄: 14.4
- Opis wkładu własnego: samodzielna realizacja pełnego cyklu badawczego: w tym przegląd literatury, ustalenie założeń oraz dobór metodyki badań, projektowanie i realizacja sformułowanie zadań naukowych, analiza i interpretacja wyników, przygotowanie manuskryptu do publikacji, redakcja wraz z korektą tekstu, a także pozyskanie finansowania badań.

[C_A2] **Pochwat K.** (2024). Assessment of forced retention efficiency in stormwater drainage systems. *Journal of Environmental Management*, 370, Article 122886.

- Liczba punktów MNiSW: 200
- Impact factor: **8.4** (IF₂₀₂₄), **8.6** (IF_{5letni})
- CiteScore₂₀₂₄: 14.4

- *Opis wkładu własnego*: samodzielna realizacja pełnego cyklu badawczego: w tym przegląd literatury, ustalenie założeń oraz dobór metodyki badań, projektowanie i realizacja sformułowanie zadań naukowych, analiza i interpretacja wyników, przygotowanie manuskryptu do publikacji, redakcja wraz z korektą tekstu, a także pozyskanie finansowania badań.

[C_A3] **Pochwat K.** (2025). Assessment method for the hydraulic efficiency of urban drainage system components. *Journal of Hydrology*, 655, Article 132975. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2025.132975>

- *Liczba punktów MNiSW*: 140
- *Impact factor*: **6.3** (IF₂₀₂₄), **6.9** (IF_{5letni})
- *CiteScore₂₀₂₄*: 11.1
- *Opis wkładu własnego*: samodzielna realizacja pełnego cyklu badawczego: w tym przegląd literatury, ustalenie założeń oraz dobór metodyki badań, projektowanie i realizacja sformułowanie zadań naukowych, analiza i interpretacja wyników, przygotowanie manuskryptu do publikacji, redakcja wraz z korektą tekstu, a także pozyskanie finansowania badań.

[C_A4] **Pochwat K.** (2022). Assessment of Rainwater Retention Efficiency in Urban Drainage Systems-Model Studies. *Resources*, 11(2), Article 14. <https://doi.org/10.3390/resources11020014>

- *Liczba punktów MNiSW*: 100
- *Impact factor*: **3.3** (IF₂₀₂₂), **3.8** (IF_{5letni})
- *CiteScore₂₀₂₂*: 7.7
- *Opis wkładu własnego*: samodzielna realizacja pełnego cyklu badawczego: w tym przegląd literatury, ustalenie założeń oraz dobór metodyki badań, projektowanie i realizacja sformułowanie zadań naukowych, analiza i interpretacja wyników, przygotowanie manuskryptu do publikacji, redakcja wraz z korektą tekstu, a także pozyskanie finansowania badań.

[C_A5] **Pochwat K., & Pizzo H.** (2022). Analysis of the Hydraulic Efficiency of a Steerable Detention Tank—Simulation Studies. *Hydrology*, 9(12), Article 217. <https://doi.org/10.3390/hydrology9120217>

- *Liczba punktów MNiSW*: 20
- *Impact factor*: **3.2** (IF₂₀₂₂), **3.1** (IF_{5letni})
- *CiteScore₂₀₂₂*: 4.1
 - *Opis wkładu własnego*: kwerenda bibliograficzna, conceptualizacja założeń i metodologii pracy, gromadzenie i opracowanie danych, prowadzenie badań, analiza wyników, interpretacja wyników badań naukowych do publikacji, przygotowanie manuskryptu, recenzja i korekta ostatecznej wersji manuskryptu, pozyskanie finansowania.

[C_A6] **Pochwat K.** (2017). Hydraulic analysis of functioning of the drainage channel with increased retention capacity. In *E3S web of conferences* (Vol. 17, p. 00075). EDP Sciences.

- *Liczba punktów MNiSW*: 15

- *Impact factor*: - (IF₂₀₁₇), - (IF_{5letni})
- *CiteScore*₂₀₁₇: 0.2
- *Opis wkładu własnego*: samodzielna realizacja pełnego cyklu badawczego: w tym przegląd literatury, ustalenie założeń oraz dobór metodyki badań, projektowanie i realizacja sformułowanie zadań naukowych, analiza i interpretacja wyników, przygotowanie manuskryptu do publikacji, redakcja wraz z korektą tekstu, a także pozyskanie finansowania badań.

☞ *Sumaryczny Impact Factor w roku publikacji*

- IF – 29.6

☞ *Liczba punktów MNiSW*

- 675

Osiągnięcie II - Rozwój teorii i udoskonalenie rozwiązań retencyjnych dla miejskich systemów odwodnienia w oparciu o retencję wymuszoną

Zestaw trzech innowacyjnych rozwiązań inżynierskich pod wspólnym tytułem ***Rozwój teorii i udoskonalenie rozwiązań retencyjnych dla miejskich systemów odwodnienia w oparciu o retencję wymuszoną***. Osiągnięcie obejmuje opracowanie trzech powiązanych tematycznie innowacyjnych modeli hydraulicznych funkcjonowania zbiorników retencyjnych:

[T1] Opracowanie rozwiązania zbiornika wód deszczowych lub/i ogólnospławnych wraz z modelem hydraulicznym jego działania, które uzyskało ochronę patentową w UPRP. Prototypy tego zbiornika wykonano w ramach projektu Miniatura 4 (**Załącznik 4, kod: [PB4]**), a końcowe efekty prac zostały przedstawione w dokumentacji patentowej:

[PAT_A1] **Pochwat, K., Dziopak, J., Słyś D.** *Zbiornik retencyjny ścieków deszczowych i ogólnospławnych*. Patent nr 233981. Data: 03.12.2019 r.

Opis wkładu własnego. Przedmiotowe rozwiązanie opracowałem samodzielnie na poziomach gotowości technologicznej (TRL) 1–2, w zakresie identyfikacji faz napełniania i opróżniania wraz ze sformułowaniem modeli hydraulicznych jego funkcjonowania. Prace na etapie TRL 2–3 obejmującym pogłębione studia analityczne wraz z metodyką projektowania innowacyjnego zbiornika w systemie odwodnieniowym były realizowane przy współudziale profesorów Daniela Słyśa i Józefa Dziopaka w zakresie konsultacji merytorycznych i wspólnej redakcji opisu patentowego. Podniesienie poziomu gotowości technologicznej z TRL 3 do TRL 4 miało miejsce przy realizacji projektu Miniatura 4 (NCN 2020/04/X/ST8/00450), w ramach którego wykonałem samodzielnie kompleksowe badania weryfikujące modele hydrauliczne w warunkach laboratoryjnych w celu potwierdzenia funkcjonalności i możliwość praktycznej implementacji przedmiotowego zbiornika retencyjnego do zadań projektowych.

Mój wkład obejmował również: sformułowanie założeń i metodyki wymiarowania, opracowanie zadań naukowych i prowadzenie badań, analizę i interpretację wyników, przygotowanie opisu zgłoszenia patentowego oraz pozyskanie finansowania badań.

[T2] Opracowanie technologii inteligentnego systemu zarządzania wodami opadowymi pt. *Inteligentny system sterowania indywidualną retencją wód deszczowych dla systemów kanalizacyjnych* funkcjonującego w ramach retencji wymuszonej wykorzystującego

technologię IoT zgodną ze standardem Przemysł 4.0. Efekty prac zostały przedstawione w dokumentacji patentowej:

[PAT_A2] Pochwat, K., Słyś, D., Piotrowska, B., Kida, M., Wosiek, M., Dubis, D.

Urządzenie do gromadzenia i odprowadzania wody deszczowej. Data wpływu dokumentu:
27.09.2022 r. Zgłoszenie patentowe P.442370

Opis wkładu własnego: Rozwiązanie przedmiotowego zbiornika retencyjnego opracowałem samodzielnie na etapie (TRL 1–2), który obejmował identyfikację podstawowych faz działania wraz ze sformułowaniem koncepcji jego funkcjonowania. Badania rozwijano w ramach projektu badawczego (N3_030, 28/PRZ/1/DG/PCI/2021), finansowanego przez Podkarpackie Centrum Innowacji, realizując podniesienie poziomu gotowości technologicznej od TRL 2 do TRL 4 (**Załącznik 4, kod: [PB2]**). Rozwiązanie to podniesiono także do piątego poziomu gotowości technologicznej (TRL 5) w ramach programu Mini Fundusz Rozwojowy, w projekcie pn. *Demonstrator systemu sterowania dla rozwiązania: Inteligentny system sterowania indywidualną retencją wód deszczowych dla systemów kanalizacyjnych* (**Załącznik 4, kod: [PB1]**). W ramach opracowanego rozwiązania wykonano zarówno prototyp, jak i demonstrator prezentowany na konferencjach (**Załącznik 4, kod: [WSG3 i WSG7]**).

Mój wkład na poziomach TRL 1-2 obejmował: przegląd literatury, pozyskanie finansowania badań, projektowanie i realizację badań laboratoryjnych oraz analizę i interpretację wyników. Mój udział w podniesieniu poziomu gotowości technologicznej z TRL 2 do 4 obejmował pozyskanie finansowania badań oraz pełen zakres prac projektowych i badawczo-rozwojowych. Samodzielnie opracowałem szczegółowe rozwiązania techniczne układu hydraulicznego akumulatora wód deszczowych oraz koncepcję mechanizmu umożliwiającego dzierżawę jego potencjału retencyjnego na potrzeby sieci odwodnieniowych. Byłem odpowiedzialny za złożenie prototypu z pozyskanych komponentów – akumulatora, układu sterowania i elementów sieci cyfrowej – wraz z instalacją czujników i integracją całego systemu. Przygotowałem również szczegółowe wytyczne i zakres analiz ekonomicznych oraz modelowania hydrodynamicznego. Współuczestniczyłem w budowie modeli systemów odwodnieniowych o zróżnicowanych parametrach hydraulicznych, które uwzględniały projektowane rozwiązanie. W ramach prac laboratoryjnych prowadziłem badania sprawności systemu sterowania i efektywności hydraulicznej prototypu, dokonałem analizy wyników eksperymentów oraz określiłem kierunki dalszych modyfikacji na podstawie wyników prac B+R. Przygotowałem dokumentację zgłoszenia patentowego we współpracy z Prof. Danielem Słyśem, dr inż. Beatą Piotrowską i dr. Damianem Dubisem, a także opracowałem algorytmy opisujące działanie systemu sterowania w badanych wariantach. Natomiast mój udział w podniesieniu poziomu gotowości technologicznej z TRL 4 do 5 obejmował wykonanie demonstratora wraz z przeprowadzeniem odpowiednich analiz hydraulicznych.

[T3] Opracowanie rozwiązania zbiornika grawitacyjno-pompowego, wykorzystującego w swoim działaniu retencję wymuszoną, który uzyskał ochronę patentową w UPRP. Efekty prac zostały przedstawione w dokumentacji patentowej:

[PAT_A3] Pochwat K., Słyś D., Piotrowska B. Zbiornik grawitacyjno-pompowy. Patent nr 246822. Data: 11.03.2025 r.

Opis wkładu własnego: Prace badawczo-rozwojowe nad rozwiązaniem na poziomach TRL 1–3 stanowiły moją samodzielną pracę, a samo rozwiązanie było dodatkowym efektem realizacji projektu Miniatura 4 (**Załącznik 4, kod: [PB4]**). Podniesienie poziomu gotowości technologicznej z TRL 3 do 4 odbyło się we współpracy z Prof. Danielem Słysiem, natomiast z poziomu 4 do 5 – z dr inż. Beatą Piotrowską. Zakres prac na tych etapach obejmował sformułowanie założeń i metodologii prowadzenia badań, projektowanie stanowisk badawczych, analizę i interpretację wyników oraz wykonanie badań laboratoryjnych.

Badania umożliwiające podniesienie poziomu TRL były realizowane w ramach projektu Via Express do Sukcesu (**Załącznik 4, kod: [PB_A4]**), prowadzonego jako zadanie zlecone przez Ministra Edukacji i Nauki *pn. Politechniczna Sieć VIA CARPATIA im. Prezydenta RP Lecha Kaczyńskiego* (umowa nr MEiN 2022/DPI/2578 z dnia 26.10.2022 r., działanie 9), dotyczącego projektu *Badania prototypu kanalizacyjnego zbiornika grawitacyjno-pompowego dla wód deszczowych w warunkach zbliżonych do rzeczywistych wraz z opracowaniem dedykowanego systemu sterowania*. Mój wkład na tym etapie obejmował pozyskanie finansowania badań, pełnienie roli lidera zespołu badawczego i głównego wykonawcy projektu, odpowiedzialność za projektowanie i budowę prototypu, opracowanie algorytmu sterowania oraz prowadzenie analiz hydraulicznych w warunkach symulujących warunki rzeczywiste.

Osiągnięcie III - Zastosowanie uczenia maszynowego w modelowaniu wymywania zanieczyszczeń z mikroplastików i ocenie efektywności ściekowych wymienników ciepła

Cykl 3 publikacji naukowych pod wspólnym tytułem *Zastosowanie uczenia maszynowego w modelowaniu wymywania zanieczyszczeń z mikroplastików i ocenie efektywności ściekowych wymienników ciepła*. Osiągnięcie obejmuje badania nad modelowaniem procesów środowiskowych. Szczegółowej analizie poddano możliwości zastosowania metod uczenia maszynowego do modelowania procesów wymywania zanieczyszczeń z mikroplastików (**Załącznik 4, kod: [C_B1]**) wraz z weryfikacją uzyskanych wyników w odniesieniu do klasycznych metod opartych na funkcjach aproksymujących (**Załącznik 4, kod: [C_B2]**). Analogiczne badania przeprowadzono w celu oceny zasadności wykorzystania uczenia maszynowego do modelowania efektywności wymiany ciepła w ściekowych wymiennikach ciepła oraz porównania tych wyników z wynikami uzyskanymi za pomocą analizy regresji (**Załącznik 4, kod: [C_B3]**).

[CB_1] Kida, M., Ziembowicz, S., Pochwat, K., & Koszelnik, P. (2022). Experimental and computational hazard prediction associated with reuse of recycled car tire material. *Journal of Hazardous Materials*, 438, 129489

- Liczba punktów MNiSW: 200
- Impact factor: 13.6 (IF₂₀₂₂), 12.7 (IF_{5letni})
- CiteScore₂₀₂₂: 20.2
- Opis wkładu własnego: projektowanie i prowadzenie badań w zakresie opracowania predykcyjnych modeli sztucznych sieci neuronowych (ANN), dobór i zastosowanie odpowiedniego oprogramowania, analiza i interpretacja wyników związanych z ANN, opracowanie danych, przygotowanie oryginalnej wersji manuskryptu do publikacji, redakcja i korekta tekstu.

[CB_2] Kida, M., Musiał, M., **Pochwat, K.**, Ziembowicz, S., Koszelnik, P., Strojny, W., Pizzo H., & Bodog, M. (2024). Modeling of microplastics degradation in aquatic environments using an experimental plan. *Journal of Hazardous Materials*, 471, 134396.

- Liczba punktów MNiSW: 200
- Impact factor: **11.3** (IF₂₀₂₄), **12.4** (IF_{5letni})
- CiteScore₂₀₂₄: 24.6
- Opis wkładu własnego: projektowanie i prowadzenie badań w zakresie modelowania oraz opracowania funkcji aproksymacyjnych dla DEHP, analiza wyników (DEHP), dobór odpowiedniego oprogramowania i analiza wyników (DEHP), przygotowanie manuskryptu do publikacji, redakcja i korekta tekstu.

[CB_3] Stec, A., & **Pochwat, K.** (2025) Assessment of the efficiency of shower wastewater heat exchangers using machine learning-based methods. *Journal of Building Engineering*, 103, 112062

- Liczba punktów MNiSW: 140
- Impact factor: **7.4** (IF₂₀₂₄), **7.5** (IF_{5letni})
- CiteScore₂₀₂₄: 11.5
- Opis wkładu własnego: sformułowanie założeń i metodologii modelowania z wykorzystaniem ANN oraz opracowania równań aproksymacyjnych, projektowanie i prowadzenie badań w zakresie analizy danych i budowy modeli predykcyjnych, analiza i interpretacja wyników, przygotowanie manuskryptu do publikacji w częściach dotyczących analizy regresji oraz ANN.

☞ *Sumaryczny Impact Factor w roku publikacji*

- IF – 32,3

☞ *Liczba punktów MNiSW*

- 540

Kopie publikacji i dokumentacji patentowej wchodzących w skład osiągnięć naukowych zamieszczono w **Załącznikach 5a, 5b i 5c**. Oświadczenia współautorów publikacji zaliczonych do osiągnięcia naukowego wraz z określeniem indywidualnego wkładu w ich powstanie zawiera **Załącznik 6**. Kopie potwierdzające realizację grantów badawczych i projektów przedstawiono w **Załączniku 5e**.

4.3. Omówienie celu naukowego ww. prac i osiągniętych wyników - Osiągnięcie I

4.3.1. Wprowadzenie i uzasadnienie prowadzonych badań

Skala globalna i lokalna problemu

Współczesne miasta na całym świecie wymagają opracowania skutecznych koncepcji projektowych w ujęciu systemowym aby dokonać adaptacji eksploatowanych systemów odwodnieniowych do nowych wymagań, wynikających z postępującej ich urbanizacji i innych uwarunkowań przyrodniczych. Zbyt intensywna i nieodpowiednio zaplanowana urbanizacja zlewni miejskich polegająca na zastępowaniu terenów biologicznie czynnych budynkami i powierzchniami nieprzepuszczalnymi znacząco ogranicza zdolność zlewni miejskich do zapewnienia retencji wód opadowych. Prowadzi to w konsekwencji do znacznego zwiększenia

splywu powierzchniowego i przeciążeń hydraulicznych działającej infrastruktury odwodnieniowej. Niewystarczająca efektywność miejskich systemów odwodnieniowych w połączeniu ze zwiększającą się częstotliwością występowania ekstremalnych zjawisk pogodowych często skutkuje, nawet wielokrotnie częstszym wylewaniem się wód i/lub ścieków z systemów deszczowych i ogólnospławnych, występowaniem lokalnych podtopień terenów miejskich, a także pogorszeniem się jakości wód trafiających do odbiorników. Zjawiska te mają charakter globalny i wymagają wdrażania skutecznych strategii zwiększania retencji wód opadowych w zlewniach zurbanizowanych jako elementu niezbędnego w celu ograniczenia ryzyka powodziowego, zwiększenia i ochrony zasobów, w tym zwłaszcza wód podziemnych. W Polsce, podobnie jak w wielu krajach europejskich, problem przeciążeń hydraulicznych systemów odwodnieniowych staje się coraz bardziej powszechny, zwłaszcza w dynamicznie rozwijających się aglomeracjach, gdzie istniejąca infrastruktura była projektowana w zupełnie innych realiach hydrologicznych, które znacznie odbiegają od stawianych obecnie wymagań technicznych. Takie uwarunkowania generują pilną potrzebę modernizacji i adaptacji istniejących systemów odwodnienia do nowych wymagań ich funkcjonowania. Nadrzędnym priorytetem jest tworzenie warunków zapewniających ograniczenie wielkości spływu wód opadowych kierowanych do systemów odwodnieniowych. Zwłaszcza poprzez zwiększenie udziału rozwiązań technicznych zapewniających zatrzymanie ich części na trasie spływu powierzchniowego i znaczne zwiększenie poziomu retencji wody w zlewni.

Bariery techniczne i przestrzenne

Zarządzanie wodami opadowymi w zlewniach zurbanizowanych staje się obecnie jednym z najbardziej złożonych wyzwań w szeroko rozumianej inżynierii środowiska. Oprócz intensyfikacji ekstremalnych zdarzeń opadowych, kluczowym problemem staje się sposób zagospodarowania przestrzennego. Szczególnie niekorzystny jest niekontrolowany rozwój urbanistyczny miast i osiedli, pozbawiony właściwej analizy potrzeb, jak i problemów istotnych do rozwiązania. Ważną kwestią jest też określenie realnych możliwości systemów odwodnieniowych w tym możliwych do zaimplementowania zintegrowanych rozwiązań gospodarki wodnej. Dodatkowo, w gęsto zabudowanych częściach terenów zurbanizowanych brak jest dostępnej przestrzeni, która daje możliwość realizacji klasycznych rozwiązań retencyjnych, takich jak kanalizacyjne zbiorniki retencyjne czy systemy infiltracyjne. W rezultacie obserwuje się poważne zakłócenia w naturalnym obiegu wody w terenach zurbanizowanych, objawiające się coraz częstszym występowaniem susz i powodzi miejskich. W takich realiach rośnie znaczenie struktur zdecentralizowanych, takich jak sieć małych zbiorników retencyjnych rozproszonych w terenie zlewni, zbiorniki typu *on-site*, a także zbiorniki przydomowe, przystosowane do współpracy z siecią odwodnieniową. Duży potencjał przypisuje się również systemom funkcjonującym w ramach retencji wymuszonej, które mogą znacznie zwiększać efektywność retencji przy minimalnej ingerencji w istniejącą infrastrukturę.

Potrzeba integracji systemowej i cyfryzacji

Rozwój systemów odwodnieniowych wymaga równoległe modernizacji w oparciu o rzeczywiste dane o ich funkcjonowaniu i hydraulicznych warunkach przepływu. Nowoczesne podejścia projektowe w zakresie zarządzania wodami opadowymi w oparciu o kontrole w czasie rzeczywistym (RTC) powinno uwzględniać aktualne parametry hydrologiczne

w zlewni, analizę przepustowości hydraulicznej sieci oraz parametry techniczne obiektów infrastruktury odwodnieniowej. Wymaga to jednak opracowania i wdrożenia skalowalnych rozwiązań składających się z nierozdzielnej współpracy warstwy technicznej oraz dedykowanej warstwy cyfrowej tych urządzeń, odpowiednio dostosowanych do aktualnych potrzeb miast. Podejście to jest szczególnie pożądane do zastosowania w zlewniach o ograniczonej dostępności przestrzennej, gdzie klasyczne inwestycje są niemożliwe lub nieefektywne. Dodatkowo, opracowanie skutecznych systemów zarządzania wodami opadowymi zapewniającymi adaptację miejskich struktur odwodnieniowych do nowych warunków funkcjonowania wymaga coraz częściej wykorzystania zaawansowanych narzędzi cyfrowych – takich jak modelowanie hydrodynamiczne, systemy informacji przestrzennej (GIS), zintegrowane bazy danych czy technologie z zakresu Internetu Rzeczy (IoT). Rozwiązania te umożliwiają nie tylko bieżące monitorowanie sytuacji hydrologicznej i zarządzanie retencją w czasie rzeczywistym, ale także wspierają skuteczne długofalowe planowanie przestrzenne i inwestycyjne. Zintegrowane podejście oparte na danych i technologii odgrywa kluczową rolę w zwiększaniu odporności miast na skutki niewłaściwej działalności człowieka oraz w tworzeniu sprawiedliwych i zrównoważonych systemów odwodnieniowych. Takie podejście sprzyja także rozwojowi koncepcji inteligentnych miast (Smart City), w których zarządzanie infrastrukturą opiera się na danych i elastycznych mechanizmach integrujących zasoby rozproszone.

Znaczenie społeczno-środowiskowe

Brak odpowiedniego powiązania gospodarki wodami opadowymi z planowaniem przestrzennym z reguły skutkuje brakiem systemowej integracji rozproszonych rozwiązań retencyjnych z infrastrukturą publiczną. Dotychczasowe podejście urbanistyczne rzadko traktowało infrastrukturę retencyjną jako niezbędny element układu funkcjonalno-przestrzennego miasta, co w dłuższej perspektywie prowadziło do błędów planistycznych i zwiększało podatność obszarów miejskich na skutki intensywnych opadów. W konsekwencji niewydolność istniejących systemów odwodnieniowych prowadzi nie tylko do zagrożeń niewłaściwego funkcjonowania infrastruktury, ale również do poważnych konsekwencji społecznych i środowiskowych. Następuje niszczenie istniejącej infrastruktury komunalnej i prywatnego mienia, pogorszenie jakości wód powierzchniowych, spadek jakości życia mieszkańców oraz pogorszenie warunków sanitarnych. Jednym z elementów rozwiązania tego problemu może być wdrożenie nowoczesnych narzędzi, które pozwolą lepiej integrować gospodarkę wodami opadowymi z planowaniem przestrzennym i zarządzaniem miastem. W tym kontekście cyfryzacja gospodarki wodnej staje się kluczowa. Implementacja systemów RTC zintegrowanych z IoT może stanowić integralny element polityki inteligentnych miast, gdzie technologie cyfrowe wspierają zrównoważony rozwój. Takie rozwiązania nie tylko poprawiają funkcjonowanie infrastruktury technicznej, ale także umożliwiają dostęp do precyzyjnych danych o hydrologii, jakości wód opadowych oraz stanu odbiorników. Dzięki takim możliwościom, zarówno administracja, jak i obywatele, mogą podejmować bardziej racjonalne decyzje dotyczące zarządzania wodami. Ponadto, gromadzenie danych na poziomie miejskim stwarza możliwości dla badań naukowych i rozwoju nowych technologii, co w dłuższej perspektywie wpłynie na poprawę jakości życia mieszkańców i zrównoważony rozwój miast.

Potrzeba nowych modeli zarządzania i planowania

Nowym kierunkiem rozwoju w zakresie zarządzania gospodarką wodną jest także integracja technicznych rozwiązań z mechanizmami rynkowymi – np. poprzez dzierżawę pojemności retencyjnej od właścicieli prywatnych nieruchomości. Takie podejście umożliwia tworzenie nowych zasobów retencyjnych bez konieczności prowadzenia kosztownych inwestycji komunalnych. W warunkach niewystarczających systemowych źródeł finansowania oraz skomplikowanych procedur administracyjnych, wdrożenie proponowanego typu rozwiązań może stanowić realne wsparcie dla miejskich systemów odwodnienia i przyczynić się do upowszechnienia idei zrównoważonego zarządzania wodami opadowymi w zlewniach miejskich. Zarówno z perspektywy eksploatacyjnej, jak i planistycznej, konieczne jest także stworzenie uniwersalnych narzędzi wspomagających procesy opracowywania koncepcji i wyboru efektywnego rozwiązania inżynierskiego, stanowiących uzupełnienie dotychczas stosowanych i kosztownych procesów budowy modeli hydrodynamicznych miast – takich jak wskaźniki efektywności hydraulicznej oraz procedury porównawcze dla różnych wariantów technicznych. Pozwoli to lepiej dopasować rozwiązania do warunków lokalnych i zintensyfikować adaptację miejskiej infrastruktury odwodnieniowej do nowych warunków funkcjonowania.

Opisane wyzwania i ograniczenia uzasadniają potrzebę prowadzenia badań nad alternatywnymi rozwiązaniami retencyjnymi, dostosowanymi do współczesnych realiów przestrzennych, klimatycznych i instytucjonalnych. Nieodłącznym elementem tych działań jest opracowanie odpowiednich procedur oceny funkcjonowania tego typu obiektów, z wykorzystaniem zaawansowanych modeli predykcyjnych. Równocześnie pożądanym staje się wypracowanie nowego podejścia do zarządzania wodami opadowymi, opartego na mechanizmie dzierżawy potencjału retencyjnego oraz zastosowaniu sterowania w czasie rzeczywistym.

4.3.2 Cel badań

Przeprowadzone w ramach Osiągnięcia I prace badawcze zostały podzielone na trzy etapy, w których sformułowano określone cele badawcze:

Etap I - Opracowanie koncepcji funkcjonalno-hydraulicznej retencji wymuszonej w systemach odwodnieniowych

- ☞ Opracowanie koncepcji i układu hydraulicznego rozwiązania, w którym wody opadowe są okresowo magazynowane pod wymuszonym ciśnieniem – poprzez celowe piętrzenie bez użycia urządzeń pompowych – w ramach nowatorskiej koncepcji nazwanej retencją wymuszoną.
- ☞ Analiza funkcjonalno-hydrauliczna opracowanego rozwiązania w różnych fazach hydraulicznych jego działania.

Etap II – Rozwój procedury oceny efektywności struktur retencyjnych w zlewniach zurbanizowanych i analiza rozwiązań opartych na retencji wymuszonej

- ☞ Rozwój procedury oceny efektywności hydraulicznej urządzeń i obiektów retencyjnych – w tym retencji wymuszonej – opartej na wskaźniku czasu odporności hydraulicznej T_g , jako uzupełnienia klasycznego modelowania hydrodynamicznego.

- ▣ Opracowanie współczynników efektywności retencyjnej, umożliwiających ocenę skuteczności działania różnych typów obiektów retencyjnych w zróżnicowanych warunkach hydraulicznych, przy zastosowaniu ANNs.
- ▣ Przeprowadzenie analizy czułości modeli hydraulicznych rozwiązań retencyjnych z wykorzystaniem ANNs, w celu określenia, przy jakich wartościach parametrów hydrologicznych i hydraulicznych określony typ zbiornika retencyjnego osiąga największą efektywność.
- ▣ Przeprowadzenie porównawczej analizy efektywności retencji wymuszonej – realizowanej w różnych konfiguracjach hydraulicznych – z efektywnością tradycyjnych rozwiązań zbiornikowych na podstawie badań laboratoryjnych oraz symulacyjnych.
- ▣ Ocena hydraulicznych efektów integracji retencji decentralizowanej z rozwiązaniami tradycyjnymi w systemach odwodnieniowych na obszarach zurbanizowanych.

Etap III - Rozwój technik zarządzania wodami opadowymi bazujących na retencji wymuszonej i dzierżawa potencjału retencyjnego zdecentralizowanych struktur retencyjnych

- ▣ Opracowanie i ocena skuteczności zastosowania cyfryzacji oraz sterowania RTC w systemach retencji wymuszonej, z uwzględnieniem ich wpływu na poprawę efektywności hydraulicznej systemu odwodnieniowego.
- ▣ Badania zależności pomiędzy parametrami technicznymi i hydraulicznymi a efektywnością systemów retencyjnych wspieranych RTC.
- ▣ Opracowanie systemu zarządzania wodami opadowymi, opartego na dzierżawie zdecentralizowanej pojemności retencyjnej, zintegrowanego z systemami retencji wymuszonej oraz miejską infrastrukturą kanalizacyjną.

4.3.3. Omówienie uzyskanych wyników - Osiągnięcie I

Etap I - Opracowanie koncepcji funkcjonalno-hydraulicznej retencji wymuszonej w systemach odwodnieniowych

W pierwszym etapie badań przeprowadzono szczegółową analizę funkcjonalno-hydrauliczną innowacyjnego rozwiązania zbiornika wód opadowych, w którym wody te są magazynowane pod wymuszonym ciśnieniem poprzez chwilowe piętrzenie w systemie odwodnieniowym do poziomu akceptowalnego przez eksploatatora – bez zastosowania urządzeń pompowych. W późniejszej fazie koncepcja ta została nazwana retencją wymuszoną. Opracowany sposób funkcjonowania obiektów retencyjnych umożliwia w szerokiej skali realizację rozwiązań technicznych możliwych do zaimplementowania w istniejących systemach odwodnieniowych na terenach o silnej urbanizacji i ograniczonej dostępności przestrzennej. W ramach tych badań analizowano możliwość zwiększenia pojemności retencyjnej sieci odwodnieniowej bez konieczności jej przebudowy, obniżania poziomów posadowienia przewodów i bez stosowania kosztownych układów pompowych.

Badania polegały na przeprowadzeniu analizy faz przepływu z uwzględnieniem strat hydraulicznych. Każda faza została opisana matematycznie za pomocą zestawów warunków brzegowych oraz relacji między wysokościami zwierciadła h a strumieniami przepływu Q . Przeprowadzone analizy wykazały charakterystyczne cechy działania systemu:

- funkcjonowanie w początkowej fazie opadu analogiczne do klasycznego systemu odwodnieniowego – bez aktywacji retencji,
- inicjowanie przepływu do komory retencyjnej po przekroczeniu wyznaczonego na etapie projektowym poziomu w kanale głównym (stanowiącego poziom przyłączenia struktur retencji wymuszonej),
- działanie zbiornika w fazach zaawansowanego napełnienia na zasadzie wymuszonego spiętrzenia ciśnieniowego, co znacznie zwiększa pojemność retencyjną układu,
- automatyczne opróżnianie komory retencyjnej po ustaniu opadów dzięki odpowiednio zaprojektowanemu profilowi przewodów tranzytowych.

Ponadto, w ramach prac opracowano dedykowany algorytm wymiarowania zbiornika retencyjnego, który pozwala precyzyjnie określać wymagane parametry konstrukcyjne na podstawie danych wejściowych, takich jak: dopuszczalne przepływy w kanale przechwytyjącym, projektowe poziomy napełnienia, straty hydrauliczne w przewodach tranzytowych oraz wymagana pojemność retencyjna. Uzyskane w ramach tego etapu badania zostały zamieszczone w publikacji (**Załącznik 4, kod: [C_A6]**) oraz zaprezentowane konferencji naukowej (**Załącznik 4, kod: [K12]**).

Uzyskane wyniki badań dostarczają istotnych informacji i potwierdzają, że model hydrauliczny zbiornika retencyjnego działającego w ramach retencji wymuszonej pozwala na znaczące zwiększenie pojemności retencyjnej systemu odwodnieniowego. Kluczową zaletą jest możliwość magazynowania nadmiaru wód deszczowych lub ścieków ogólnospławnych w komorze retencyjnej bez konieczności obniżania jej dna względem kanału przechwytyjącego. Zastosowanie tego rozwiązania umożliwia utrzymanie wysokiego standardu odwodnienia i poprawę bezpieczeństwa hydraulicznego całego układu.

Podczas tych badań zidentyfikowano trudności w precyzyjnym porównywaniu efektywności hydraulicznej retencji wymuszonej z innymi metodami gospodarowania wodami opadowymi. Wskazało to na potrzebę opracowania uniwersalnego narzędzia oceny, które ułatwi dobór optymalnych rozwiązań dostosowanych do lokalnych warunków. Dlatego też w kolejnym etapie prac skupiono się na rozwoju procedury oceny efektywności struktur retencyjnych w zlewniach zurbanizowanych.

Etap II - Rozwój procedury oceny efektywności struktur retencyjnych w zlewniach zurbanizowanych i analiza rozwiązań opartych na retencji wymuszonej

Etap IIa – Uzyskane wyniki wcześniejszych badań pozwoliły na ubieganie się o finansowanie projektu *Identyfikacja wskaźników służących do opisu retencji kanałowej* w ramach konkursu MINIATURA 4 (**Załącznik 4, kod: [PB4]**). Pozyskane środki umożliwiły kontynuację badań laboratoryjnych i symulacyjnych nad oceną efektywności rozwiązań retencyjnych w systemach odwodnienia miejskiego. Celem projektu była identyfikacja i weryfikacja parametrów opisujących skuteczność retencji wymuszonej. Jest to rozwiązanie polegające na kontrolowanym, krótkotrwałym spiętrzeniu wód opadowych w kanałach tranzytowych i dodatkowych dwukierunkowych strukturach retencyjnych podłączonych do kanału tranzytowego z przeciw spadkiem, w celu wykorzystania ich pełnego potencjału retencyjnego. Ten mechanizm, nazwany retencją wymuszoną, wykazano jako alternatywę lub uzupełnienie w odniesieniu do tradycyjnych rozwiązań retencyjnych. Umożliwia on

ograniczenie wymaganej ich pojemności retencyjnej dzięki lepszemu wykorzystaniu istniejącej infrastruktury.

W ramach badań zastosowano modelowanie hydrodynamiczne w środowisku SWMM 5.1, aby odtworzyć warunki działania odwodnienia podczas opadów nawalnych, które są nierealne do zbadania w warunkach laboratoryjnych. Porównano trzy typy rozwiązań: klasyczny zbiornik jednokomorowy, zbiornik wielokomorowy o zwiększonej efektywności hydraulicznej (**Załącznik 4, kod: [PAT3]**) oraz system oparty na retencji wymuszonej. Przygotowano szczegółowe modele urządzeń i uwzględniono kluczowe parametry zlewni miejskich, w tym współczynnik redukcji przepływu β , powierzchnię zlewni i spadki kanałów. Analiza wrażliwości i zastosowanie teorii planowania eksperymentu (DOE) pozwoliły ograniczyć liczbę niezbędnych symulacji bez utraty jakości wyników. W sumie przeprowadzono 135 wariantów symulacji dla trzech typów rozwiązań i pięciu wartości β , uwzględniając syntetyczne modele opadów odpowiadające deszczom krytycznym.

Analiza wyników wykazała istotne różnice w wymaganej pojemności retencyjnej, zależne od β i typu obiektu sięgające w badanych warunkach 6500 m³. Przy niskiej wartości β zaobserwowano wyraźne korzyści wynikające ze stosowania retencji wymuszonej gdzie przykładowo wystąpiła redukcja pojemności z 2846 m³ do 489 m³. Natomiast przy wyższych wartościach β różnice były minimalne lub niekorzystne. Porównanie efektów z rozwiązaniami wielokomorowych zbiorników retencyjnych wykazało istotną zależność o znaczeniu poznawczym. Przy małych wartościach β retencja wymuszona oferowała największe korzyści, ale przy β w zakresie od 0,5 do 0,8 zmodyfikowane zbiorniki wielokomorowe często osiągały porównywalną lub wyższą efektywność. W tym przypadku wyznaczone różnice sięgały od kilku do ponad 4000 m³ w zależności od konfiguracji systemu. Wyniki te jednoznacznie potwierdzają potrzebę opracowania precyzyjnych narzędzi porównawczych badanych koncepcji, które pozwolą dobrać najodpowiedniejsze rozwiązanie dostosowane do lokalnych warunków hydraulicznych i hydrologicznych oraz topograficznych odwodnianej zlewni.

Efektom tego etapu badań było opracowanie wskaźników efektywności retencyjnej ζ i ϑ , które umożliwiają obiektywną ocenę zasadności stosowania określonego rozwiązania. Wskaźnik ζ określa relację między pojemnością klasycznego zbiornika a retencją wymuszoną i $\zeta > 1$ potwierdza potencjał ograniczenia wymaganej objętości. Wskaźnik ϑ opisujący relację między niezbędną pojemnością użytkową zbiornika wielokomorowego a retencją wymuszoną umożliwia porównanie efektywności zbiorników wielokomorowych i retencji wymuszonej. I tak przy wartościach >1 wskazuje przewagę retencji wymuszonej, a przy <1 – rozwiązań wielokomorowych. Wyniki analiz pokazały, że dla niskich wartości β (0,2–0,35) retencja wymuszona była wyraźnie bardziej efektywna, natomiast przy wyższych β częściej przewagę miały zbiorniki wielokomorowe (wartości wskaźnika ϑ wahały się od około 0,14 do 4,5).

Kluczowym osiągnięciem tego etapu badań było opracowanie narzędzi umożliwiających szybkie wyznaczanie wskaźników bez konieczności budowy pełnych modeli hydrodynamicznych przez zastosowanie sztucznych sieci neuronowych (ANN). Opracowana do tego celu sieć neuronowa MLP (perceptron wielowarstwowy) 6-7-1 osiągnęła wysoką trafność predykcji ($R^2=0,9$). Przeprowadzona analiza wrażliwości z wykorzystaniem opracowanej sieci potwierdziła istotny wpływ współczynnika redukcji β , natężenia odpływu i powierzchni zlewni na kształtowanie się pojemności retencyjnych badanych wariantów projektowych. Opracowano także dedykowaną sieć ANN (MLP 6-6-1) do predykcji wskaźnika

ϑ , osiągając bardzo wysokie współczynniki dopasowania i umożliwiając efektywny wybór między retencją wymuszoną a zbiornikami wielokomorowymi.

Opracowane wskaźniki ζ i ϑ z dedykowanymi modelami ML stanowią innowacyjne narzędzie diagnostyczne i prognostyczne w planowaniu systemów odwodnienia miejskiego. Umożliwiają one racjonalny wybór koncepcji inżynierskiej dostosowanej do lokalnych warunków topograficznych, hydraulicznych i hydrologicznych, wspierając też projektowanie bardziej zrównoważonych i odpornych na przeciążenia, zwłaszcza hydraulicznego systemów odwodnieniowych. Wyniki tych badań posłużyły do opracowania wytycznych doboru urządzeń retencyjnych i zostały opublikowane w publikacji (**Załącznik 4, kod: [C_A4]**) w ramach projektu (**Załącznik 4, kod: [PB4]**).

Etap IIb – Na podstawie wyników uzyskanych w etapie IIa stwierdzono, że klasyczna ocena oparta na analizie wymaganej pojemności retencyjnej bywa trudna lub czasochłonna, wymagająca wielu iteracyjnych obliczeń przy analizie różnych scenariuszy opadowych. Problem dodatkowo narasta, gdy wielkość obiektów retencyjnych jest ograniczona dostępnością terenu i nie można jej dowolnie kształtować. Dlatego rozwijano procedurę pozwalającą porównywać obiekty o identycznych lub zbliżonych kubaturach, bez potrzeby posiadania pełnego, skalibrowanego modelu hydrodynamicznego zlewni.

Celem tej części badań, realizowanych w ramach projektu Miniatura 4 (**Załącznik 4, kod: [PB4]**), było opracowanie narzędzia pozwalającego porównać różne rozwiązania inżynierskie w kanalizacji deszczowej lub/i ogólnospławnej, w tym funkcjonującej w ramach retencji wymuszonej. W tym celu przeprowadzono laboratoryjne eksperymenty na specjalnie zaprojektowanym stanowisku z zestawem zasilania wody, elektrozaworami, sterownikiem PLC i ultradźwiękowymi czujnikami poziomów wypełnienia, umożliwiając tym samym badanie czterech wariantów jednostek hydraulicznych (U1–U4) o identycznych pojemnościach. Badano klasyczny liniowy układ U1 bez dodatkowych elementów retencyjnych, oraz trzy warianty retencji wymuszonej o różnej topologii (m.in. układy boczne i układ pierścieniowy). W pracy zaproponowano nowatorskie podejście związane z oceną analizowanych koncepcji poprzez wprowadzenie wartości mierzonej w postaci czasu odporności hydraulicznej T_g . Określa on jak długo system opóźnia przepływ zanim osiągnie dopuszczalne, wcześniej zdefiniowane napełnienie. Im dłuższy jest czas odporności hydraulicznej T_g , tym większa efektywność retencyjna.

Analizowano wpływ parametrów hydraulicznych takich jak spadek kanału, natężenie dopływu i stopień redukcji przepływu β na wartość czasu odporności T_g . Zdefiniowano również współczynnik efektywności hydraulicznej α jako iloraz T_g dla analizowanego układu (U2, U3, U4) do T_g w klasycznym układzie liniowym (U1). Zastosowano również sztuczne sieci neuronowe do analizy wrażliwości i predykcji efektywności rozwiązań. Opracowane modele mogą stanowić podstawę do dalszych badań, a zwłaszcza rozwoju narzędzi wspomagających planowanie i zarządzanie wodami opadowymi w skali miejskiej. Wartość α odzwierciedla poprawę efektywności retencyjnej uzyskaną dzięki zastosowanemu rozwiązaniu. W praktyce daje to możliwość porównania różnych jednostek hydraulicznych – zarówno klasycznych systemów retencyjnych jak i retencji wymuszonej – przy tych samych ograniczeniach przestrzennych.

Wyniki badań wykazały istotne różnice efektywności między analizowanymi jednostkami. Na przykład dla tych samych warunków hydraulicznych jednostka U2 funkcjonowała prawidłowo jedynie przez 60 s, podczas gdy układy hydrauliczne U3 i U4 aż 500 s. W innym wybranym przypadku T_g dla U2 wynosił 132 s, a dla U3 i U4 odpowiednio 149 s i 110s. Wskazuje to na bardzo duży wpływ geometrii (topologii) podłączenia dodatkowych struktur retencyjnych na czas pracy systemu. Biorąc pod uwagę, że wszystkie badane jednostki miały identyczną geometrię kanału i pojemność, ocena oparta na czasie odporności hydraulicznej T_g , zamiast niezbędnej pojemności retencyjnej, znalazła tutaj pełne uzasadnienie.

Dalsza analiza wykazała, że przy niskim natężeniu dopływu ($6 \text{ dm}^3/\text{s}$) nie dochodziło do wystąpienia wód ze studzienek w czasie 500 s, więc do dalszej oceny przyjęto przepływy 10 i $12 \text{ dm}^3/\text{s}$ jako bardziej krytyczne. Dane te posłużyły do opracowania równań regresji, które ujawniły silny negatywny wpływ natężenia przepływu i pozytywny wpływ spadku na czas odporności hydraulicznej.

Aby ocenić efektywność rozwiązań retencyjnych, wykorzystano współczynnik efektywności hydraulicznej α . Wyniki pokazały, że wartości wskaźnika α były wyraźnie wyższe przy większym dopuszczalnym napełnieniu pozwalającym na wykorzystanie pojemności studni rewizyjnych w porównaniu do niższego poziomu ograniczającego się do sklepienia kanału. Najwyższą skuteczność osiągnął układ pierścieniowy U3, uzyskując nawet ponad 11-krotne wydłużenie czasu T_g względem klasycznego rozwiązania, co potwierdza kluczowy wpływ topologii i poziomu napełnienia na efektywność systemu.

W ramach prowadzonych badań sformułowano także oryginalny model sztucznej sieci neuronowej (typu MLP), który charakteryzuje się bardzo wysoką jakością predykcji (R^2 w walidacji na poziomie 0.98). Analiza wrażliwości przeprowadzona przy użyciu tej sieci wykazała, że największy wpływ na czas T_g miały kolejno: typ zastosowanej jednostki hydraulicznej, dopuszczalne napełnienie, natężenie dopływu, spadek kanału oraz współczynnik redukcji przepływu β .

Analiza korelacji wykazała, że przy dopuszczalnym napełnieniu systemu na poziomie 100% średnicy kanału tranzytowego spadek kanału silnie wpływał na wartość α dla układu U4 ($r=0.75$), a natężenie przepływu miało negatywny wpływ w przypadku układu U3 ($r=-0.74$). Z kolei przy dopuszczalnym poziomie spiętrzenia na poziomie 150% średnicy kanału tranzytowego największy wpływ miały spadek kanału dla U2 ($r=0.59$) i U4 ($r=0.73$) oraz redukcja przepływu β dla U3 ($r=0.75$). To oznacza, że dominujące czynniki nie były stałe – zmieniały się w zależności od układu hydraulicznego i dopuszczalnego spiętrzenia. Równocześnie uzyskane przy przepływie $12 \text{ dm}^3/\text{s}$ dane wskazały, że najwyższe wartości α uzyskano dla układu U3 (np. 11.4, 11.1, 9.1), a U4 osiągał najlepsze wyniki przy dużym spadku kanału (np. 7.1 przy 1% spadku). Wyniki te dowodzą, że zwiększenie retencji w dolnych odcinkach (układ U4) lub zastosowanie układu pierścieniowego (U3) znacznie poprawia efektywność systemu, zwłaszcza przy dużych przepływach i ograniczonej przestrzeni. Uzyskane w opisanym zakresie wyniki badań zostały zamieszczone w publikacji naukowej (**Załącznik 4, kod: [C_A3]**).

Etap IIc – Ten etap badań stanowił kontynuację wcześniejszych prac nad oceną efektywności retencji wymuszonej. Skoncentrowano się na głębszym zweryfikowaniu wpływu topologii podłączenia dodatkowych struktur retencyjnych w systemach retencji wymuszonej oraz na zmianie ich sumarycznej pojemności. Na podstawie wcześniejszych wyników wybrano wariant pierścieniowy, który wykazał największe korzyści retencyjne i poddano go dalszym badaniom. Zakres analiz rozszerzono również o wariant trójkonkowy, charakteryzujący się większą liczbą krótszych przewodów bocznych. Miało to na celu sprawdzenie wpływu zwiększonej powierzchni czynnej wlotów do dodatkowych struktur retencyjnych na efektywność systemu. Wyniki porównano z klasycznym rozwiązaniem zbiornika jednokomorowego, umożliwiając ocenę relatywnej skuteczności alternatywnych koncepcji retencji wymuszonej.

Badania eksperymentalne przeprowadzono na stanowisku laboratoryjnym w skali ułamkowo-technicznej, które odtwarzało określony fragment systemu kanalizacji deszczowej i umożliwiało kontrolę przepływu w zakresie od 2 do 12 dm³/s. Instalacja pozwalała na precyzyjne sterowanie warunkami hydraulicznymi oraz rejestrację danych w czasie rzeczywistym. Do badań wybrano pięć wariantów jednostek hydraulicznych o identycznej pojemności 0.11 m³: U1 – klasyczny układ liniowy bez retencji, U2, U3, U4 – trzy warianty retencji wymuszonej i U5 – tradycyjny zbiornik retencyjny.

Układ U2 to wariant oparty na rurach ułożonych równolegle do głównego kanału odpływowego i połączonych z nim w dolnej części. Boczne, dwukierunkowe odnogi wzdłuż całej długości kanału pełnią funkcję dodatkowych komór retencyjnych, umożliwiając zatrzymanie wody i zwiększenie pojemności systemu bez oddzielnego zbiornika.

Układ U3 to modyfikacja wariantu U2, w którym boczne odnogi tworzą zamknięty pierścień hydrauliczny. Połączenie początkowego i końcowego odcinka z głównym kanałem umożliwia równomierne rozłożenie ciśnienia i skuteczniejsze magazynowanie wody w warunkach przepływu pod ciśnieniem.

Układ U4 opiera się na bocznych połączeniach o zwiększonej liczbie, lecz krótszej długości. Taka konstrukcja zwiększa powierzchnię czynną wlotów do dodatkowych sekcji retencyjnych, ułatwiając szybkie przyjmowanie nadmiarowych objętości wody.

W eksperymentach analizowano wpływ trzech kluczowych zmiennych niezależnych: natężenia dopływu (2, 6, 10 i 12 dm³/s), spadku kanału (0.3%, 0.5%, 1.0%) oraz współczynnika redukcji odpływu β (1, 0.5 i 0.3). Wyjściowym parametrem oceny był czas odporności hydraulicznej systemu T_g , definiowany jako czas pracy do osiągnięcia zadanego poziomu napełnienia h_{MPI} w punkcie pomiarowym.

Łącznie przeprowadzono 360 eksperymentów (36 konfiguracji parametrów dla każdej jednostki). Analizę danych przeprowadzono z wykorzystaniem klasycznych metod statystycznych – obliczono współczynniki korelacji Pearsona i opracowano modele regresyjne z analizą wykresów Pareto. Weryfikację poprawności modeli przeprowadzono za pomocą testu Ramsey RESET oraz analizy błędów średniokwadratowych (MSE). Dodatkowo zastosowano sztuczne sieci neuronowe (MLP) do przeprowadzenia globalnej analizy wrażliwości, uwzględniając zmienne wejściowe ujmujące: natężenie dopływu wody, spadek kanałów, współczynnik redukcji przepływu, dopuszczalny poziom spiętrzenia wody oraz typ jednostki hydraulicznej. Dane podzielono na zbiory treningowe, testowe i walidacyjne w proporcji

70:15:15. Modele MLP umożliwiły pogłębioną ocenę wpływu podanych czynników na czas odporności T_g , potwierdzając wyniki analiz statystycznych.

W badaniach eksperymentalnych oceniono czas odporności T_g dla pięciu wariantów jednostek hydraulicznych (U1–U5) w dwóch scenariuszach napełnienia: Wariant I (dopuszczalne spiętrzenie wody w studni kontrolnej $h_{MPI}=100$ mm) oraz Wariant II ($h_{MPI}=150$ mm).

Zarejestrowany podczas badań zakres zmierzonych wartości T_g wynosił od 32 s do 420 s, co potwierdza dużą zmienność wyników w zależności od typu jednostki i warunków przepływu. Przy niskich przepływach (Q_{in} 2 i 6 dm³/s) wszystkie układy retencyjne utrzymywały poziom napełnienia poniżej wartości granicznej przez ponad 420 s, natomiast przy wyższych przepływach (Q_{in} 10 i 12 dm³/s) czas odporności obniżał się do 32 s. Najdłuższy czas T_g notowano dla zbiornika tradycyjnego (U5) oraz układu pierścieniowego (U3), którego zamknięty obieg hydrauliczny sprzyjał równomiernemu rozkładowi ciśnienia i zwiększonej retencji. Niższe wartości T_g występowały w układach liniowych z bocznymi przyłączami (U2 i U4).

Analiza statystyczna wykazała, że kluczowym czynnikiem wpływającym na T_g było natężenie przepływu, z silnymi ujemnymi wartościami współczynnika korelacji (r w zakresie od -0.337 do -0.957). W badanych układach retencji wymuszonej istotny okazał się także poziom dopuszczalnego napełnienia h_{MPI} , szczególnie dla U5 ($r=0.788$). Na podstawie wyników opracowano modele regresyjne o wysokim dopasowaniu (r od 0.86 do 0.97), które potwierdziły istotny wpływ przepływu, spadku kanału i współczynnika redukcji β na czas odporności systemu. Modele dla układów U1–U4 charakteryzowały się dobrą trafnością predykcyjną w walidacji (R^2 w granicach 0.84–0.92), podczas gdy model dla U5 wykazywał ograniczoną skuteczność przy wysokich przepływach.

W celu porównania względnej efektywności układów zastosowano współczynnik ε , definiowany jako stosunek T_g analizowanej jednostki do T_g zbiornika tradycyjnego U5.

Wyniki dla Wariantu I pokazały wartości $\varepsilon > 1$ w wielu przypadkach, szczególnie dla U3, gdzie uzyskiwano nawet ponad czterokrotne wydłużenie czasu odporności względem klasycznego rozwiązania. Dla Wariantu II wartości ε były niższe – częściej < 1 – co wskazuje na większą skuteczność tradycyjnego zbiornika przy wyższym dopuszczalnym spiętrzeniu. Mimo to, również w tym wariantie układ U3 osiągał wartości $\varepsilon \approx 1$ lub > 1 przy wysokim przepływie i stopniu redukcji przepływu (β) – 0.3.

Dodatkowo przeprowadzono analizę wrażliwości z wykorzystaniem sztucznych sieci neuronowych (MLP). Wyniki badań wykazały, że najistotniejszy wpływ na T_g miało natężenie przepływu, następnie typ jednostki hydraulicznej i poziom napełnienia h_{MPI} , natomiast mniejsze znaczenie miały współczynnik redukcji przepływu i spadek kanału. Wytrenowana sieć osiągnęła wysoki współczynnik determinacji (0.97), potwierdzając użyteczność tej metody w modelowaniu i ocenie skuteczności różnych wariantów konstrukcyjnych.

Wykorzystując użyteczność miary czasu odporności hydraulicznej T_g i opracowanych wskaźników efektywności zaproponowano procedurę oceny rozwiązań retencyjnych z wykorzystaniem oprogramowania do modelowania hydrodynamicznego.

Uzyskane w opisanym zakresie wyniki badań zostały zamieszczone w publikacji naukowej (**Załącznik 4, kod: [C_A2]**).

Uzyskane wyniki w Etapie II badań stanowią ważny wkład w rozwój nauki w inżynierii środowiska i planowania miejskiego, wspierając realizację zrównoważonych strategii zarządzania wodami opadowymi. Rezultatem badań jest nowa procedura oceny skuteczności rozwiązań retencyjnych w odniesieniu do retencji wymuszonej i klasycznej i jest ona oparta na analizie czasu odporności hydraulicznej (Tg). Uzyskane wyniki wskazały, że czas odporności hydraulicznej stanowił parametr umożliwiający szacowanie efektywności rozwiązań retencyjnych w których podejścia oparte na porównaniu niezbędnej ich pojemności lub analizie natężenia odpływu wód opadowych nie były możliwe do zastosowania. Równocześnie wykazano, że czas odporności hydraulicznej wyznaczany dla rozwiązań o identycznych kubaturach w systemach o zdeterminowanej wartości redukcji odpływu wód opadowych jest czuły na zmiany topologii układów przewodów oraz parametrów hydraulicznych sieci, stanowiąc uniwersalne i praktyczne narzędzie diagnostyczne przy szacowaniu efektywności hydraulicznej różnych systemów retencyjnych. Wykorzystanie uzyskanych wyników pozwala na dobór hydraulicznie efektywnych rozwiązań retencyjnych, uwzględniając wpływ dopuszczalnego poziomu spiętrzenia na ich działanie oraz optymalną topologię podłączenia.

Opracowane wskaźniki oraz modele ML stanowią innowacyjne narzędzie diagnostyczne i prognostyczne w planowaniu systemów odwodnienia miejskiego. Umożliwiają racjonalny wybór technologii dostosowanej do lokalnych warunków hydraulicznych i hydrologicznych, bez konieczności budowania pełnego modelu hydrodynamicznego zlewni. Znacząco usprawnia to proces adaptacji systemów odwodnieniowych do nowych warunków hydraulicznych w zlewniach, dla których skalibrowany model hydrodynamiczny systemu jeszcze nie istnieje. Wykorzystanie uzyskanych wyników wspiera projektowanie bardziej zrównoważonych i odpornych na przeciążenia systemów odwodnieniowych.

Etap III – Rozwój technik zarządzania wodami opadowymi bazujących na retencji wymuszonej i dzierżawa potencjału retencyjnego zdecentralizowanych struktur retencyjnych

Etap IIIa – W tym etapie obiektem badań były rozwiązania hydrauliczne oparte na retencji wymuszonej, w tym wspierane systemem sterowania. Aplikację retencji wymuszonej w tych badaniach realizowano poprzez połączenie dodatkowych komór zbiorników retencyjnych z kanałem tranzytowym sieci za pomocą przewodów dwukierunkowych. Wraz ze wzrostem poziomu wody w kanale tranzytowym dochodziło do ich wypełnienia, powodując krótkotrwałe spiętrzenie i działanie układu pod ciśnieniem, co zwiększa całkowitą pojemność retencyjną dołączonych struktur retencji wymuszonej.

Badaniom poddano dwa rozwiązania: system DRS (system retencji ze sterowaniem RTC, zaworami sterowanymi i PLC) oraz HSICR (system zwiększający retencję kanałową bez sterowania RTC). Oba warianty porównano z klasycznym systemem kanalizacji deszczowej bez retencji - C. Rozwiązania te pozwalają na elastyczne wykorzystywanie dyspozycyjnej przestrzeni, w tym możliwość przyłączenia zarówno do sieci miejskiej, jak i do prywatnych posesji w celu zwiększenia użytkowej pojemności retencyjnej. Badania symulacyjne przeprowadzono na stanowisku laboratoryjnym odwzorowującym przepływ w systemie kanalizacji deszczowej. Układ składał się z dwóch zbiorników akumulacyjnych połączonych przewodem symulującym kanał deszczowy oraz pompy zapewniającej obieg wody. Parametry przepływu i poziomu napełnienia monitorowano za pomocą ultradźwiękowych

przepływomierzy i czujników poziomu, co umożliwiało precyzyjną kontrolę warunków hydraulicznych. Każda z trzech badanych komór retencyjnych miała jednakowe wymiary ($800 \times 300 \times 400$ mm) i pojemność 96 dm^3 , połączone były przewodami dwukierunkowymi DN100 z zaworami sterującymi. System wyposażono w sterownik PLC umożliwiający zdalne sterowanie i monitoring online. Analizowano 126 wariantów eksperymentalnych, biorąc pod uwagę wpływ parametrów przepływu i poziomu napełnienia na funkcjonowanie urządzeń.

Weryfikowane urządzenia wyposażono w autorski algorytm sterowania, który rozdzielał fazy pracy na okres suchy i deszczowy, monitorując poziom w kanale sieciowym i poszczególnych komorach. Algorytm decydował o otwieraniu i zamykaniu zaworów, rezerwując pełną pojemność na czas największych opadów i umożliwiając stopniowe opróżnianie po ich ustaniu. Dzięki temu rozwiązaniu unikano napełniania zbiorników przy niskich stanach wody w kanale i rezerwowano pojemność na opady krytyczne. Analiza obejmowała trzy zakresy poziomu napełnienia (150 mm, 200mm i 250 mm) i przepływy w przedziale od 2 do $4,5 \text{ dm}^3/\text{s}$. Wyniki oceniano na podstawie czasu odporności hydraulicznej T_g , definiowanego jako czas do osiągnięcia założonego poziomu napełnienia w kanale sieciowym. Obliczono także dwa wskaźniki efektywności: εL – porównujący czas odporności systemów z retencją do systemu tradycyjnego bez retencji oraz εR – porównujący system z RTC (DRS) i bez RTC (HSICR). W analizach wykorzystano analizę regresji wielorakiej do oceny wpływu zmiennych niezależnych (natężenie dopływu, redukcja odpływu, poziom napełnienia) na parametry T_g oraz wskaźniki efektywności εL i εR . Modele regresyjne charakteryzowały się wysokim dopasowaniem, co potwierdza ich wiarygodność i przydatność do analizy wrażliwości. Rozważania miały na celu ocenę efektywności hydraulicznej analizowanych systemów retencyjnych w warunkach kontrolowanych przepływów krytycznych.

Czas odporności T_g dla systemu z cyfrowym sterowaniem (DRS) mieścił się w zakresie od 24 s do 84 s, w systemie bez RTC (HSICR) od 24 s do 94 s, natomiast dla klasycznego systemu liniowego bez retencji od 10 s do 38 s. Wyniki te potwierdzają, że zastosowanie rozwiązań retencyjnych znacząco wydłuża czas bezpiecznego działania systemu. Ustalono też, że stosowanie systemu z automatycznym sterowaniem (RTC) prowadziło do wydłużenia czasu T_g w każdej sytuacji, gdy natężenie dopływu przekraczało $2 \text{ dm}^3/\text{s}$. W najkorzystniejszym przypadku zastosowanie RTC wydłużyło czas działania urządzenia o 28 s, co oznacza wzrost efektywności o 50% w porównaniu z systemem HSICR. Jednak przy najniższym analizowanym przepływie $2 \text{ dm}^3/\text{s}$ przewagę parametru T_g wykazywał system HSICR. Przeprowadzona analiza regresji potwierdziła dobre dopasowanie modeli opisujących zależności między parametrami hydraulicznymi a T_g . Wyznaczone współczynniki determinacji R^2 wyniosły: 0.84 dla DRS, 0.769 dla HSICR i 0.772 dla systemu klasycznego - C. Wyniki potwierdzają, że zmienne niezależne tj. poziom napełnienia, natężenie dopływu oraz natężenie odpływu – istotnie wpływają na czas odporności hydraulicznej T_g .

W zakresie współczynnika efektywności hydraulicznej εL , system DRS sięgał wartości nawet 241.67%, natomiast HSICR do 163.64%. W przypadku wyższych natężeń przepływu ($>2 \text{ dm}^3/\text{s}$) DRS konsekwentnie wykazywał lepsze wyniki. W najbardziej korzystnym scenariuszu system DRS osiągnął efektywność wyższą o 117.39 punktów procentowych w porównaniu do HSICR. Analiza regresji wykazała, że w systemie DRS kluczowymi czynnikami korzystnie wpływającymi na εL były poziom napełnienia oraz natężenie dopływu.

W systemie HSICR istotny wpływ miał poziom napełnienia (również pozytywny) oraz natężenie odpływu, które oddziaływało negatywnie.

Analiza współczynnika efektywności hydraulicznej εR wykazała dużą zmienność wartości w zależności od parametrów hydraulicznych. Wyniki regresji w zakresie wszystkich analizowanych zmiennych – poziom napełnienia, natężenie dopływu oraz natężenie odpływu – były istotne statystycznie. Przy czym największy wpływ na parametr εR miały natężenie odpływu i natężenie dopływu, a najmniejszy poziom napełnienia.

Przeprowadzone w ramach Etapu IIIa badania ukierunkowano również na opracowanie modelu dzierżawy pojemności retencyjnej, który można skutecznie wdrożyć w miejskich systemach odwodnieniowych z wykorzystaniem rozwiązań opartych na retencji wymuszonej, zapewniając przy tym wysoką efektywność hydrauliczną. Badania potwierdziły również konieczność wprowadzenia odpowiedniego modelu finansowego opartego na mechanizmie leasingu, aby uczynić tego typu inwestycje bardziej atrakcyjnymi. Wyniki pozwoliły określić poziomy cen dzierżawy, które mogłyby skrócić okres zwrotu inwestycji nawet do 5 lat. W zależności od wielkości dzierżawionej pojemności retencyjnej, roczna wysokość dopłaty powinna wynosić od 437,79 € rocznie (436,79 €/m³) dla 5-letniego okresu zwrotu i zbiornika o pojemności 1 m³, do 499 € rocznie (9,99 €/m³) dla 15-letniego okresu zwrotu i zbiornika o pojemności 50 m³.

Wprowadzenie sformułowanego mechanizmu ekonomicznego, oprócz poprawy wyników finansowych infrastruktury odwodnieniowej, stanowi perspektywiczne rozwiązanie wspierające adaptację miast do wyzwań środowiskowych wynikających z działalności człowieka. Uzyskane wyniki badań w kontekście hydrauliki rozwiązań zostały zamieszczone w publikacji naukowej (**Załącznik 4, kod: [C_A1]**), a w aspekcie ekonomicznym dzierżawy potencjału retencyjnego oraz algorytmu mechanizmu dzierżawy zostały zaprezentowane na konferencjach międzynarodowych (**Załącznik 4, kod: [K7, K8]**).

Etap IIIb - W ramach tego etapu badań oceniono skuteczność zastosowania sterowanych podziemnych zbiorników retencyjnych, współpracujących z miejskim systemem odwodnieniowym oraz z systemami retencji na terenach prywatnych. W badaniach analizowano rozwiązania zbiorników retencyjnych, których funkcjonowanie w ramach retencji wymuszonej umożliwiało adaptacyjne dopasowanie długości i układu komór do warunków lokalnych, z możliwością integracji z sieciami IoT oraz zdalnego monitoringu.

Badania prowadzono w formie numerycznych symulacji hydrodynamicznych w środowisku SWMM 5.1, z wykorzystaniem opadów modelowych opartych na krzywych IDF. Analizowano kilkaset wariantów konfiguracji systemów odwodnieniowych o różnych parametrach hydraulicznych i hydrologicznych, w tym trzy warianty sposobu podłączenia zbiorników do sieci (WA – wariant kontrolny, WB – podłączenie szeregowo, WC – podłączenie równoległe). Celem tych badań była analiza możliwości zmniejszenia centralnego zbiornika retencyjnego poprzez współpracę z retencją decentralizowaną.

Wyniki wykazały, że zastosowanie sterowanych zbiorników – w zależności od współczynnika redukcji odpływu β , pozwala na uzyskanie znacznej redukcji odpływu: od 0 do 40% dla powierzchni komory 2 m², od 0 do 67% dla 4 m² oraz od 0 do 83% dla 10 m². Najwyższą skuteczność uzyskiwano przy $\beta=0.65$, natomiast przy niższych wartościach (β w zakresie 0.35–0.5) redukcje mieściły się w przedziale 0–15%.

W kolejnej części tych badań przeanalizowano sposób podłączenia tych urządzeń do miejskiego systemu odwodnienia, porównując wariant szeregowy (WB) i równoległy (WC). Analiza wykazała, że podłączenie szeregowe (WB) w zdecydowanej większości przypadków zapewnia większą zdolność ograniczania przepływu, zwłaszcza przy wysokim wymaganym stopniu redukcji. Wskaźnik określający stosunek maksymalnych przepływów dla wariantu WB do przepływów dla WC przyjmował średnią wartość ok. 0.90, przy wartościach minimalnych rzędu 0.42 i maksymalnych 0.99. Oznacza to, że w najbardziej korzystnych układach przepływ maksymalny był niższy nawet o 58% w wariantcie WB. Należy jednak podkreślić, że nie we wszystkich konfiguracjach uzyskano przewagę rozwiązania WB – w 13 systemach odnotowano ujemne wartości ΔV , co wskazuje na większą efektywność wariantu WC.

Symulacje potwierdziły również, że zastosowanie wariantu WB umożliwia znaczną redukcję wymaganej pojemności użytkowej centralnego zbiornika retencyjnego – w zależności od parametrów systemu od ok. 150 do nawet 600 m³. Wyniki badań zostały zamieszczone w publikacji naukowej (**Załącznik 4, kod: [C_A5]**).

Wyniki potwierdzone badaniami w Etapie III dowodzą, że zastosowanie cyfrowego sterowania RTC w systemach retencyjnych pozwala istotnie wydłużyć ich czas odporności hydraulicznej co wpływa na ich efektywność hydrauliczną, szczególnie przy wyższych natężeniach dopływu. Wskazują one, że dobór i projektowanie takich systemów powinny uwzględniać zmienność parametrów hydraulicznych oraz możliwość ich kontrolowania w czasie rzeczywistym. Ponadto wykazano, że inteligentne, sterowane podziemne zbiorniki retencyjne zwiększają elastyczność i bezpieczeństwo hydrauliczne systemu odwodnieniowego, umożliwiają ograniczenie rozmiaru centralnych zbiorników retencyjnych i lepsze dostosowanie rozwiązań inżynierskich do warunków lokalnych. Dodatkowo takie podejście oferuje potencjał korzystnej dzierżawy pojemności retencyjnej z terenów prywatnych na potrzeby miejskiego systemu odwodnienia, co stanowi nowatorskie podejście umożliwiające integrację rozproszonych zasobów z infrastrukturą publiczną. Potwierdzono, że zastosowanie systemów RTC w rozwiązaniach retencji wymuszonej pozwala na zwiększenie efektywności systemu oraz stwarza warunki do wdrażania mechanizmu dzierżawy potencjału retencyjnego.

4.3.4. Najważniejsze osiągnięcia wynikające z przeprowadzonych badań

Przeprowadzone badania potwierdziły potrzebę opracowywania nowych, alternatywnych rozwiązań retencyjnych, dostosowanych do współczesnych realiów przestrzennych, klimatycznych i instytucjonalnych. Wykazano, że efektywność hydrauliczna systemów odwodnieniowych współdziałających z retencją wymuszoną może być oceniana przy wykorzystaniu wskaźników efektywności, w tym metod opartych na uczeniu maszynowym. Kluczowym parametrem w tym procesie jest czas odporności hydraulicznej, rozumiany jako czas do osiągnięcia maksymalnego poziomu spiętrzenia wody w systemie.

Równocześnie potwierdzono, że opracowany innowacyjny model hydrauliczny zbiornika funkcjonującego w ramach retencji wymuszonej zwiększa retencyjność istniejących systemów odwodnieniowych oraz umożliwia wdrożenie mechanizmu dzierżawy potencjału retencyjnego w obiektach prywatnych. Zastosowanie w nim systemu RTC (Real-Time Control) dodatkowo intensyfikuje wydajność hydrauliczną, wyznaczaną na podstawie czasu odporności hydraulicznej.

Poniżej przedstawiono szczegółowe wnioski z poszczególnych etapów badań.

Etap I – Opracowanie koncepcji funkcjonalno-hydraulicznej retencji wymuszonej w systemach odwodnieniowych

- Model hydrauliczny zbiornika retencyjnego działającego w ramach retencji wymuszonej pozwala znacząco zwiększyć użytkową pojemność retencyjną systemu odwodnieniowego.
- Napełnianie przestrzeni retencyjnej następuje dopiero po osiągnięciu ustalonego poziomu napełnienia w kanale, a zastosowanie systemu sterowania może wymusić jej napełnianie także w mniej sprzyjających warunkach.

Etap II – Rozwój procedury oceny efektywności struktur retencyjnych w zlewniach zurbanizowanych i analiza rozwiązań opartych na retencji wymuszonej

Etap IIa

- Opracowano narzędzia diagnostyczne umożliwiające wyznaczenie współczynników efektywności retencyjnej, opartych na analizie wymaganej pojemności retencyjnej z zastosowaniem sztucznych sieci neuronowych.
- Stworzone modele istotnie zwiększają potencjał adaptacyjny systemów odwodnieniowych i stanowi bazę metodyczną przy ustalaniu przy ustalaniu skutecznych koncepcji w gospodarce wodnej miast.
- Badania z zastosowaniem komputerowych technik symulacyjnych wykazały, że zbiorniki jednokomorowe mają znacznie niższą efektywność retencyjną w porównaniu z retencją wymuszoną. W najbardziej niekorzystnym przypadku ich wymagana pojemność może być aż o 582% większa niż zbiorników z retencją wymuszoną. Natomiast wymagana pojemność zbiorników z retencją wymuszoną w najlepszym przypadku mieściła się od 4.1% do 391% wartości dla zbiorników wielokomorowych.
- Retencja wymuszona nie jest zalecana przy wysokich wartościach współczynnika redukcji przepływu β , czyli przy małej redukcji przepływu. W takich przypadkach wyższą efektywnością hydrauliczną charakteryzują się zbiorniki wielokomorowe.

Etap IIb

- Opracowano narzędzia diagnostyczne umożliwiające wyznaczenie współczynników efektywności retencyjnej, opartych na analizie czasu odporności hydraulicznej T_g , które stanowią podstawę do oceny efektywności struktur retencyjnych w warunkach, w których klasyczna analiza pojemnościowa jest utrudniona lub czasochłonna.
- Wykorzystanie procedury szacowania efektywności hydraulicznej opartej na analizie czasu odporności hydraulicznej T_g , pozwala na szybką ocenę efektywności określonego rozwiązania retencyjnego bez konieczności posiadania pełnego modelu hydrodynamicznego zlewni.
- Topologia podłączenia dodatkowych struktur retencyjnych w ramach retencji wymuszonej ma kluczowe znaczenie dla efektywności systemu retencyjnego.
- Pierścieniowe połączenie struktur retencyjnych wykazuje najwyższą efektywność przy maksymalnym badanym natężeniu dopływu, odpowiadającym krytycznym przepływowom w systemie odwodnieniowym.

- W różnych topologiach struktur funkcjonujących w ramach retencji wymuszonej zasadniczy wpływ na wydłużenie czasu oporu T_g względem układu odniesienia miały parametry określające kolejno: spadek kanału, natężenie dopływu, poziom redukcji przepływu β oraz dopuszczalny poziom podniesienia zwierciadła wody.
- Dobór parametrów projektowych pierścieniowych struktur retencyjnych opartych na retencji wymuszonej jest uzależniony od przewidywanego poziomu dopuszczalnego spiętrzenia w kanale tranzytowym. Przy niskim poziomie spiętrzenia kluczowe jest uwzględnienie natężenia dopływu, natomiast przy wysokim poziomie spiętrzenia głównym kryterium staje się wymagany poziom redukcji przepływu.

Etap IIc

- Pomimo jednakowej geometrii i pojemności dodatkowych struktur w retencji wymuszonej, zmienne warunki hydrauliczne mogą prowadzić do istotnych różnic w czasie odporności hydraulicznej T_g .
- Zastosowanie modeli sztucznych sieci neuronowych (ANN) umożliwia skuteczne prognozowanie efektywności retencji wymuszonej oraz wspomaganie wyboru jej optymalnych rozwiązań.
- Analiza wrażliwości z wykorzystaniem modeli sztucznych sieci neuronowych (ANN) potwierdziła dominujący wpływ natężenia dopływu oraz topologii podłączenia dodatkowych struktur retencyjnych na efektywność całego systemu retencji wymuszonej. Równocześnie wykazała, że retencja wymuszona osiąga wyższą skuteczność magazynowania wód przy niższych, dopuszczalnych poziomach spiętrzenia w kanale tranzytowym.

Etap III – Rozwój technik zarządzania wodami opadowymi bazujących na retencji wymuszonej i dzierżawa potencjału retencyjnego zdecentralizowanych struktur retencyjnych

Etap IIIa

- Implementacja systemu RTC do obiektów funkcjonujących w ramach retencji wymuszonej wprowadza możliwość zastosowania mechanizmu dzierżawy pojemności retencyjnych z terenów prywatnych na potrzeby miejskiej sieci odwodnieniowej.
- Cyfrowe sterowanie RTC poprawia parametry hydrauliczne funkcjonowania badanych rozwiązań retencyjnych, wydłużając czas odporności hydraulicznej. Badania wykazały, że efektywność hydrauliczna struktur retencyjnych w ramach retencji wymuszonej, w porównaniu do tradycyjnych systemów bez retencji, jest zależna od zastosowania systemu RTC. W układach wyposażonych w sterowanie RTC jej wartość sięgała 241,67%, podczas gdy w układach bez sterowania wartość ta wynosiła maksymalnie 136,64%.
- Wdrożenie sterowania w czasie rzeczywistym w systemach retencji wymuszonej jest kluczowe dla osiągnięcia wysokiej efektywności systemów odwodnieniowych i powinno uwzględniać zarówno pomiary poziomu wód opadowych w kanałach, jak i natężenia przepływu. Wyższa efektywność rozwiązań bez systemu RTC obserwowana była przy niższych natężeniach dopływu, co podkreśla konieczność monitorowania obu tych parametrów w celu maksymalizacji skuteczności systemów retencyjnych.

Etap IIIb

- Analiza współdziałania retencji wymuszonej z klasycznym głównym zbiornikiem retencyjnym wykazała, że zastosowanie zbiorników sterowanych umożliwi redukcję wymaganej pojemności użytkowej głównego zbiornika, a jej zakres zależy od sposobu podłączenia struktur retencji wymuszonej.
- Szeregowe podłączenie rozwiązań retencyjnych opartych na retencji wymuszonej w zdecydowanej większości przypadków charakteryzowało się wyższą efektywnością niż ich podłączenie równoległe.
- Wprowadzenie subsydiów za dzierżawę pojemności retencyjnej może skrócić okres zwrotu inwestycji dla indywidualnych zbiorników na wody deszczowe, przy czym kwota subsydium w przeliczeniu na każdy 1 m³ maleje wraz ze wzrostem udostępnionej pojemności retencyjnej.

4.4. Omówienie celu naukowego ww. prac i osiągniętych wyników - Osiągnięcie II

4.4.1. Wprowadzenie i uzasadnienie opracowania rozwiązań retencji wymuszonej

Współczesne miasta stoją przed coraz większymi wyzwaniami, które dotyczą małej zdolności istniejących systemów odwodnieniowych do zapewnienia retencji wód opadowych. Wynikają one z postępującej ich urbanizacji i ciągłego uszczelnienia powierzchni. Sytuacja ta wymaga adaptacji systemów odwodnieniowych do nowych warunków ich funkcjonowania. Takie uwarunkowania wymuszają pilną potrzebę wdrażania innowacyjnych rozwiązań technicznych i sterowania systemami, aby ograniczyć ryzyko podtopień i powodzi.

Tradycyjne zbiorniki retencyjne o działaniu grawitacyjnym często wskazywane są jako podstawowy sposób zwiększania pojemności retencyjnej systemów odwodnieniowych. Jednak ich budowa wiąże się z koniecznością zapewnienia znacznej powierzchni pod inwestycję i też często głębszego posadowienia kanału odpływowego poniżej zbiornika i sieci odwodnieniowej. W gęsto zabudowanych przestrzeniach miejskich takie inwestycje okazują się często kosztowne lub wręcz niewykonalne. Istotnym ograniczeniem klasycznych systemów retencyjnych jest również konieczność zapewnienia odpowiedniej różnicy poziomów między siecią a dnem zbiornika, warunkującej skuteczne gromadzenie nadmiaru wód opadowych. W tym kontekście dostrzega się duży potencjał w wykorzystaniu dostępnej przestrzeni prywatnej infrastruktury do realizacji indywidualnej retencji, umożliwiającej budowę zdecentralizowanego systemu retencyjnego w skali zlewni. Wyzwaniem pozostaje jednak brak rozwiązań technicznych umożliwiających skuteczną współdziałanie między prywatnymi akumulatorami wód deszczowych a publiczną siecią odwodnieniową, co ogranicza możliwości szerszego wdrożenia tego typu inwestycji.

Jednak rozwój koncepcji inteligentnych miast (Smart City) oraz technologii cyfrowych otwiera nowe możliwości wdrażania zdecentralizowanych, inteligentnie sterowanych systemów retencji. Kluczowe znaczenie ma także rozwój technologii energooszczędnych, w tym rozwiązań retencyjnych pozbawionych układów pompowych lub ograniczających energochłonność ich działania. Perspektywnym kierunkiem rozwoju jest zatem wykorzystanie struktur retencyjnych umożliwiających elastyczne dostosowanie geometrii obiektów do ograniczonej przestrzeni ich zabudowy, zastosowanie retencji wymuszonej oraz integracja indywidualnych zbiorników z miejskimi systemami odwodnieniowymi. Istotnym elementem jest również powiązanie systemów zarządzania wodami opadowymi z narzędziami

cyfrowymi zgodnymi z koncepcją Przemysłu 4.0. Takie rozwiązania stanowią istotny krok w kierunku ograniczania ryzyka powodziowego, poprawy bilansu wodnego terenów zurbanizowanych oraz budowy bardziej odpornych i zrównoważonych struktur infrastruktury w miastach.

Wdrażanie tych technologii umożliwia znaczące zwiększenie zdolności retencyjnej miejskich systemów odwodnieniowych przy minimalnej ingerencji w istniejącą infrastrukturę, ograniczenie kosztów inwestycyjnych i operacyjnych związanych z budową nowych zbiorników, a przede wszystkim poprawę bezpieczeństwa hydraulicznego zlewni. Integracja z systemami cyfrowymi i Internetem Rzeczy pozwala na automatyczne i zdalne zarządzanie zasobami wodnymi w czasie rzeczywistym, odpowiadając na wyzwania związane z niestabilnością zdarzeń opadowych i realizując założenia inteligentnego oraz zrównoważonego rozwoju miast.

Przy tym szczególnie istotne jest zaspokojenie potrzeb wskazywanych przez potencjalnych użytkowników i operatorów systemów, takich jak:

- instalacja urządzeń i obiektów na prywatnych posesjach do gromadzenia wody deszczowej na potrzeby właściciela, przy jednoczesnym udostępnianiu pojemności retencyjnej na potrzeby miejskiego systemu odwodnieniowego,
- możliwość wymuszonego, automatycznego sterowania funkcjonowaniem akumulatora poprzez sieć cyfrową z opcją wykorzystania algorytmów predykcyjnych,
- integracja sterowania retencją kanałową z indywidualnymi akumulatorami wód deszczowych przez eksploatatora sieci z wykorzystaniem technologii IoT.

Takie podejście otwiera możliwość realizacji inwestycji zwiększających retencję nawet w gęstej zabudowie miejskiej oraz pozwala na wdrożenie modelu zarządzania wodami opadowymi opartego na koncepcji dzierżawy pojemności retencyjnej od indywidualnych odbiorców. Nie tylko poprawia to wskaźniki ekonomiczne i opłacalność inwestycji publicznych, ale również zwiększa powszechność stosowania rozwiązań retencyjnych w przestrzennie ograniczonych obszarach miejskich. Pozwala to budować zdecentralizowaną, współdzieloną sieć retencyjną, w której właściciele prywatnych zbiorników mogą czerpać korzyści finansowe z samego udostępniania własnej pojemności na potrzeby systemu miejskiego. Taki system sprzyja rozwojowi lokalnych zasobów retencyjnych bez konieczności kosztownych inwestycji w ramach działającej infrastruktury, wspiera ideę współodpowiedzialności za gospodarkę wodną w pełnej skali i pozwala na bardziej zrównoważone oraz elastyczne planowanie przestrzenne w miastach.

4.4.2. Cel badań

Etap I [T1] - Opracowanie rozwiązania retencyjnego umożliwiającego zwiększenie retencji systemu odwodnieniowego bez konieczności różnicowania poziomów dna struktur retencyjnych względem przewodów sieciowych, z możliwością elastycznego dostosowania jego geometrii do dostępnej przestrzeni. Realizacja jest oparta na zwartych komorach retencyjnych lub układach przewodów tworzących pojemność retencyjną, w których napełnianie odbywa się w wyniku chwilowego, celowego spiętrzenia wody w systemie.

Etap II [T2] - Opracowanie nowego układu hydraulicznego zbiornika (akumulatora) wód deszczowych przeznaczonego dla użytkowników prywatnych, z objętością retencyjną dostępną zarówno na potrzeby właściciela posesji, jak i – w ramach dzierżawy – dla

eksploatatora sieci odwodnieniowej w celu zwiększenia retencyjności miejskiego systemu odwodnieniowego. Jednocześnie integracja inteligentnego systemu sterowania z przemysłową siecią cyfrową (IoT), umożliwiającą monitorowanie, przetwarzanie danych oraz zdalne sterowanie jego elementami składowymi. Model dzierżawy potencjału retencyjnego pozwala na generowanie określonych przychodów dla właścicieli poprzez udostępnienie dodatkowej pojemności retencyjnej operatorowi sieci miejskiej bez konieczności budowy dużych, a zatem kosztownych zbiorników retencyjnych.

Etap III [T3] - Opracowanie nowego układu hydraulicznego akumulatora wód deszczowych, łączącego koncepcję retencji wymuszonej z układami pompowymi. Jego celem jest zwiększenie retencyjności systemu odwodnieniowego oraz gromadzenie wód opadowych w komorach wielokubaturowych sytuowanych poniżej poziomu sieci, których opróżnianie realizowane jest za pomocą układów pompowych. Rozwiązanie zakłada integrację z systemem sterowania, umożliwiającym zarządzanie działaniem całego układu retencyjnego w zmieniających się warunkach hydraulicznych.

4.4.3. Omówienie osiągniętych wyników - Osiągnięcie II

Etap I [T1] - Osiągnięcie obejmuje opracowanie innowacyjnego zbiornika retencyjnego przeznaczonego do magazynowania wód deszczowych i ogólnospławnych (**Załącznik 4, kod: [PAT_A1]**), który uzyskał ochronę patentową w Urzędzie Patentowym RP (Patent nr 233981). Rozwiązanie to powstało jako odpowiedź na ograniczenia klasycznych zbiorników retencyjnych. Nowatorska konstrukcja opiera się na wykorzystaniu dwukierunkowych kanałów tranzytowych o dnie równym lub wyższym niż dno kanału sieciowego. Umożliwia to elastyczne i bezpośrednie podłączenie zbiornika do istniejącej sieci kanalizacyjnej bez konieczności jej głębszej przebudowy. Kluczowym elementem innowacji jest także możliwość zastosowania zastawki spiętrzającej w kanale sieciowym, sterującej kierunkiem przepływu i zwiększającej efektywność wykorzystania użytkowej pojemności retencyjnej.

Rozwiązanie charakteryzuje się modułową budową, umożliwiającą dostosowanie geometrii (prostokątnej lub kołowej) do warunków lokalnych i ograniczonej przestrzeni miejskiej. Wnętrze zbiornika może być podzielone na sekcje, umożliwiające sekwencyjne napełnianie, podczyszczanie i kontrolowany odpływ wód opadowych. Opcjonalnie możliwe jest również wykorzystanie perforowanych ścian komory, które umożliwiają infiltrację części wód opadowych do gruntu, poprawiając bilans wodny zlewni.

Zasada działania opiera się na biernym przepływie przez kanały tranzytowe podczas normalnych warunków oraz na gromadzeniu nadmiaru wód w komorze zbiornika w czasie zdarzeń opadowych, co ogranicza obciążenie hydrauliczne sieci odwodnieniowej i zmniejsza ryzyko lokalnych podtopień. Po ustaniu opadów zgromadzona objętość powraca do sieci grawitacyjnie, wyrównując przepływy i redukując szczytowe natężenia.

Opracowane rozwiązanie było podstawą ubiegania się o projekt badawczy (**Załącznik 4, kod: [PB4]**), który został przyznany w 2020 roku. W ramach tego grantu przeprowadzono szerokie badania podstawowe w zakresie hydrauliki oraz efektywności retencji wód opadowych, których wyniki stały się fundamentem dalszych prac nad koncepcją retencji wymuszonej w miejskich systemach odwodnienia. Prototypy zbiornika zostały zrealizowane w ramach tego programu, a rozwiązanie zostało przedstawione w dokumentacji patentowej.

Rozwiązanie było prezentowane na krajowych konferencjach naukowych (**Załącznik 4, kod: [K10, K12]**), gdzie przedstawiono jej koncepcję i nawiązano kontakty ukierunkowane na jej rozwój i transfer do przemysłu. W efekcie została zawarta umowa licencyjna (**Załącznik 4, kod: [TU_1]**) umożliwiająca wdrożenie rozwiązania. Wynalazek został również wyróżniony nagrodą Rektora za uzyskanie patentu (**Załącznik 4, kod: [PAT_A1]**).

Etap II [T2] - Opracowanym rozwiązaniem jest inteligentny system zarządzania wodami opadowymi pod nazwą *Inteligentny system sterowania indywidualną retencją wód deszczowych dla systemów kanalizacyjnych*, który funkcjonuje w ramach retencji wymuszonej równocześnie wykorzystując technologię IoT zgodną ze standardem Przemysł 4.0. Rozwiązanie zostało rozwinięte w ramach projektu badawczego Podkarpackiego Centrum Innowacji (**Załącznik 4, kod: [PB2]**) od drugiego (TRL 2) do czwartego poziomu gotowości technologicznej (TRL 4). Następnie rozwiązanie osiągnęło piąty poziomu gotowości technologicznej (TRL 5) w ramach programu Mini Fundusz Rozwojowy w ramach projektu pn. *Demonstrator systemu sterowania dla rozwiązania: Inteligentny system sterowania indywidualną retencją wód deszczowych dla systemów kanalizacyjnych* (**Załącznik 4, kod: [PB1]**). System ten stanowi rozwinięcie wcześniejszych prac nad retencją wymuszoną i wpisuje się w ideę zrównoważonego zarządzania wodami opadowymi w miastach. W ramach realizowanego projektu opracowano zarówno prototyp, jak i demonstrator rozwiązania. Rozwiązanie zostało również zgłoszone do ochrony patentowej: Zgłoszenie patentowe P.442370 (**Załącznik 4, kod: [PAT_A2]**).

Opracowane rozwiązanie stanowi inteligentny system zarządzania wodami opadowymi, oparty na zdecentralizowanych zbiornikach retencyjnych, który może funkcjonować zarówno jako zbiornik sieciowy instalowany w przestrzeni publicznej, jak i jako indywidualny akumulator retencyjny dedykowany do zastosowań na prywatnych posesjach. W wariantcie sieciowym kluczową zaletą rozwiązania jest eliminacja konieczności zapewnienia różnicy poziomów pomiędzy dopływem a odpływem, co pozwala na jego montaż w dowolnym miejscu systemu kanalizacyjnego bez konieczności głębokich wykopów i kosztownych przebudów infrastruktury. Taka konstrukcja znacząco ogranicza nakłady inwestycyjne i umożliwia efektywne wdrożenie jej w warunkach zwartej zabudowy miejskiej, odpowiadając głównie na problem ograniczonej dostępności terenu.

Innowacja charakteryzuje się modułową budową z możliwością wykonania z kanałów rurowych o przekroju kołowym lub prostokątnym, co pozwala na elastyczne dostosowanie geometrii przewodów i pojemności sieci do warunków lokalnych. Wersja indywidualna, przeznaczona na prywatne posesje, umożliwia właścicielom pełne korzystanie z wody deszczowej na własne potrzeby, jak podlewanie zieleni czy spłukiwanie toalet, przy jednoczesnym udostępnianiu pojemności retencyjnej operatorowi miejskiej sieci odwodnieniowej w formie odpłatnej dzierżawy. Funkcja ta odpowiada na rosnące zapotrzebowanie na budowanie rozproszonych zasobów retencyjnych przy jednoczesnym wykorzystaniu mechanizmów rynkowych. System ten wyposażono w zaawansowany układ sterowania, który umożliwia zarówno dynamiczną regulację odpływu, jak również zatrzymywanie wód opadowych w zależności od aktualnych warunków hydraulicznych w sieci odwodnieniowej. Kluczowym elementem konstrukcyjnym jest dwukierunkowy kanał tranzytowy łączący sieć odwodnieniową z komorą roboczą, umożliwiającą odpowiednio napełnianie lub opróżnianie zbiornika bez konieczności różnicowania poziomów dna.

System zawiera również przestrzeń na komorę roboczą i jedną lub więcej komór pomocniczych, które mogą być niezależnie sterowane i dostosowywane do lokalnych potrzeb – w tym do retencji wód czystych do celów gospodarczych. Elementy wykonawcze, takie jak zawory, zasuwy czy elektrozawory, sterowane są automatycznie za pomocą sterownika PLC (Programmable Logic Controller).

Zintegrowany system czujników monitoruje w czasie rzeczywistym różne parametry działania zbiornika oraz przepływy w sieci kanalizacyjnej, przed i po włączeniu urządzenia. Sterownik PLC z modułem komunikacyjnym IoT umożliwia w pełni automatyczne i zdalne sterowanie zespołem elementów systemu, które pozwalają dostosować charakterystykę pracy do prognozowanych warunków hydrologicznych. Całość jest kompatybilna z przemysłową siecią cyfrową zgodną z koncepcją Przemysłu 4.0, co umożliwia integrację z systemem centralnym operatora sieci, a także wykorzystanie interfejsów HMI do monitorowania i zarządzania. Schemat działania zbiornika sieciowego obejmuje sześć charakterystycznych faz działania:

- Warunki normalne – w trakcie opadów deszczu o wysokim prawdopodobieństwie wystąpienia system odwodnieniowy działa autonomicznie, bez aktywacji zbiornika retencyjnego.
- Wzrost przepływu – po przekroczeniu ustalonego poziomu wypełnienia kanału (np. 50%) system sygnalizuje potrzebę zwiększenia retencyjności, uruchamiając przepływ do zbiornika poprzez elektrozawory, sterowane zasuwy lub mechanizmy alternatywne.
- Udostępnianie pojemności – zbiornik czasowo udostępnia część użytkowej objętości retencyjnej, umożliwiając magazynowanie określonego nadmiaru wód opadowych w dedykowanych komorach technicznych.
- Rozdział wody – woda opadowa rozdzielana jest sekwencyjnie pomiędzy co najmniej dwie komory, z możliwością wydzielenia trzeciej *komory czystej* dla wód z dachów lub terenów zielonych do użytku prywatnego.
- Kontrolowane opróżnianie – proces opróżniania komór retencyjnych jest automatyczny i zależny od monitorowanego natężenia przepływu i poziomu wypełnienia.
- Automatyczne i zdalne zarządzanie – wszystkie fazy działania zbiornika są sterowane automatycznie i mogą być zdalnie nadzorowane za pomocą platformy IoT.

W ramach realizowanego projektu wykonano prototyp rozwiązania przedstawiony na rys. 1. Odzworowuje on laboratoryjne podłączenie dwóch niezależnych akumulatorów symulujących instalację systemu przez dwóch niezależnych użytkowników (decentralizacja retencji).

Wartość dodana rozwiązania obejmuje zwiększenie zdolności retencyjnej systemów kanalizacyjnych, potencjalne obniżenie opłat za odprowadzanie wód opadowych dla użytkowników indywidualnych, ograniczenie ryzyka występowania podtopień w warunkach intensywnych opadów, poprawę infiltracji wód do gruntu oraz cyfryzację infrastruktury odwodnieniowej i upowszechnienie monitoringu krytycznych parametrów hydraulicznych. Dalsze prace nad opracowanym rozwiązaniem obejmowały wykonanie demonstratora systemu sterowania, mającego na celu weryfikację i prezentację funkcjonalności technologii. Demonstrator został zaprojektowany jako kompaktowe, mobilne stanowisko badawcze

umożliwiający symulację warunków operacyjnych oraz niezależną prezentację możliwości systemu.



Rys. 1. Prototyp rozwiązania

Główne elementy demonstratora obejmują system teleinformatyczny, odczytu i wizualizacji danych oraz sterowania układem.

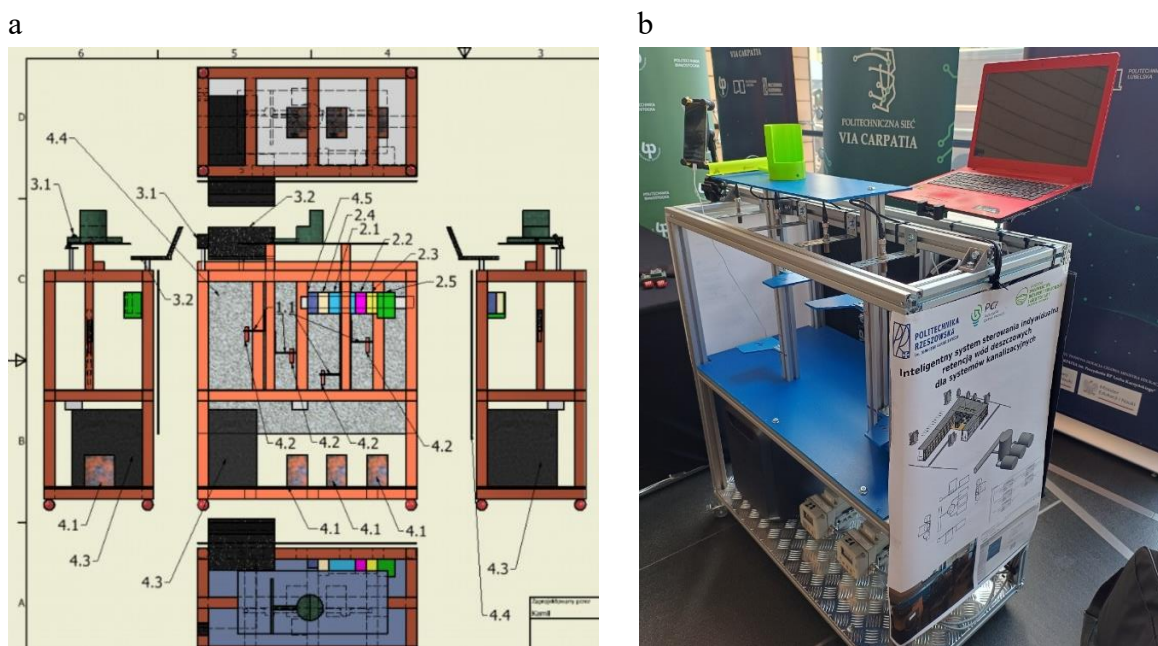
- System teleinformatyczny zapewnia działanie w trybie autonomicznym, niewymagający podłączenia do zewnętrznej sieci kablowej, co znacząco zwiększa elastyczność prezentacji i testowania urządzenia w różnych warunkach środowiskowych.
- System odczytu i wizualizacji danych daje możliwość bieżącego monitorowania parametrów funkcjonowania i ich prezentację za pomocą urządzeń mobilnych z różnymi systemami operacyjnymi, co pozwala na szerokie możliwości demonstracyjne i ułatwia ocenę funkcjonalności systemu.
- System sterowania, obejmujący zintegrowane elementy pomiarowe i wykonawcze odpowiedzialne za zarządzanie przepływem i procesem retencjonowania wody. Stanowi on kluczowy komponent w ocenie praktycznej przydatności innowacji.

Istotnym aspektem konstrukcji demonstratora jest zastosowanie autonomicznego systemu zasilania, przewidującego wykorzystanie bateryjnego źródła energii wspomaganego panelami fotowoltaicznymi. Takie rozwiązanie zostało przyjęte w celu realistycznego odwzorowania warunków zasilania przewidzianych do rzeczywistych zastosowań terenowych i pozwala na niezależne działanie urządzenia w lokalizacjach bez dostępu do infrastruktury energetycznej.

System teleinformatyczny demonstratora został zaprojektowany tak, aby zapewnić bezprzewodowy dostęp do danych operacyjnych, umożliwić wizualizację bieżącego stanu jego funkcjonowania, a także realizować zdalne sterowanie elementami wykonawczymi, bez konieczności stosowania tradycyjnych kablowych połączeń z siecią informatyczną.

Przygotowany demonstrator pełni zatem rolę kluczowego narzędzia walidacyjnego, umożliwiającego kompleksowe testowanie funkcjonalności systemu sterowania w warunkach symulujących rzeczywistą eksploatację. Dodatkowo stanowi on istotny element strategii wdrożeniowej i promocyjnej, zwiększając potencjał komercjalizacyjny rozwiązania poprzez możliwość jego prezentacji przed potencjalnymi partnerami przemysłowymi i inwestorami.

Schemat opracowanego rozwiązania przedstawiono na rys. 2a, natomiast wykonane stanowisko demonstratora zaprezentowano na rys. 2b. Projekt został wyróżniony I nagrodą (1er PRIX) dla Młodego Naukowca Wynalazcy 2023 za opracowanie rozwiązanie pn. *Inteligentny system sterowania indywidualną retencją wód deszczowych dla systemów kanalizacyjnych* przyznaną przez Fundację Polonia International w dniu 25 maja 2023 r. Ponadto rozwiązanie uzyskało Nagrodę Platynową i Nagrodę Prezesa Izby Ekologii w konkursie organizowanym w ramach Międzynarodowych Targów Wynalazków i Innowacji INTARG 2023. Wyniki badań nad opracowanym rozwiązaniem były prezentowane podczas wydarzeń branżowych, w tym *Carpathian Startup Fest (Załącznik 4, kod: [WSG2])*, *Innowacyjne rozwiązania w zarządzaniu wodą (Załącznik 4, kod: [WSG1])*, oraz INTARG 2023, a także promowane w mediach, jak np. Radio Rzeszów, Telewizja Polska (TVP) i Polsat (Rzeszów, 2023 i 2024 r.). W ramach prowadzonych prac wdrożeniowych tego rozwiązania, podejmowane są procedury komercjalizacji wyników we współpracy z Podkarpackim Centrum Innowacji [Załącznik 8], czego efektem było podpisanie porozumienia o współpracy pomiędzy Podkarpackim Centrum Innowacji sp. z o.o. a Zinplast sp. z o.o. a Politechniką Rzeszowską im. Ignacego Łukasiewicza (Załącznik 4, kod: [TU_3], Załącznik 8) w zakresie przedmiotowego rozwiązania.



Rys. 2. Demonstrator (a-schemat demonstratora, b-prezentacja demonstratora na targach

Etap III [T3] - Opracowanie prototypu zbiornika grawitacyjno-pompowego, wykorzystującego w swoim działaniu retencję wymuszoną. Prace badawczo-rozwojowe nad rozwiązaniem były realizowane w ramach projektu Via Express do Sukcesu (Załącznik 4, kod: [PB_A4]). W ramach projektu opracowano innowacyjne rozwiązanie hybrydowe zbiornika retencyjnego, łączące funkcję retencji wymuszonej z pompową, pozwalające na dynamiczne sterowanie odpływem i zwiększenie efektywności hydraulicznej systemu. Rozwiązanie uzyskało ochronę patentową w UPRP: Patent nr 246822.

Kluczowym elementem rozwiązania jest zastosowanie komory przepływowej o zwiększonej pojemności funkcjonującej w ramach retencji wymuszonej, osiągananej poprzez dołączone kanały tranzytowe o konstrukcji rurowej lub monolitycznej w których zastosowano

ideę retencji wymuszonej. Kanały tranzytowe funkcjonują dwukierunkowo, umożliwiając elastyczne napełnianie i opróżnianie komory przepływowej bez potrzeby różnicowania poziomów posadowienia sieci kanalizacyjnej. Pod komorą przepływową zlokalizowana jest komora retencyjna, która gromadzi nadmiar wód opadowych odprowadzanych z komory przepływowej przez przelew. Opróżnianie komory retencyjnej realizowane jest poprzez zintegrowany układ pompowy, którego częstotliwość działania jest ograniczona dzięki zwiększonej pojemności przepływowej zbiornika.

Funkcjonowanie rozwiązania polega na wykorzystaniu komory przepływowej jako pierwszego bufora retencyjnego, który dzięki zwiększonej pojemności ogranicza intensywność przepływów kierowanych do akumulacyjnej komory podziemnej. W czasie wzrostu poziomu wód opadowych w komorze przepływowej nadmiar wody przelewany jest do komory retencyjnej umieszczonej poniżej. Gromadzenie wód w komorze retencyjnej odbywa się grawitacyjnie przez przelew, natomiast ich kontrolowany odpływ realizowany jest poprzez zainstalowany układ pompowy. Taki układ konstrukcyjny układu hydraulicznego pozwala na efektywne wykorzystanie przestrzeni retencyjnej bez konieczności różnicowania poziomów kanałów dopływowych i odpływowych, co jest szczególnie istotne w warunkach gęstej zabudowy miejskiej i ograniczonej dostępnej głębokości posadowienia infrastruktury.

Opracowanie koncepcji i wykonanie prototypu *zbiornika grawitacyjno-pompowego* (rys. 3) umożliwiło przeprowadzenie szczegółowych analiz hydraulicznych w warunkach laboratoryjnych.



Rys. 3. Demonstrator zbiornika grawitacyjno-pompowego

Stanowisko badawcze składało się z układu zasilania wodą, instalacji dopływowej umożliwiającej generowanie przepływów o zróżnicowanym natężeniu, systemu pomiarowego rejestrującego przepływy na wlocie i wylocie instalacji, a także układu stabilizacji przepływu zapewniającego warunki pracy ciągłej. Badania na prototypie prowadzono przy dopływach w zakresie od $2 \text{ dm}^3/\text{s}$ do $12 \text{ dm}^3/\text{s}$, co pozwoliło na weryfikację działania urządzenia w różnych warunkach hydraulicznych. Przeprowadzone analizy przepływów w poszczególnych sekcjach rozwiązania potwierdziły założenia projektowe, w tym poprawność wszystkich faz funkcjonowania zbiornika.

Prototyp opracowany w ramach projektu *Via Express do Sukcesu* został zaprezentowany podczas konferencji *Praktyczny wymiar innowacji – szkoła, biznes i uczelnia w dążeniu do novum*, która odbyła się w 2024 roku w Rzeszowie (**Załącznik 4, kod: [K14]**).

4.4.4. Najważniejsze osiągnięcia wynikające z przeprowadzonych badań - Osiągnięcie II

Efektorem przeprowadzonych prac badawczo-rozwojowych było opracowanie trzech ściśle powiązanych tematycznie rozwiązań inżynierskich, które stanowią odpowiedź na kluczowe wyzwania związane z adaptacją miejskich systemów odwodnienia do zmieniających się warunków klimatycznych, intensywnej urbanizacji oraz ograniczeń przestrzennych i finansowych.

- **[T1]** Opracowanie modułowego zbiornika retencyjnego pozwala na modernizację istniejących systemów kanalizacyjnych w sposób korzystny ekonomicznie, elastyczny i zrównoważony, bez konieczności kosztownej przebudowy. Rozwiązanie to może być stosowane zarówno w nowych, jak i modernizowanych systemach odwodnieniowych, zwiększając jednocześnie bezpieczeństwo hydrauliczne zlewni, czego efektem jest obniżenie poziomu ryzyka podtopień miejskich.
- **[T2]** Zastosowanie inteligentnego akumulatora wód deszczowych opartego na technologii IoT umożliwia znaczące zwiększenie zdolności retencyjnej systemu kanalizacyjnego bez potrzeby zmiany głębokości posadowienia sieci. Umożliwia on budowę zdecentralizowanej, współdzielonej sieci retencyjnej poprzez integrację indywidualnych akumulatorów na terenach prywatnych, z opcją odpłatnej dzierżawy pojemności retencyjnej przez operatorów miejskich systemów odwodnieniowych. Rozwiązanie to ogranicza koszty inwestycyjne i eksploatacyjne, poprawia bezpieczeństwo hydrauliczne zlewni oraz wspiera cyfryzację infrastruktury wodnej zgodnie z ideą inteligentnych miast.
- **[T3]** Zbiornik grawitacyjno-pompowy o zwiększonej pojemności komory przepływowej stanowi innowacyjne rozwiązanie inżynierskie umożliwiające budowę efektywnych i korzystnych ekonomicznie struktur retencyjnych w warunkach ograniczonej dostępności przestrzennej. Dzięki eliminacji konieczności różnicowania poziomów między kanałami dopływowymi i odpływowymi pozwala on na łatwiejszą integrację z istniejącą infrastrukturą kanalizacyjną, zapewnia zmniejszenie kosztów inwestycyjnych i ograniczenie częstotliwości funkcjonowania układów pompowych.

Dzięki synergii tych rozwiązań możliwe jest tworzenie kompleksowych, skalowalnych i zdecentralizowanych systemów retencji miejskiej. Oryginalna koncepcja modułowa wpisuje się bezpośrednio i technicznie wspiera adaptację miast do postępujących zmian klimatu i nowych warunków funkcjonowania. Wdrożenie i upowszechnienie w szerokiej skali opracowanej innowacji zwiększy znacznie odporność infrastruktury na przeciążenia hydrauliczne, co wpłynie też pozytywnie na promocję zrównoważonego rozwoju urbanistycznego aglomeracji miejskich i osiedli.

4.4.5. Możliwość wykorzystania wyników

Uniwersalne moduły retencji wymuszonej (także grawitacyjno-pompowe) w postaci sterowalnych obiektów retencyjnych, zintegrowane z systemami RTC i technologią IoT stanowią nowatorskie rozwiązanie, która zapewnia efektywne zarządzanie wodami opadowymi w warunkach miejskich, zgodne z założeniami koncepcji Przemysłu 4.0. Stworzony model

istotnie zwiększa potencjał adaptacyjny systemów odwodnieniowych i stanowi bazę metodyczną przy ustalaniu skutecznych koncepcji w gospodarce wodnej.

Opracowane rozwiązania mogą stanowić podstawę do wdrażania innowacyjnych modeli zarządzania zasobami wodnymi, w tym mechanizmów rynkowych opartych na dzierżawie pojemności retencyjnej, co zwiększa ich atrakcyjność inwestycyjną oraz społeczną akceptację.

4.5. Omówienie celu naukowego ww. prac i osiągniętych wyników - Osiągnięcie III

4.5.1. Wprowadzenie i uzasadnienie prowadzonych badań

Modelowanie procesów środowiskowych, takich jak wymywanie zanieczyszczeń z mikroplastików ze środowiska wodnego czy ocena efektywności cieplnej ściekowych wymienników ciepła, stanowi istotne zagadnienie zarówno z perspektywy środowiskowej, jak i inżynierskiej.

Mikroplastiki uznawane są za poważne zanieczyszczenia środowiska, stanowiące zagrożenie dla ekosystemów wodnych i bezpośrednio zdrowia ludzi. Ich rozprzestrzenianie, będące konsekwencją działalności człowieka, jest w dużej mierze niekontrolowane, a wiedza o możliwej skali ich występowania nadal pozostaje ograniczona ze względu na brak wiarygodnych metod prognozowania. Ponadto zagadnienie efektywności ściekowych wymienników ciepła ma istotne znaczenie dla inżynierii środowiska i energetyki – zarówno w kontekście doboru odpowiednich rozwiązań projektowych, jak i zadań optymalizacyjnych związanych ze zwiększaniem efektywności energetycznej systemów.

Dostępność i rozwój różnych metod analitycznych – od klasycznych modeli regresji wielorakiej po zaawansowane metody uczenia maszynowego, takie jak sztuczne sieci neuronowe – umożliwiają budowę precyzyjnych narzędzi predykcyjnych. W ramach prowadzonych badań opracowałem i przetestowałem szereg takich modeli dla opisanych zagadnień, wykorzystując algorytmy regresyjne oraz techniki uczenia maszynowego, znacząco poszerzając możliwości analityczne w tym obszarze badań.

Wyniki badań mają istotne znaczenie zarówno środowiskowe, jak i społeczne. Dobór i rozwój odpowiednich metod prognozowania umożliwia prowadzenie rzetelnych analiz wrażliwości, które mogą wskazać kluczowe czynniki, które wpływają na uwalnianie się zanieczyszczeń z mikroplastików do środowiska wodnego, wspierając planowanie działań ograniczających ich emisję. Równocześnie opracowanie i weryfikacja narzędzi predykcyjnych do oceny efektywności ściekowych wymienników ciepła może sprzyjać zwiększeniu zainteresowania inwestycjami w te energooszczędne technologie, prowadząc do ich szerszego wdrażania w budynkowych przemysłowych i komunalnych. W efekcie może to przyczynić się do ograniczenia zużycia energii oraz zmniejszenia emisji CO₂ do atmosfery, wspierając cele zrównoważonego rozwoju i walki z negatywnymi skutkami antropopresji.

4.5.2. Cel badań

Celem przeprowadzonych badań było opracowanie i walidacja narzędzi predykcyjnych (opartych na ML) umożliwiających modelowanie wybranych procesów środowiskowych istotnych z punktu widzenia inżynierii i ochrony środowiska. Prace koncentrowały się na dwóch głównych zagadnieniach:

- predykcji wymywania zanieczyszczeń z mikroplastików ze środowiska wodnego (Etap I),
- prognozowaniu efektywności ściekowych wymienników ciepła (Etap II).

Głównym celem mojej części badań było stworzenie modelu pozwalającego na dokładną analizę wrażliwości i identyfikację kluczowych czynników wpływających na badane procesy. W tym kontekście głównym założeniem było wykorzystanie i porównanie zarówno klasycznych metod regresji, jak i zaawansowanych technik uczenia maszynowego w postaci sztucznych sieci neuronowych do budowy modeli charakteryzujących się wysoką dokładnością predykcji.

4.5.3. Omówienie osiągniętych wyników - Osiągnięcie III

Etap Ia - Podstawą badań były dostarczone przez współautorów wyniki analiz laboratoryjnych. Obiektem badań były mikroplastiki w postaci granulatu z recyklingowanych opon samochodowych, podzielone na frakcje o wielkości 600 μm , 1000 μm , 1000–3000 μm i 3000–8000 μm . Próbkę tych cząstek inkubowano w wodzie w różnych temperaturach (20, 60 i 90 °C) i w różnych czasach (1–14 dni), badając uwalnianie plastyfikatorów (PAEs – grupa estrów kwasu ftalowego, w tym DEHP – ftalan di(2-etyloheksylo)) oraz innych zanieczyszczeń do środowiska wodnego.

Ze względu na złożoność analizowanego procesu zdecydowano się na zastosowanie sztucznych sieci neuronowych (ANN). Celem wykorzystania ANN było stworzenie narzędzia umożliwiającego prognozowanie wymywania plastyfikatorów z mikroplastików w zależności od wielkości cząstek, temperatury i czasu inkubacji. I na tej bazie przeprowadzenie globalnej analizy wrażliwości w celu określenia wpływu tych parametrów na emisję zanieczyszczeń z matrycy polimerowej wraz z oceną zasadności stosowania metod uczenia maszynowego w badaniach środowiskowych.

Model sieci neuronowej opracowano przy użyciu oprogramowania *Statistica*, wykorzystując dane eksperymentalne obejmujące zmienne niezależne: wielkość cząstek (cztery frakcje: 3000–8000 μm , 1000–3000 μm , 1000 μm i 600 μm), temperaturę środowiska reakcji i czas inkubacji. Zmiennymi zależnymi były stężenia analizowanych zanieczyszczeń: DEHP, DBP (dibutylftalan), DOP (di-oktyloftalan), DMP (dimetylfalan), DEP (dietylfalan) oraz OWO (ogólny węgiel organiczny). Dane podzielono na zbiory treningowy (70%), testowy (15%) i walidacyjny (15%). Spośród wygenerowanych modeli wybrano sieć o najniższym błędzie i najlepszym dopasowaniu. Ostatecznie wybrano perceptron wielowarstwowy (MLP) o architekturze 7-9-7, z logistyczną funkcją aktywacji w warstwie ukrytej i wyjściowej. Jakość działania modelu oceniono na podstawie uzyskanych wyników dla trzech zbiorów: treningowego, testowego i walidacyjnego. Otrzymane wyniki potwierdziły bardzo dobre dopasowanie do danych. Analiza współczynników determinacji R^2 wykazała wysoką trafność predykcji w odniesieniu do wszystkich parametrów. Najwyższą ma OWO ($R^2=0.9639$) i najniższą DEP ($R^2=0.8805$), przy czym dla pozostałych związków R^2 przekraczało 0.9.

Globalna analiza wrażliwości potwierdziła, że jednym z najważniejszych czynników wpływających na emisję zanieczyszczeń była wielkość cząstek mikroplastików (wartość indeksu czułości równa 17.85). Wszystkie zmienne wejściowe charakteryzowały się dużą wartością indeksu czułości, co potwierdza ich istotny wpływ na proces migracji zanieczyszczeń do środowiska wodnego. Uzyskane w opisanym zakresie wyniki badań zamieszczono w publikacji naukowej (**Załącznik 4, kod: [C_B1]**). Artykuł, w którym opublikowano wyniki tych badań został uhonorowany Nagrodą Rektora.

Przeprowadzone badania pozwoliły na opracowanie i weryfikację modelu sztucznej sieci neuronowej umożliwiającego przewidywanie stopnia wymywania plastyfikatorów

z mikroplastików w zależności od warunków środowiskowych i na identyfikację wielkości cząstek jako kluczowego czynnika wpływającego na emisję zanieczyszczeń do wody.

Etap Ib - Podstawą badań były dostarczone przez współautorów wyniki badań laboratoryjnych. Obiektem badań było uwalnianie plastyfikatorów np. DEHP oraz innych dodatków z mikroplastików pochodzących z trzech rodzajów polimerów: kauczuku SBR z opon samochodowych, PVC i polipropylenu, do środowiska wodnego. Badania prowadzono w różnych temperaturach, czasach degradacji oraz dla różnych frakcji cząstek, aby określić wpływ tych parametrów na migrację zanieczyszczeń.

W celu opracowania funkcji aproksymujących proces wymywania zanieczyszczeń z mikroplastików zastosowano teorię planowania doświadczeń (DOE) w postaci ułamkowego planu centralnego kompozycyjnego (*Fractional Factorial Central Composite Design*). Eksperymenty zaplanowano jako kombinację parametrów wejściowych (temperatura, czas degradacji i wielkość cząstek) oraz zmiennej wyjściowej (DEHP). Takie podejście wymagało wykonania serii doświadczeń w starannie dobranych punktach planu eksperymentalnego. Wyniki serii wielu eksperymentów posłużyły do wyznaczenia wielomianowych funkcji aproksymujących z uwzględnieniem efektów liniowych, kwadratowych i interakcji między zmiennymi. Ich adekwatność statystyczną zweryfikowano za pomocą testu Snedecora-Fishera, potwierdzając wysoką zgodność modeli z danymi empirycznymi i umożliwiając precyzyjne prognozowanie wymywania DEHP z mikroplastików w zmiennych warunkach środowiskowych.

W pierwszej fazie badań sprawdzano, czy dwie zmienne niezależne: czas rozkładu (od 1 do 14 dni) i temperatura (od 20 do 90 °C) wpływają na ilość plastyfikatora DEHP uwalnianego z mikroplastików do wody. Wyniki wykazały, że w tych warunkach ani czas, ani temperatura nie miały wyraźnego wpływu na ilość DEHP, ponieważ różnice były zbyt małe, by uznać je za istotne. Statystyczna analiza potwierdziła, że zmiany tych parametrów nie powodowały istotnych różnic w emisji DEHP. Oznacza to, że w badanym zakresie warunków nie zaobserwowano wyraźnego efektu tych czynników.

W drugiej fazie badań przeprowadzono analizę wyników w ramach ustalonego planu eksperymentalnego uwzględniającego trzy zmienne wejściowe: czas degradacji, temperaturę i rozmiar cząstek mikroplastików. Wyniki analizy wariancji (ANOVA) wykazały, że to właśnie wielkość cząstek była czynnikiem o największym znaczeniu statystycznym ($t=13.840$; $p=0.000$), podczas gdy czas i temperatura nie osiągnęły poziomu istotności (np. $p=0.335$ dla czasu, $p=0.245$ dla temperatury). Model opisujący zależność emisji DEHP od analizowanych parametrów osiągnął wysoki współczynnik determinacji (R^2 w zakresie 0.966–0.98). Wyniki wraz z ich interpretacją w pełni potwierdzają bardzo dobre dopasowanie funkcji aproksymujących do danych eksperymentalnych.

Analiza wykresu Pareto jednoznacznie wskazała rozmiar cząstek jako kluczowy czynnik wpływający na wielkość emisji DEHP, natomiast czas i temperatura pełniły rolę pomocniczą lub nieistotną statystycznie. Opracowane równania aproksymujące umożliwiają precyzyjne szacowanie emisji DEHP w zależności od rozdrobnienia mikroplastików. Wyniki te podkreślają, że zmniejszenie wielkości cząstek prowadzi do zwiększonej emisji tego szkodliwego plastyfikatora do środowiska wodnego, co ma istotne znaczenie w kontekście oceny ryzyka środowiskowego związanego z degradacją odpadów tworzyw sztucznych.

Uzyskane w opisanym zakresie wyniki badań zostały zamieszczone w publikacji naukowej (**Załącznik 4, kod: [C_B2]**).

Badania pozwoliły opracować i zweryfikować empiryczny model statystyczny, oparty na wielomianowych funkcjach aproksymujących umożliwiające prognozowanie emisji DEHP z mikroplastików w zależności od warunków środowiskowych, wskazując rozdrobnienie cząstek jako kluczowy czynnik zwiększający uwalnianie tego zanieczyszczenia do wody.

Etap II - Podstawą prac były dostarczone przez współautorów wyniki badań laboratoryjnych. Badaniom poddano dwa rodzaje przeciwprądowych wymienników ciepła do odzysku ciepła ze ścieków prysznicowych (DWHR). Pierwszy pionowy (Showersave QB1-16) i drugi poziomy, zintegrowany z brodzikiem prysznicowym. W warunkach laboratoryjnych odwzorowano rzeczywisty układ instalacji prysznicowej z przepływowym podgrzewaczem wody i zaworem mieszającym. Mierzono temperaturę w pięciu punktach instalacji i jednocześnie przepływy zimnej i podgrzanej wody, wykorzystując rezystancyjne czujniki temperatury i ultradźwiękowe przepływomierze. Wyniki posłużyły do oceny możliwości zastosowania modeli regresyjnych i metod uczenia maszynowego do przewidywania sprawności odzysku ciepła w tych systemach.

W mojej części badań skoncentrowałem się na opracowaniu modeli predykcyjnych umożliwiających ocenę sprawności odzysku ciepła w systemach DWHR (Drain Water Heat Recovery) na podstawie danych eksperymentalnych uzyskanych na stanowisku badawczym w skali technicznej. Analizowane zmienne niezależne obejmowały przepływ wody zasilającej, temperaturę wody wypływającej z głowicy prysznicowej, temperaturę wody gorącej z podgrzewacza oraz temperaturę wody zimnej z sieci. Zmienną zależną była wyznaczana na podstawie pomiarów efektywność odzysku ciepła ε .

W pierwszym etapie przeprowadzono analizę korelacji oraz wstępne modelowanie regresji wielorakiej w celu identyfikacji zależności między zmiennymi. Wartość dopasowania modeli oceniano na podstawie współczynnika determinacji (R^2) i błędu średniokwadratowego (MSE). Sprawdzano również występowanie nieliniowości przy pomocy testu Ramsey'a RESET.

W celu porównania zasadności stosowania różnych metod zastosowano także ANN typu perceptron wielowarstwowy (MLP). Sieci projektowano w środowisku Statistica, z podziałem danych na zbiory: treningowy (70%), testowy (15%) i walidacyjny (15%). Kryterium wyboru najlepszego modelu była maksymalizacja R^2 i minimalizacja MSE przy jednoczesnej kontroli ryzyka nadmiernego dopasowania. Opracowane sieci neuronowe wykorzystano również do przeprowadzenia analizy wrażliwości globalnej w celu oceny wpływu poszczególnych zmiennych wejściowych na efektywność odzysku ciepła. Takie podejście umożliwiło nie tylko stworzenie dokładnych narzędzi predykcyjnych, ale także identyfikację kluczowych parametrów wpływających na działanie systemów DWHR w warunkach zbliżonych do rzeczywistych.

W ramach badań zebrano duży zestaw danych laboratoryjnych w liczbie 19 200 przypadków z wymiennika poziomego i 13 000 z pionowego. Obejmują one kombinacje parametrów wejściowych jak: przepływ wody (3–10 dm³/s), temperaturę na głowicy prysznicowej (33.5–48 °C), temperaturę wody gorącej (52.5–58.5 °C) i temperaturę zimnej wody (11–13 °C). Dla każdej kombinacji mierzono temperaturę wody podgrzanej i obliczano sprawność wymiany ciepła ε , określającej procent odzyskanego ciepła odpadowego ze ścieków

prysznicowych. Wyniki wskazały na dużą zmienność mierzonych wartości (wysokie wartości CV).

Analiza korelacji wykazała, że na sprawność wymiennika poziomego największy negatywny wpływ miało zwiększanie przepływu, natomiast na sprawność pionowego silnie działały przepływ i temperatura wody zimnej. Z kolei temperatura na głowicy prysznicowej była najważniejszym czynnikiem wpływającym na temperaturę podgrzanej wody w obu rozwiązaniach.

Wstępne modele regresji liniowej ujawniły nieliniowość relacji – test Ramseya RESET wykazał bardzo wysokie wartości statystyki F (np. 247.5 dla $\varepsilon_{horizontal}$, 13403 dla $\varepsilon_{vertical}$, $p < 2.2e-16$). Dlatego opracowano rozszerzone równania regresji wielomianowej uwzględniające interakcje i składniki kwadratowe (np. dla $\varepsilon_{horizontal}$ skorygowane $R^2=0.987$, $MSE=0.150$; dla $\varepsilon_{vertical}$ $R^2=0.992$, $MSE=0.123$), które dobrze opisywały zależności między zmiennymi.

W dalszej części prac zastosowano sztuczne sieci neuronowe MLP jako narzędzie lepiej radzące sobie z nieliniowymi zależnościami. Wybrano cztery architektury MLP (np. 4-6-1, 4-5-1), które osiągnęły bardzo wysokie współczynniki korelacji r (0.997–0.999) i wyjątkowo niskie błędy MSE (0.003–0.045) zarówno w zbiorach treningowych, testowych, jak i walidacyjnych. Korzystając z danych walidacyjnych ustalono wartości R^2 , które wynosiły od 0.994 do 0.999, potwierdzając bardzo wysoką trafność i precyzję predykcji zarówno sprawności odzysku ciepła ε , jak i temperatury podgrzanej wody.

Analiza wrażliwości globalnej modeli neuronowych wykazała, że największy wpływ na przewidywaną sprawność odzysku ciepła ε ma przepływ wody. Natomiast w odniesieniu do temperatury podgrzanej wody, kluczowym czynnikiem okazała się temperatura na głowicy prysznicowej. Wyniki te pozwalają wskazać główne parametry, które należy kontrolować i optymalizować w praktycznych systemach odzysku ciepła ze ścieków prysznicowych, by maksymalizować ich efektywność. Uzyskane w opisanym zakresie wyniki badań zostały zamieszczone w publikacji naukowej (**Załącznik 4, kod: [C_B3]**).

Przeprowadzone badania pozwoliły na opracowanie i weryfikację modeli regresyjnych i sztucznych sieci neuronowych (ANN), które umożliwiają precyzyjne przewidywanie możliwej sprawności odzysku ciepła w systemach DWHR na podstawie danych eksperymentalnych oraz identyfikację kluczowych parametrów wpływających na ich efektywność w warunkach zbliżonych do rzeczywistych.

4.5.4. Najważniejsze osiągnięcia wynikające z przeprowadzonych badań

Przeprowadzone prace badawczo-rozwojowe doprowadziły do opracowania zestawu narzędzi obliczeniowych i metod modelowania, które stanowią odpowiedź na potrzebę skutecznej oceny i prognozowania procesów środowiskowych z zakresu emisji zanieczyszczeń z mikroplastików oraz prognozowania efektywności ściekowych wymienników ciepła typu DWHR. Wyniki badań pozwoliły na opracowanie i walidację modeli opartych na sztucznych sieciach neuronowych i sformułowania równań aproksymujących, które umożliwiają uwzględnienie kluczowych parametrów środowiskowych i procesowych.

Etap Ia

- Wykorzystanie sztucznych sieci neuronowych stanowi przydatne narzędzie do prognozowania wymywania zanieczyszczeń z mikrocząstek zużytych opon (mikroplastików), w szczególności plastyfikatorów takich jak estry kwasu ftalowego

i innych związków organicznych (m.in. benzenodiamina, fenol, benzotiazol, benzen), pozwalając przewidywać ich emisję do środowiska wodnego w zależności od lokalnych warunków takich jak temperatura, pH, czas inkubacji czy rozmiar cząstek.

- Sztuczne sieci neuronowe okazały się skutecznym narzędziem do analizy wrażliwości procesu wymywania związków organicznych z mikroplastików pochodzących z zużytych opon, umożliwiając identyfikację i ocenę wpływu kluczowych parametrów środowiskowych – takich jak temperatura medium, wielkość frakcji cząstek, pH oraz czas kontaktu z wodą.

Etap Ib

- Opracowano i zweryfikowano funkcje aproksymujące, które umożliwiają precyzyjne szacowanie stężenia DEHP uwalnianego z mikroplastików w zależności od temperatury, czasu degradacji i wielkości cząstek tworzywa z wykorzystaniem teorii planowania doświadczeń DOE. Zastosowanie tych metod modelowania znacząco ogranicza potrzebę kosztownych i czasochłonnych eksperymentów laboratoryjnych. Jednocześnie wspiera efektywne planowanie i realizację strategii ograniczania emisji zanieczyszczeń i zarządzania odpadami tworzyw sztucznych.

Etap II

- Wyniki badań potwierdziły walory praktyczne opracowanych modeli regresyjnych i modele opartych na metodach uczenia maszynowego. W tym także sztuczne sieci neuronowe, które stanowią skuteczne narzędzia predykcyjne do oceny efektywności odzysku ciepła w systemach DWHR (Drain Water Heat Recovery). Modele regresyjne wykazały wysoką dokładność walidacji (0,994 dla wymiennika poziomego oraz 0,998 dla wymiennika pionowego), porównywalną z wynikami osiąganymi przez sztuczne sieci neuronowe (odpowiednio 0,995 i 0,999). Jednocześnie analiza wyników pokazała, że sieci neuronowe lepiej odwzorowują złożone, nieliniowe zależności między zmiennymi, co czyni je szczególnie przydatnymi w bardziej złożonych przypadkach predykcji temperatury podgrzanej wody (dla której nie uzyskano zadowalających wyników przy zastosowaniu analizy regresji).
- Zastosowanie tych modeli umożliwia wyeliminowanie czasochłonnych i kosztownych badań laboratoryjnych przy ocenie efektywności odzysku ciepła. Wystarczy znajomość temperatury wody zimnej, by w sposób wiarygodny przewidzieć oczekiwaną sprawność systemu DWHR, co znacząco usprawnia proces projektowania i planowania inwestycji wyposażonych w tego typu rozwiązania energooszczędne.

Reasumując przy tworzeniu modeli środowiskowych – zarówno w badaniach nad procesem wymywania zanieczyszczeń z mikroplastików, jak i w analizach efektywności ściekowych wymienników ciepła – należy podkreślić, że zastosowanie metod uczenia maszynowego nie zawsze stanowi najkorzystniejsze rozwiązanie. Choć metody te mają niezaprzeczalne zalety, szczególnie w przypadku dysponowania obszernym i zróżnicowanym zbiorem danych, to jednak wyniki badań wskazują, że wykorzystanie klasycznego podejścia w badanych procesach środowiskowych w postaci równań aproksymujących pozwala na uzyskanie porównywalnej dokładności predykcji, bez istotnego zwiększenia błędu modelowania. Uzyskane wyniki potwierdziły znaczenie krytycznego doboru metody modelowania w zależności od specyfiki analizowanego procesu.

4.5.5. Możliwość wykorzystania wyników

Uzyskane wyniki badań stanowią istotny wkład w rozwój narzędzi wspomagających procesy projektowe, decyzyjne i analityczne w obszarze inżynierii środowiska. Opracowane modele predykcyjne mogą znaleźć zastosowanie w profesjonalnej działalności inżynierskiej, w tym:

- zarządzanie jakością wód i planowanie działań ograniczających zanieczyszczenie mikroplastikami, gdyż modele predykcyjne pozwalają na ilościową ocenę wpływu kluczowych czynników na proces wymywania zanieczyszczeń z mikroplastików ze środowiska wodnego, umożliwiając wskazanie najbardziej efektywnych kierunków działań prewencyjnych i inwestycyjnych.
- wsparcie prac projektowych i optymalizacyjnych, jako że opracowane narzędzia umożliwiają ocenę efektywności cieplnej ściekowych wymienników ciepła na etapie projektowania, ułatwiając dobór rozwiązań technologicznych oraz parametryzację systemów pod kątem maksymalizacji odzysku energii.
- analizy wrażliwości i ocenie ryzyka – modele opracowane w ramach badań umożliwiają prowadzenie zaawansowanych analiz wrażliwości, identyfikację kluczowych parametrów procesowych oraz ocenę ryzyka związanego z funkcjonowaniem systemów środowiskowych i technologicznych.
- wspieranie polityk środowiskowych i energetycznych przez administrację publiczną, projektantów i inwestorów poprzez wykorzystanie wyników badań do podejmowania decyzji sprzyjających ograniczeniu zanieczyszczenia wód mikroplastikami oraz zwiększeniu efektywności energetycznej instalacji budowlanych w budynkowych, co w efekcie przyczynia się do ograniczenia emisji gazów cieplarnianych i realizacji celów zrównoważonego rozwoju.

4.6 Inne osiągnięcia naukowo – badawcze

Lata 2011-2015

W 2011 roku ukończyłem jednolite studia magisterskie na Wydziale Budownictwa i Inżynierii Środowiska Politechniki Rzeszowskiej, uzyskując tytuł zawodowy magistra inżyniera inżynierii środowiska ze specjalnością inżyniera komunalna. Tematem mojej pracy magisterskiej był *Projekt techniczny wariantowych rozwiązań zbiornika retencyjnego uśredniającego dopływ do oczyszczalni ścieków*, przygotowany pod opieką Prof. dr hab. inż. Józefa Dziopaka. Skupiłem się w nim na analizie wpływu lokalizacji sieciowego zbiornika retencyjnego w kanalizacji ogólnospławnej na nakłady inwestycyjne ponoszone na jego budowę. Już na etapie wykonywania tej pracy sporządziłem dwa opisy innowacyjnych rozwiązań dotyczące: zbiornika retencyjnego, które uzyskało ochronę patentową (**Załącznik 4, kod: [PAT1]**) i przelewu kanalizacyjnego zarejestrowanego jako wzór użytkowy (**Załącznik 4, kod: [PAT0]**).

Po ukończeniu studiów rozpocząłem pracę w Katedrze Infrastruktury i Ekorozwoju Politechniki Rzeszowskiej, gdzie do sierpnia 2015 roku byłem zatrudniony na stanowisku asystenta. Okres ten był kluczowy dla rozwoju moich zainteresowań naukowych, w szczególności w obszarze retencji wód opadowych oraz modelowania i projektowania miejskich systemów odwodnieniowych. Praca w zespole Prof. Józefa Dziopaka i Prof. Daniela Słysia pozwoliła mi rozwinąć warsztat badawczy i udoskonalić potencjał naukowy, głównie w zakresie modelowania hydrodynamicznego systemów kanalizacyjnych. Swoją wiedzę uzupełniałem prowadząc zajęcia m.in. z przedmiotów takich jak: kanalizacja i systemy

odprowadzania ścieków, instalacje budowlane, infrastruktura podziemna oraz techniki pomiarowe w sterowaniu transportem wody i ścieków. Zdobyte doświadczenie stanowiło podstawę moich późniejszych badań nad pomiarami, doborem czujników i programowaniem układów RTC.

Aktywnie uczestniczyłem w realizacji wewnętrznych projektów badawczych finansowanych w ramach badań młodych naukowców. Już w 2012 roku pełniłem rolę kierownika wewnątrzuczelnianego projektu pt. *Metodyka określenia efektywnego modelu hydraulicznego zbiornika wód deszczowych* (Załącznik 4, kod: [PB_A3]). Projekt ten umożliwił mi zdobycie doświadczenia w realizacji małych projektów naukowych. Skupiłem się na rozwijaniu metodologii projektowania zbiorników retencyjnych, zwłaszcza w zakresie modelowania opadów, co stało się podstawą do otwarcia przewodu doktorskiego. Projekt ten pozwolił mi także opanować złożoność teorii dotyczącej właściwego doboru opadów do wymiarowania zbiorników retencyjnych przy uwzględnieniu różnic w ich geometrii.

Byłem również wykonawcą wewnątrzuczelnianego projektu pt. *Nowoczesne systemy odwodnień miast*, realizowanego w latach 2014–2015 (Załącznik 4, kod: [PB_A2]). W 2015 roku realizowałem projekt pt. *Wpływ zjawisk opadowych na wymiarowanie wybranych elementów systemu kanalizacyjnego* (Załącznik 4, kod: [PB_A1]). Efektem tych prac było opracowanie syntetycznych modeli opadowych o różnej charakterystyce zmienności czasowej, możliwych do wykorzystania w procesie wymiarowania obiektów retencyjnych w oprogramowaniu do modelowania hydrodynamicznego.

Brałem czynny udział w licznych konferencjach krajowych i międzynarodowych, takich jak Infraeko, ECOpole, Karpat-Medencei Környezetudományi Konferencia, Workshop o Vode, ECOpole'15, EKO-DOK (Załącznik 4, kod: [K1, K2, K4, K5, K6]). W ramach tych konferencji prezentowałem wyniki badań i uczestniczyłem w pracach komitetów organizacyjnych (Załącznik 4, kod: [KO1, KO2]). Część z tych konferencji realizowana była w ramach międzynarodowego programu Visegrad Strategic Program nt. *Sustainable rainwater management in the V4 countries* (Załącznik 4, kod: [PR1]). Aktywne uczestnictwo w tych wydarzeniach pozwoliło mi znacząco podnieść kwalifikacje naukowe w zakresie metodologii prowadzenia badań, wymienić doświadczenia naukowe i nawiązać cenne kontakty. Konfrontacja wyników moich badań ze środowiskiem międzynarodowym była szczególnie istotna w kontekście tematyki retencji i sterowania odpływem wód opadowych, uwzględniając różnorodne warunki klimatyczne i wyzwania inżynierskie w różnych lokalizacjach geograficznych. Tematyka moich wystąpień obejmowała m.in. analizę finansową rozwiązań zbiorników retencyjnych, wykorzystania sztucznych sieci neuronowych w wymiarowaniu zbiorników oraz analizy hydrauliczne funkcjonowania obiektów retencyjnych.

W latach 2012–2015 opublikowałem szereg prac naukowych, w tym m.in. rozdział w monografii (Załącznik 4, kod: [M1_1]), publikację dotyczącą zwiększenia przepustowości przejścia syfonowego (Załącznik 4, kod: [PN_4]) oraz funkcjonowania zbiornika z systemem grawitacyjnego płukania (Załącznik 4, kod: [PN_3]).

Najważniejszym wnioskiem badawczym wynikającym z przeprowadzonych analiz jest potwierdzenie kluczowej roli funkcjonalności wielozadaniowych rozwiązań technicznych stosowanych w miejskich systemach kanalizacyjnych, których kluczowym zadaniem jest zapewnienie niezawodnego i prawidłowego ich funkcjonowania. Ponadto wykazano istotny

wpływ lokalizacji zbiornika retencyjnego, pełniącego funkcję uśredniania dopływu do oczyszczalni ścieków, na wysokość nakładów inwestycyjnych związanych z jego realizacją.

W latach 2012–2015 współtworzyłem i zgłosiłem do ochrony patentowej innowacyjne rozwiązanie techniczne w zakresie retencji wód opadowych. W tym okresie opracowałem także rozwiązanie dotyczące instalacji obiektów retencyjnych, które w roku 2025 zostało zgłoszone do ochrony patentowej na terenie Unii Europejskiej (**Załącznik 4, kod: [PAT3]**)

Wcześniej, w 2012 i 2014 roku, za opracowanie pn. *Zbiornika retencyjnego z systemem grawitacyjnego płukania* otrzymałem złoty medal na VIII International Salon of Inventions and New Technologies w Sewastopolu oraz srebrne medale na International Warsaw Invention Show (IWIS 2012 i 2014). Proponowane rozwiązanie polegało na zwiększeniu funkcjonalności kanalizacyjnych zbiorników retencyjnych w wyniku zastosowania dodatkowych komór płuczających, zlokalizowanych powyżej głównej komory akumulacyjnej, umożliwiających generowanie fali płuczającej. Taki układ pozwalał na powstanie energii potencjalnej, której wykorzystanie znacząco zwiększa efektywność procesu usuwania osadów z komory retencyjnej.

Ponadto w 2012 roku uczestniczyłem w warsztatach naukowych poświęconych modelowaniu systemów kanalizacyjnych organizowanych przez Politechnikę Łódzką, rozwijając swoje kompetencje w zakresie symulacji przepływów i projektowania sieci kanalizacyjnych. Zdobyte doświadczenie miało wpływ na przeprowadzenie badań i powstanie publikacji naukowej pt. *Analiza odpadów na potrzeby wymiarowania sieci i zbiorników retencyjnych w kanalizacji*, zamieszczonej w czasopiśmie *Gaz, Woda i Technika Sanitarna* (**Załącznik 4, kod: [PN_2]**). W tej pracy przedstawiono problematykę wykorzystania rzeczywistych danych opadowych w procesie wymiarowania zbiorników retencyjnych w systemach odwodnieniowych na terenie Polski.

Realizowane w tym okresie działania badawcze, dydaktyczne i projektowe pozwoliły mi na zdobycie wszechstronnego doświadczenia w zakresie szeroko rozumianej inżynierii środowiska, ze szczególnym uwzględnieniem problematyki sterowania przepływem i retencji wód opadowych i efektywnym projektowaniem złożonych systemów kanalizacyjnych.

W 2015 roku uzyskałem stopień doktora nauk technicznych w dyscyplinie inżynieria środowiska. Moja rozprawa doktorska pt. *Retencja wód opadowych w małych zlewniach miejskich*, przygotowana pod kierunkiem prof. dr hab. inż. Daniela Słysia, była poświęcona problematyce wymiarowania zbiorników retencyjnych realizowanych w sieciach kanalizacji deszczowej i ogólnospławnej, w oparciu o zmienne w czasie syntetyczne modele opadowe. Głównym celem pracy było sformułowanie metody pozwalającej określić wymaganą pojemność użytkową zbiornika retencyjnego przy użyciu modelowania hydrodynamicznego i dynamicznie zmiennych rozkładów opadów opisanych funkcjami matematycznymi. W wyniku szeregu symulacji hydrodynamicznych wykazano najbardziej krytyczny opad z punktu widzenia wymiarowania zbiorników retencyjnych, który ma rozkład czasowy, w którym intensywność opadu deszczu wyrażona jest jako iloczyn współczynnika kierunkowego oraz kwadratu czasu trwania opadu deszczu.

W tym okresie rozwijałem również zainteresowania związane z wykorzystaniem metod sztucznej inteligencji w projektowaniu systemów odwodnienia i badaniu retencji, wskazując na zasadność stosowania sztucznych sieci neuronowych typu Multi-Layer Perceptron w modelowaniu parametrów hydraulicznych zbiorników retencyjnych. Najważniejsze wyniki

badan dotyczące zmienności czasowej syntetycznego hietografu opadowego dla potrzeb wymiarowania retencji zostały opublikowane w czasopiśmie *Journal of Hydrology* (**Załącznik 4, kod: [PI_5]**). Etap ten pozwolił mi wypracować solidne podstawy metodologiczne w zakresie projektowania i modelowania grawitacyjnych systemów kanalizacyjnych, a także zaowocował pierwszymi wdrożeniami patentowymi i publikacjami naukowymi.

Podsumowując, w latach 2011÷2015 miałem okazję wypracować solidne podstawy metodologiczne i umiejętności praktyczne w zakresie projektowania złożonych systemów kanalizacyjnych. Ponadto opracowałem i opatentowałem szereg rozwiązań oraz dokonałem pierwszych ich wdrożeń, a także rozwinąłem kompetencje badawcze i dydaktyczne będące fundamentem dalszej pracy naukowej.

Lata 2016-2020

Okres od 2016 do 2020 roku stanowił dla mnie etap intensywnego rozwoju naukowego. Kontynuowałem i poszerzałem badania zapoczątkowane podczas realizacji pracy doktorskiej, jednocześnie szukając nowych obszarów badawczych i rozwijając własną, niezależną ścieżkę naukową. Szczególną uwagę poświęciłem wtedy zagadnieniu efektywności hydraulicznej rozwiązań retencyjnych stosowanych w systemach odwodnieniowych.

Podczas prac modelowych dostrzegłem możliwość zwiększenia bezpieczeństwa hydraulicznego zlewni poprzez maksymalizację sprawności funkcjonowania obiektów retencyjnych. Równoległe prowadziłem badania nad odzyskiem ciepła z wykorzystaniem ściekowych wymienników typu DWHR.

W tym czasie byłem zatrudniony na stanowisku asystenta w Katedrze Infrastruktury i Ekorozwoju Politechniki Rzeszowskiej, a od 1 października 2018 roku pełnię funkcję adiunkta w Katedrze Infrastruktury i Gospodarki Wodnej. W tym okresie prowadziłem badania głównie w trzech obszarach: miejskie systemy odwodnieniowe, wymiana ciepła oraz modelowanie procesów wmywania zanieczyszczeń z mikroplastików.

Równoległe z działalnością naukową prowadziłem zajęcia dydaktyczne na kierunkach: Inżynieria Środowiska, Energetyka, Architektura, Budownictwo i Ochrona Środowiska, w tym z przedmiotów takich jak: Kanalizacja i systemy odprowadzania ścieków, Podstawy technologii BIM, Instalacje budowlane, Wspomaganie komputerowe w projektowaniu infrastruktury komunalnej oraz Modelowanie infrastruktury wodnej i lądowej. W tym czasie opublikowałem także szereg artykułów naukowych będących wynikiem prac zespołowych, prowadzonych głównie pod kierunkiem Prof. Daniela Słysia. Badania te koncentrowały się na dwóch głównych obszarach tematycznych:

Obszar I – hydraulika zlewni miejskich

Prowadzone w tym obszarze badania zaowocowały między innymi publikacją dotyczącą wpływu współczynnika redukcji przepływu β na dobór geometrii zbiornika jednokomorowego (**Załącznik 4, kod: [PN_11]**). Wyniki pozwoliły na określenie warunków umożliwiających ograniczenie wymaganej pojemności retencyjnej dzięki odpowiedniemu zaprojektowaniu geometrii komory akumulacyjnej, co przyczynia się do obniżenia kosztów budowy tego typu obiektów.

Kolejnym etapem badań był rozwój technologii zwiększających efektywność rozwiązań retencyjnych. W publikacji dotyczącej analizy hydraulicznej funkcjonowania zbiornika z zastosowaniem instalacji obiektów retencyjnych (**Załącznik 4, kod: [PN_13]**) opisano

rozwiązanie pozwalające przekształcić układ jednokomorowy w wielokomorowy poprzez zastosowanie specjalnie zaprojektowanego przewodu z przelewem i zaworem zwrotnym, łączącego wlot i wylot. Zastosowanie tego rozwiązania skraca czas przepływu wód opadowych i zmniejsza wymaganą pojemność retencyjną, zwiększając efektywność kubaturową zbiornika. Podczas analiz zwrócono również uwagę na wpływ zmiennych parametrów hydraulicznych i hydrologicznych w zlewni na efektywność rozwiązań retencyjnych. Wyniki tych prac zostały m.in. zaprezentowane w publikacji dotyczącej badania czułości modeli hydraulicznych zbiorników retencyjnych z wykorzystaniem wskaźnika pojemności informacyjnej Hellwiga (**Załącznik 4, kod: [PN_10]**) oraz w publikacjach opisujących wykorzystanie metod sztucznej inteligencji do analizy wrażliwości i wymiarowania zbiorników retencyjnych (**Załącznik 4, kod: [PI_13] oraz [PN_8]**).

Przeprowadzone badania ujawniły znaczący potencjał zastosowania uczenia maszynowego w analizie systemów odwodnieniowych. Efektem tego była publikacja poświęcona wykorzystaniu sztucznych sieci neuronowych w wymiarowaniu zbiorników retencyjnych (**Załącznik 4, kod: [PI_11]**). Opracowano w niej model MLP (wielowarstwowego perceptronu) umożliwiający określenie wymaganej pojemności retencyjnej bez konieczności posiadania skalibrowanego modelu hydrodynamicznego zlewni. Za tą pracę otrzymałem Nagrodę Rektora.

Byłem również autorem rozdziału w monografii *Systematyka obiektów retencyjnych* (**Załącznik 4, kod: [M2_1]**). Jego celem był syntetyczny przegląd rozwiązań stosowanych w zlewniach zurbanizowanych. Badania te mają istotne znaczenie praktyczne, ułatwiając inżynierom wybór obiektów retencyjnych zalecanych do stosowania w zależności od istniejących lokalnych warunków hydrologicznych i urbanistycznych oraz do wspierania racjonalnego planowania systemów odwodnienia.

Znaczenie badań Obszaru I:

Opisane wyniki mają istotne znaczenie praktyczne, ponieważ umożliwiają optymalizację procesu projektowania i doboru rozwiązań retencyjnych w systemach kanalizacyjnych. Pozwalają zmniejszyć wymaganą pojemność zbiorników, obniżyć koszty inwestycyjne i poprawić efektywność hydrauliczną całego systemu. Przeprowadzone badania wspierają także wykorzystanie sztucznej inteligencji w planowaniu i ocenie rozwiązań odwodnieniowych, umożliwiając ich lepsze dostosowanie do lokalnych warunków.

Obszar II – odzysk ciepła w budownictwie

Uczestniczyłem w pracach zespołu badawczego zajmującego się oceną efektywności i zasadności stosowania ściekowych wymienników ciepła typu DWHR oraz możliwościami wykorzystania ciepła odpadowego w różnych sektorach gospodarki. Współpraca z Prof. Danielem Słysiem, dr inż. Sabiną Kordaną, dr inż. Mariuszem Starcem i dr inż. Beatą Piotrowską zaowocowała szeregiem publikacji poświęconych odzyskowi ciepła z instalacji kanalizacyjnych. Dotyczyły one m.in. analiz jednostek poziomych, oceny efektywności różnych rozwiązań wymienników oraz analizy finansowej zasadności ich stosowania, co umożliwia optymalny dobór technologii w zależności od warunków eksploatacyjnych (**Załącznik 4, kod: [PI_5], [PI_7], [PI_8], [PI_10]**). W zespole odpowiedzialny byłem m.in. za przeprowadzenie badań laboratoryjnych, współpracę nad prototypem rozwiązania, opracowanie układów pomiarowych, opracowanie modelu CFD i analizy wymiany ciepła

z wykorzystaniem oprogramowania Autodesk Simulation CFD. Wyniki badań pozwoliły określić mocne i słabe strony tych systemów oraz czynniki warunkujące ich opłacalność i efektywność. Opublikowane prace (**Załącznik 4, kod: [PN_7, PI_10]**) zostały nagrodzone Nagrodą Rektora.

Istotnym elementem mojej działalności badawczej był również udział w pracach pod kierunkiem Prof. Daniela Słysia, dotyczących możliwości wykorzystania ciepła odpadowego z gnojowicy w gospodarstwach rolnych i hodowlanych (**Załącznik 4, kod: [PI_6]**). W ramach tych badań opracowano rozwiązania instalacyjne do odzysku ciepła ze ścieków do podgrzewu wody użytkowej i technologicznej. Przeprowadzono analizę finansową tych rozwiązań oraz oceniono ich wpływ na redukcję emisji zanieczyszczeń. Wyniki badań potwierdziły zasadność wykorzystania energii cieplnej z gnojowicy, głównie ze względu na bardzo krótki okres zwrotu inwestycji w okresie od dwóch do czterech lat. Ponadto badania wykazały też, że zastosowanie pomp ciepła pozwala znacząco ograniczyć emisję szkodliwych związków, w szczególności dwutlenku węgla. Ta publikacja została wyróżniona Nagrodą Rektora.

Znaczenie badań Obszaru II:

Uzyskane wyniki badań mają istotne znaczenie praktyczne zarówno dla branży budownictwa mieszkaniowego, jak i dla rolnictwa. Wskazują one na realne korzyści ekonomiczne i środowiskowe wynikające z wdrażania systemów odzysku ciepła ze ścieków szarych i z gnojowicy. Opracowane analizy i modele pozwalają na kompleksową ocenę ich efektywności i opłacalności, wspierając projektantów i inwestorów w wyborze trafnych koncepcji. Wyniki umożliwiają racjonalne planowanie i optymalny dobór wymienników ciepła, poprawę efektywności energetycznej budynków oraz ograniczenie kosztów i emisji zanieczyszczeń w gospodarstwach rolnych.

W tym okresie nawiązałem również współpracę z Prof. dr hab. inż. Piotrem Koszelnikiem, dr hab. inż. Małgorzatą Kidą, prof. PRz i dr inż. Sabiną Książek. Efektem tej współpracy były wspólne badania nad emisją odorów z systemów kanalizacyjnych oraz metodami ich redukcji (**Załącznik 4, kod: [PI_9]**). Pozwoliło mi to poszerzyć perspektywę badawczą i dostrzec znaczenie zagadnień jakościowych, obok parametrów hydraulicznych, w inżynierii komunalnej. Artykuł powstały w ramach tej współpracy analizuje mechanizmy powstawania substancji odorowych oraz metody ich ograniczania, ze szczególnym uwzględnieniem skutecznych i coraz popularniejszych metod chemicznych. Wyniki badań mają praktyczne znaczenie przy projektowaniu i modernizacji systemów kanalizacyjnych. Pozwalają ona na identyfikację kluczowych źródeł emisji i wdrażanie skutecznych rozwiązań ograniczających uciążliwość zapachową.

Brałem również udział w licznych konferencjach naukowych, prezentując wyniki autorskich badań w formie zaplanowanych referatów w tym m.in.:

- na *INFRAEKO 2018* w Krakowie, gdzie zaprezentowałem metodę uproszczonego wymiarowania wysokosprawnych zbiorników retencyjnych (**Załącznik 4, kod: [K10]**),
- na *INFRAEKO 2018* przedstawiłem również problematykę ANN w analizie wrażliwości zbiorników retencyjnych (**Załącznik 4, kod: [K11]**),
- na *9th Conference on Interdisciplinary Problems in Environmental Protection and Engineering* w Boguszowie-Gorcach w 2017 roku przedstawiłem wyniki badań

dotyczące analizy hydraulicznej kanałów o zwiększonej pojemności retencyjnej (**Załącznik 4, kod: [K12]**),

- na konferencji *ECOpole'18* w Zakopanem przedstawiłem problematykę weryfikacji teoretycznego modelu instalacji retencyjnej z użyciem oprogramowania CFD (**Załącznik 4, kod: [K13]**).

Udział w tych konferencjach pozwolił mi na upowszechnienie wyników badań, wymianę doświadczeń z innymi specjalistami oraz zdobycie cennych uwag i inspiracji do dalszego rozwoju prowadzonych prac naukowych. Moje zaangażowanie nie ograniczało się wyłącznie do prezentacji wyników – uczestniczyłem również w pracach komitetów organizacyjnych konferencji (**Załącznik 4 kod: [KO3, KO4, KO5]**).

W latach 2016–2020 kontynuowałem działalność projektową. Pełniłem funkcję kierownika wewnątrzuczelnianego projektu badawczego finansowanego w ramach badań dla młodych naukowców pt. *Analiza wrażliwości teoretycznego modelu zbiornika retencyjnego* (**Załącznik 4, kod: [PB_A6]**), oraz wykonawcą projektu pn. *Rozwój niskoemisyjnych instalacji budowlanych i systemów komunalnych* (**Załącznik 4, kod: [PB_A5]**). W tym czasie realizowałem także współpracę z przemysłem – w 2017 roku zawarłem umowę warunkową z firmą NTS Sp. z o.o. na realizację prac badawczo-rozwojowych w ramach projektu pt. *Innowacyjne urządzenie do oczyszczania wód opadowych* (**Załącznik 4, kod: [WSG4]**). W okresie od 2016 do 2020 r., uczestniczyłem w opracowaniu sześciu rozwiązań technicznych, które uzyskały ochronę patentową. Obejmują one:

- patent na *Zbiornik retencyjny z systemem grawitacyjnego płukania* (**Załącznik 4, kod: [PAT1]**), który otrzymał wyróżnienia (**Załącznik 4, kod: [N1], [N2], [N3] i [N4]**),
- patent na *Multimedialną sieć komunalną* (**Załącznik 4, kod: [PAT2]**), który otrzymał wyróżnienia (**Załącznik 4, kod: [N5] i [N6]**),
- patenty na innowacyjne rozwiązania związane z odzyskiem ciepła i infrastrukturą kanalizacyjną, w tym: *Poziomy wymiennik ciepła* (**Załącznik 4, kod: [PAT5]**), *Łazienkowy wymiennik ciepła* (**Załącznik 4, kod: [PAT11]**), *Kanał transportowy* (**Załącznik 4, kod: [PAT9]**) oraz *Kanał przesyłowy* (**Załącznik 4, kod: [PAT10]**).

Zgłoszone i uzyskane patenty mają istotne znaczenie dla rozwoju nowoczesnych rozwiązań inżynierskich w zakresie gospodarki wodno-ściekowej i odzysku energii ze ścieków. Opracowane rozwiązania techniczne przyczyniają się do zwiększenia efektywności eksploatacyjnej systemów kanalizacyjnych, poprawy jakości ich działania oraz ograniczenia kosztów inwestycyjnych i operacyjnych. Innowacyjne konstrukcje wymienników ciepła oraz elementów infrastruktury kanalizacyjnej wspierają wdrażanie rozwiązań proekologicznych i energooszczędnych, umożliwiając racjonalne zarządzanie zasobami wodno-ściekowymi i realizację założeń zrównoważonego rozwoju w budownictwie i infrastrukturze komunalnej.

W ramach działalności popularyzatorskiej i transferu wiedzy brałem udział w pracach, których efekty przedstawiono w czasopismach branżowych, w tym m.in.:

- publikację w *Magazynie Autostrady* dotyczącą innowacyjnych wysokosprawnych zbiorników retencyjnych (**Załącznik 4, kod: [WSG5]**),
- publikację w *Nowoczesnym Budownictwie Inżynieryjnym* o innowacyjnych rozwiązaniach w infrastrukturze odwodnieniowej (**Załącznik 4, kod: [WSG6]**).

W latach 2018–2020 pełniłem także funkcje redakcyjne i recenzenckie. Byłem edytorem gościnnym numeru specjalnego czasopisma *Resources* (Załącznik 4, kod: [CK1]) oraz członkiem komitetu redakcyjnego czasopisma *Water* (Załącznik 4, kod: [CK2]). Dodatkowo recenzowałem liczne artykuły naukowe (Załącznik 4, kod: [R1-R20]).

Podsumowując, lata 2016–2020 były okresem intensywnego rozwoju, w którym pogłębiłem znacznie badania nad efektywnością grawitacyjnych systemów odwodnieniowych i odzysku ciepła ze ścieków oraz rozwinąłem kompetencje badawcze, dydaktyczne i zespołowe, tworząc fundament pod dalszą samodzielną pracę naukową. Realizowane w tym okresie badania stanowiły udaną próbę połączenia wcześniejszych doświadczeń związanych z retencją wód opadowych z nowymi kierunkami badań. Do nich zaliczam odzysk ciepła z instalacji kanalizacyjnych, zastosowanie sztucznej inteligencji w modelowaniu i projektowaniu systemów odwodnienia czy rozwój innowacyjnych urządzeń i obiektów inżynierii komunalnej.

Lata 2021-2025

Lata 2021–2025 stanowią okres najbardziej intensywnego rozwoju mojej indywidualnej działalności naukowej i badawczo-rozwojowej. Skoncentrowałem się wówczas na wdrażaniu i praktycznym wykorzystaniu wcześniej opracowanych rozwiązań technicznych oraz rozwijałem nowe kierunki badań, w szczególności związane z problematyką mikroplastików w środowisku wodnym. Głównym celem mojej aktywności badawczej w tym okresie było poszukiwanie rozwiązań zwiększających bezpieczeństwo środowiskowe i poprawę efektywności infrastruktury wodno-kanalizacyjnej, odpowiadających na wyzwania związane z negatywnymi skutkami antropopresji.

W 2021 roku ukończyłem studia podyplomowe na Politechnice Rzeszowskiej na kierunku *Technologia BIM w projektowaniu i realizacji inwestycji budowlanych*. Uzyskane kwalifikacje z zakresu nowoczesnych metod projektowania pozwoliły mi na opanowanie obsługi specjalistycznego oprogramowania (m.in. Revit, Archicad i Recap, Arcadia) oraz metodologii projektowania obiektów budowlanych w oparciu o technologie BIM, które aktywnie wdrażam pracy dydaktycznej. W tym czasie kontynuowałem intensywną działalność publikacyjną. Wyniki moich badań znalazły odzwierciedlenie w wielu artykułach naukowych poświęconych m.in.:

- zanieczyszczeniom środowiska wodnego plastyfikatorami uwalnianymi z mikroplastików z systemów kanalizacyjnych (Załącznik 4, kod: [PI_1]),
- zastosowaniu sztucznych sieci neuronowych do modelowania migracji zanieczyszczeń powstających podczas degradacji mikroplastików (Załącznik 4, kod: [PI_4]),
- modelowaniu hydrauliki sieci ciepłowniczych i wodociągowych w pracy dotyczącej algorytmu wizualizacyjnego w Pythonie (Załącznik 4, kod: [PN_5]).

Publikacje te odzwierciedlają rozwój kolejnego kierunku moich badań obejmujących zagadnienia związane z problematyką zrównoważonego zarządzania środowiskiem wodnym, modelowania procesów transportu zanieczyszczeń i wykorzystania nowoczesnych narzędzi obliczeniowych, a zwłaszcza sztucznej inteligencji w inżynierii środowiska.

Brałem czynny udział w konferencjach naukowych, m.in. prezentując temat emisji estrów kwasu ftalowego do środowiska wodnego z elementów systemów kanalizacyjnych podczas 1st International Conference *Emerging environmental contaminants – current status, challenges and perspectives* w Rzeszowie (Załącznik 4, kod: [K9]). Udział w konferencjach

umożliwił mi nawiązanie kontaktów naukowych, udział w dyskusjach z ekspertami oraz uzyskanie cennych uwag, które pomogły w dalszym rozwijaniu prowadzonych badań.

W latach 2021–2025 byłem aktywnym uczestnikiem kilku projektów badawczych, m.in. jako wykonawca projektu finansowanego przez Podkarpackie Centrum Innowacji pt. *Badanie innowacyjnego wymiennika ciepła odpadowego ze ścieków szarych w obiektach mieszkalnych* (Załącznik 4, kod: [PB3]). W 2025 roku rozpocząłem realizację projektu (w charakterze wykonawcy) finansowanego przez Narodowe Centrum Nauki w ramach konkursu OPUS 27 pt. *Rola starzenia abiotycznego i biotycznego w usuwaniu mikroplastików w procesie koagulacji z wykorzystaniem naturalnych i odpadowych koagulantów* (Załącznik 4, kod: [PB5]). Moja rola w tym projekcie obejmuje przede wszystkim przygotowanie i analizę danych, w tym analizy ekonomiczne, oraz wykorzystanie modeli uczenia maszynowego, co pozwoli na ocenę opłacalności wdrożeń i opracowanie praktycznych rekomendacji.

W tym samym okresie uczestniczyłem w projekcie *Regionalna Inicjatywa Doskonałości* (Załącznik 4, kod: [PB_A7]), w ramach której m.in. prowadziłem badania dotyczące wymiany ciepła i konwekcji wymuszonej przy zastosowaniu materiałów zmiennofazowych, w których odpowiedzialny byłem za modelowanie CFD. Rezultaty prowadzonych w międzynarodowym zespole badań zostały przedstawione w publikacji naukowej (Załącznik 4, kod: [PI_2]).

Rozwijałem także działalność związaną z projektowaniem, rozwojem i wdrażaniem nowych rozwiązań technicznych, czego efektem było uzyskanie kolejnych patentów i zgłoszeń patentowych, którymi są:

- zgłoszenie patentowe dotyczące zbiornika retencyjno-oczyszczającego (Załącznik 4, kod: [PAT4]),
- patenty na innowacyjne wymienniki ciepła (Załącznik 4, kod: [PAT5, PAT6, PAT7, PAT8, PAT11]),
- patent na wpust kanalizacyjny (Załącznik 4, kod: [PAT12]),
- patenty dotyczące separatorów zanieczyszczeń w kanalizacji (Załącznik 4, kod: [PAT14, PAT15, PAT16]),
- patent na próg drogowy, zwłaszcza zwalniający (Załącznik 4, kod: [PAT13]).

Opracowane innowacyjne rozwiązania (Załącznik 4 kod:[PAT3], [PAT5], [PAT9], [PAT10], [PAT11], [PAT12] i [PAT13]) zostały nagrodzone Nagrodą Rektora.

Równoległe z działalnością badawczo-rozwojową prowadziłem prace o charakterze eksperckim i projektowym. W 2024 roku uczestniczyłem w wykonaniu zamawianej ekspertyzy dotyczącej transportu hydraulicznego ścieków i szlamów, które powstają w zakładowym systemie separacji wraz z zaproponowaniem rozwiązań ograniczających ilość osadów, ze szczególnym uwzględnieniem kanałów technologicznych (Załącznik 4, kod: [E1]). Moja rola w ekspertyzie dotyczyła przeprowadzenia pomiarów przepływu oraz wyznaczeniu profili prędkości w strategicznych sekcjach linii technologicznej.

W 2022 roku przygotowałem Program Funkcjonalno-Użytkowy dla zadania *Budowa zbiornika uśredniającego dopływ do oczyszczalni ścieków ogólnospławnych w Mielcu* (Załącznik 4, kod: [E2]).

Głównym zakresem prac w ramach wykonywanych ekspertyz było zidentyfikowanie problemów technologicznych oraz opracowanie praktycznych rekomendacji, które pozwoliły

zamawiającym na optymalizację procesów i ograniczenie kosztów związanych z ilością osadów oraz planowaniem inwestycji retencyjnych.

Aktywnie angażowałem się także w prace organizacyjne i eksperckie na rzecz środowiska naukowego. Od 2024 roku pełnię funkcję eksperta wiodącego w Narodowym Centrum Badań i Rozwoju (NCBR), dokonując recenzji trzech wniosków o finansowanie badań naukowych w ramach strategicznego programu badawczego *Hydrostrateg* (**Załącznik 4, kod: [UC1]**).

W latach 2021–2025 recenzowałem także liczne artykuły naukowe, w większości dla wydawnictwa Elsevier. Dodatkowo w 2022 roku zainicjowałem i współtworzyłem działalność Koła Naukowego Infrastruktury i Energetyki przy Katedrze Infrastruktury i Gospodarki Wodnej na Wydziale Budownictwa, Inżynierii Środowiska i Architektury Politechniki Rzeszowskiej. Koło skupia się na koordynacji i organizacji przedsięwzięć naukowych, poszerzaniu wiedzy członków o nowoczesne technologie inżynierii komunalnej i energetycznej oraz integrowaniu studentów wokół wspólnych zainteresowań.

Realizowana w tym okresie działalność badawczo-rozwojowa miała charakter interdyscyplinarny, łącząc zagadnienia retencji wód opadowych, inżynierii kanalizacyjnej, odzysku ciepła ze ścieków oraz problematykę mikroplastików w środowisku wodnym. Efektem tej pracy były zarówno rozwiązania patentowe i wdrożeniowe, jak i publikacje naukowe, stanowiące mój wkład w rozwój innowacyjnych technologii inżynierii środowiska. Opisany szeroki zakres tematyczny osiągnięć ma charakter komplementarny i zasadniczo wspiera moje główne osiągnięcia habilitacyjne.

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

Moja aktywność naukowa obejmuje szereg działań realizowanych w ścisłej współpracy z krajowymi i zagranicznymi ośrodkami naukowymi. Były to zarówno staże badawcze, współautorstwa publikacji, jak i kierowanie zespołami wieloinstytucjonalnymi.

Staż naukowy – Lublin (2018)

W 2018 roku odbyłem miesięczny staż badawczy w Katedrze Zaopatrzenia w Wodę i Usuwania Ścieków na Wydziale Inżynierii Środowiska Politechniki Lubelskiej, ukierunkowany na metody komputerowego wspomaganego modelowania z wykorzystaniem narzędzi uczenia maszynowego (**Załącznik 4, kod: [S1]**). Szczególną uwagę poświęciłem problematyce dotyczącej zbiorników retencyjnych współpracujących z siecią odwodnieniową, rozwoju funkcjonalności sterowania w czasie rzeczywistym (RTC) i wykorzystania uczenia maszynowego przy rozwiązywaniu zagadnień w problemach środowiskowych. Zakres prac obejmował m.in.

- opracowanie algorytmu wymiarowania zbiornika retencyjnego aktywnie współpracującego z kanałami kanalizacyjnymi,
- stworzenie i przetestowanie programu komputerowego w języku VBA,
- wykorzystanie sztucznych sieci neuronowych w procesach środowiskowych.

Realizacja tego stażu umożliwiła rozwój moich badań własnych, które znalazły odzwierciedlenie w publikacjach (**Załącznik 4, kod: [C_A1, C_A2, C_A3]**), a także były prezentowane na konferencji międzynarodowej (**Załącznik 4, kod: [K8]**). Z kolei pogłębienie

wiedzy w zakresie ML m.in. przy użyciu sieci neuronowych przyczyniły się także do powstania publikacji (**Załącznik 4, kod: [PI_3] oraz [PI_4]**). Za tą pracę otrzymałem Nagrodę Rektora.

Równocześnie podczas pobytu na stażu nawiązałem nowe kontakty naukowe z pracownikami uczelni goszczącej, które zaowocowały rozpoczęciem współpracy z dr. inż. Pawłem Suchorabem. W jej wyniku powstał nowy zespół naukowy, którego zostałem liderem, realizujący projekt (**Załącznik 4, kod: PB_A4**). Projekt dotyczył badań nad opracowaniem prototypu kanalizacyjnego zbiornika grawitacyjno-pompowego dla wód deszczowych w warunkach zbliżonych do rzeczywistych, wraz z dedykowanym systemem sterowania. Badania były prowadzone w okresie od 23.10.2023 do 15.12.2023 r. (**Załącznik 4, kod: [T3]**).

Staż w ramach programu Staż Sukcesem Naukowca– Rzeszów (2022)

W 2012 roku odbyłem 6-miesięczny staż w firmie Gastro-Bud w ramach programu *Staż sukcesem naukowca* (**Załącznik 4, kod: [S2]**). W trakcie stażu zdobyłem praktyczne doświadczenie w branży budowlanej, równocześnie prowadząc prace badawcze. Efektem końcowym stażu było opracowanie dla przedsiębiorstwa nowego rozwiązania – urządzenia do rozsączania wód opadowych. Celem prac było zaprojektowanie studni infiltracyjnej do zagospodarowania wód opadowych z wymiennym wkładem filtrującym, mającej na celu ograniczenie tempa kolmatacji gruntu i wydłużenie efektywnego czasu działania urządzenia. Kopie potwierdzenia odbycia stażu zamieszczono w *Załączniku 5d*.

Grant Visegrad Strategic Program (2012–2015)

Moja współpraca naukowa z zagranicznymi uczelniami dotyczyła także międzynarodowego projektu pt. *Sustainable Rainwater Management in the V4 Countries* (**Załącznik 4, kod [PR1]**) finansowanego w ramach Visegrad Strategic Program. Projekt realizowano wspólnie z Wyższą Szkołą Techniczną w Brnie (Vysoké učení technické v Brně), Uniwersytetem Technicznym w Koszycach (Technická univerzita v Košiciach), Uniwersytetem Mendla w Brnie (Mendelova univerzita v Brně) i Uniwersytetem w Miskolcu (Miskolci Egyetem). W efekcie powstała publikacja (**Załącznik 4, kod: [PN_1]**).

Podczas uczestnictwa w tym grantie prowadziłem badania nad wpływem zmienności opadów deszczu na metodykę wymiarowania zbiorników retencyjnych, prezentując wyniki na konferencjach międzynarodowych (**Załącznik 4, kod: [K1, K3, K4]**). Współpraca ta miała charakter trwały i była kontynuowana także w kolejnych latach, czego efektem było podpisanie w 2023 roku umowy dotyczącej opracowania innowacyjnych rozwiązań z zakresu gospodarki komunalnej (**Załącznik 4, kod: [TU_2]**). W wyniku tych działań opracowano *spiralny wymiennik ciepła* (**Załącznik 4, kod: [PAT7]**), który został zgłoszony do ochrony patentowej w UPRP.

Współpraca naukowa – Chorwacja

Nawiązałem także współpracę z badaczem Kristijanem Iličićem z Water Supply and Sewage Ltd, Biuro Dyrektora Generalnego w Zagrzebiu (Chorwacja), w zakresie badań nad metodologią wymiarowania zbiorników retencyjnych. Wynikiem współpracy było wydanie wspólnej publikacji dotyczącej zaawansowanych metod wymiarowania systemów odwodnieniowych z uwzględnieniem retencji kubaturowej (**Załącznik 4, kod: [PI_12]**).

Współpraca naukowa – Brazylia

Od 2017 roku współpracuję z Prof. Henrique Pizzo, który w tym okresie pracował na Wydziale Inżynierii Lądowej, Uniwersytet Estácio w Juiz de Fora, w Brazylii i oraz w Miejskiej Spółce Wodociągów i Kanalizacji Juiz de Fora, Brazylia. Współpraca ta umożliwiła realizację badań w zespołach wieloosobowych i zaowocowała publikacjami (**Załącznik 4, kod: [C_A5, PI_4, C_B2 oraz PN_5]**) obejmującymi tematykę systemów gospodarowania wodami opadowymi, analizy zanieczyszczeń mikroplastikami i modelowania systemów wodociągowych. Współpraca ta jest aktywnie kontynuowana do chwili obecnej.

Wyjazdy w ramach programu Erasmus+

Podczas mojej pracy naukowej aktywnie uczestniczyłem w staraniach o wyjazdy w ramach programu Erasmus+. Szczególnie istotne merytorycznie wyróżniam dwa z nich:

- **Erasmus+ Oradea – rok 2023 (Załącznik 4, kod: [PR2]):**

Uczestnictwo w tej edycji programu pozwoliło mi na wymianę doświadczeń naukowych i dydaktycznych z naukowcami i studentami, oraz nawiązanie współpracy z prof. Marinela Bodog, co zaowocowało wspólnymi badaniami nad mikroplastikami, których wyniki opublikowano w (**Załącznik 4, kod: [CB_2]**).

- **Erasmus+ Koszyce (rok 2018) (Załącznik 4, kod: [PR3]):**

Realizacja tego wyjazdu umożliwiła mi nawiązanie kontaktów naukowych z Prof. Martyną Zelenakową, czego następstwem było podjęcie badań ukierunkowanych na opracowanie rozwiązania spiralnego wymiennika ciepła (**Załącznik 4, kod: [PAT7]**) oraz wjazdu hermetycznego, który jest obecnie w fazie badań.

Współpraca z naukowcami w ramach wieloosobowych zespołów badawczych

Po doprowadzeniu technologii inteligentnego zbiornika retencyjnego (**Załącznik 4, kod: [T2]**) do poziomu TRL 2 rozpocząłem aktywne poszukiwania współpracowników w celu utworzenia komplementarnego zespołu naukowego odpowiedniego do realizacji dalszych prac rozwojowych. W efekcie powstał interdyscyplinarny zespół, w którego skład weszli specjaliści:

- dr Małgorzata Wosiek - Uniwersytet Rzeszowski,
- dr inż. Przemysław Hawro - Państwowa Wyższa Szkoła Techniczno-Ekonomiczna w Jarosławiu,
- dr hab. inż. Tadeusz Kwater - Państwowej Akademii Nauk Stosowanych im. ks. Bronisława Markiewicza w Jarosławiu,
- dr Damian Dubis - Państwowa Wyższa Szkoła Zawodowa im. Stanisława Pigonia w Krośnie.

W ramach tej międzyuczelnianej współpracy utworzono zespół badawczo-rozwojowy do realizacji projektu badawczego, którego zostałem liderem (**Załącznik 4, kod: [PB_2]**). Zespół przeprowadził niezbędne prace badawczo-rozwojowe, które umożliwiły podniesienie poziomu gotowości technologicznej (**Załącznik 4, kod: [T3]**) do poziomu TRL 4.

Współpraca z Narodowym Centrum Badan i Rozwoju - Członek Komitetu Sterującego Rządowym Programem Strategicznym Hydrostrateg

W 2024 roku zostałem członkiem Komitetu Sterującego Rządowym Programem Strategicznym *Hydrostrateg* (**Załącznik 4, kod: [ZE1]**). W ramach umowy zawartej z Narodowym Centrum Badan i Rozwoju uczestniczyłem w pracach Komitetu, realizując

zadania związane z przygotowaniem programu i określeniem kierunków badawczych. Moje działania obejmowały m.in. udział w pracach nad aktualizacją programu, identyfikację szans i wyzwań związanych z rozwojem urządzeń i technologii wspierających efektywność gospodarki wodnej w miastach oraz współdziałał w opracowaniu zakresu tematycznego dotyczącego problematyki *woda w mieście*.

Kopie osiągnięć opracowywanych w więcej niż jednej jednostce przedstawiono w **Załączniku 7**.

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

Moja aktywność zawodowa na Politechnice Rzeszowskiej im. Ignacego Łukasiewicza, oprócz działalności badawczej obejmuje również działalność dydaktyczną, organizacyjną oraz popularyzującą naukę.

☰ Działalność dydaktyczna

- W ramach działalności dydaktycznej prowadziłem wszystkie rodzaje zajęć, w tym wykłady, zajęcia projektowe, ćwiczenia problemowe i laboratoryjne na pięciu kierunkach studiów (Inżynieria Środowiska, Ochrona Środowiska, Budownictwo, Architektura i Energetyka), a także na studiach podyplomowych (Technologia BIM w projektowaniu i realizacji inwestycji budowlanych) z szesnastu przedmiotów, takich jak:
 - Infrastruktura podziemna
 - Instalacje budowlane
 - Instalacje sanitarne
 - Kanalizacja i systemy odprowadzania ścieków
 - Melioracja
 - Techniki pomiarowe i sterowanie transportem wody i ścieków
 - Ujęcia wód podziemnych
 - Wspomaganie komputerowe w projektowaniu infrastruktury
 - Kanalizacja i systemy odprowadzania ścieków
 - Systemy odprowadzania ścieków
 - Nowoczesne kształtowanie rzek
 - Technologie proekologiczne
 - Pompy ciepła i energia geotermalna
- Opracowanie i prowadzenie zajęć z czterech przedmiotów autorskich, takich jak:
 - Projektowanie instalacji w technologii BIM
 - Modelowanie infrastruktury wodnej i lądowej
 - Szacowanie potencjału energetycznego odnawialnych źródeł energii
 - Podstawy technologii BIM
- Układanie planów zajęć na dwóch kierunkach studiów (Inżynierii Środowiska oraz Ochrona Środowiska)
- Współautorstwo i koordynacja publikacji przygotowanych wspólnie ze studentami (**Załącznik 4, kod: [PN_9]**).
- Prowadzenie zajęć dydaktycznych w Wyższej Szkole Inżynieryjno-Ekonomicznej z siedzibą w Rzeszowie, ul. Miłocińska 40, 35-232 Rzeszów, z przedmiotu wiodącego

Infrastruktura komunalna miast w terminach: od 06.05.2017 do 07.07.2017 r. oraz od 04.03.2016 do 30.06.2016 r.

- Promotor 49 prac dyplomowych (31 prac inżynierskich, 18 prace magisterskie).
- Recenzent 82 prac dyplomowych (49 prac inżynierskich, 33 prace magisterskie).
- Promotor pomocniczy w dwóch rozprawach doktorskich:
 - ❑ Dr inż. Mariusz Starzec (obrona 16.09.2020), *Modelowanie innowacyjnych systemów odwodnieniowych*, promotor: prof. dr hab. inż. Józef Dziopak.
 - ❑ Dr inż. Beata Piotrowska (18.10.2023), *Badania odzysku ciepła odpadowego w instalacjach kanalizacyjnych obiektów mieszkaniowych*, promotor: prof. dr hab. inż. Daniel Słyś.
- Prowadzenie zajęć z przedmiotu *Programy komputerowe w projektowaniu infrastruktury komunalnej*, realizowanych w ramach realizowanego projektu *Nowa jakość – zintegrowany program rozwoju Politechniki Rzeszowskiej* (POWER.03.05.00-00-Z209/17).

Działalność organizacyjna i popularyzująca naukę

- Kierowanie praktykami studenckimi na kierunkach:
 - Inżynieria Środowiska (2017 - obecnie)
 - Ochrona Środowiska (2017 – 2018)
 - Energetyka (2022 – obecnie)
- Prezentacja wyników badań dotyczących opracowanej technologii pt. *Inteligentny system sterowania indywidualną retencją wód deszczowych dla systemów kanalizacyjnych* podczas Carpathian Startup Fest i INTARG 2023, a także promocja tych osiągnięć za pośrednictwem mediów przez Radio Rzeszów oraz Telewizja TVP.
- Prowadzenie stron internetowych Międzynarodowej Konferencji Infraeko w czterech edycjach w latach 2012, 2014, 2016 i 2018.
- Opiekun Koła Naukowego Infrastruktury i Energetyki (KNIiE) w latach 2021–2025.
- Członek Stowarzyszenia Hydrologów Polskich (SHP) od 2020 roku (**Załącznik 4, kod: [CK01]**).
- Udział w promocji uczelni w szkołach średnich, mający na celu zachęcenie przyszłych studentów do podjęcia studiów na Politechnice Rzeszowskiej.
- Publikacje w dwóch czasopismach branżowych, takich jak *Magazyn Autostrady* i *Nowoczesne Budownictwo Inżynieryjne*, dotyczące rozwiązań hydraulicznych wykorzystywanych w gospodarce wodami opadowymi w zlewniach miejskich (**Załącznik 4, kod: [PN_12, PN_6]**).
- Pełnienie funkcji członka Komisji ds. Kształcenia Wydziału Budownictwa, Inżynierii Środowiska i Architektury w latach 2020 – obecnie.
- Członek Rady Wydziału Budownictwa, Inżynierii Środowiska i Architektury Politechniki Rzeszowskiej – kadencja 2021 – 2024.

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

Istotne aspekty mojej kariery zawodowej, które uważam za ważne z perspektywy osiągnięć i rozwoju zawodowego:

- Nagrody Rektora za cykl publikacji oraz autorstwo/współautorstwo publikacji naukowych w latach 2017–2024.

- Nagrody Rektora za uzyskanie patentów w latach 2018, 2020, 2021 i 2024.
- Dyplom Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego za projekt *Multimedialna sieć komunalna* (Warszawa, 2015).
- Złoty medal z wyróżnieniem za innowacyjne rozwiązanie *Instalacja obiektów retencyjnych* na International Warsaw Invention Show IWIS 2015 (Warszawa).
- Złoty medal za rozwiązanie patentowe *Multimedialna sieć komunalna* na International Warsaw Invention Show IWIS 2014 (Warszawa).
- Srebrny i brązowy medal za dwa rozwiązania patentowe (1) *Zbiornik retencyjny z systemem grawitacyjnego płukania* i (2) *Przelew kanalizacyjny* na IWIS 2012 i 2014 (Warszawa) oraz na wystawie VIII International Salon of Inventions *New Time* (Sewastopol, 2012).
- Dyplom za zajęcie II miejsca w konkursie Młody Wynalazca za rozwiązanie *Zbiornik retencyjny z systemem grawitacyjnego płukania* (Katowice, 2012).
- Stypendium Podkarpackiego Funduszu Stypendialnego dla doktorantów (2013).
- Wyróżnienie pracy doktorskiej pt. *Retencja wód opadowych w małych zlewniach miejskich* (2016).
- Przygotowanie kilku wniosków o finansowanie projektów badawczych do Narodowego Centrum Nauki, Narodowego Centrum Badań i Rozwoju oraz Podkarpackiego Centrum Innowacji.
- Udział w szkoleniu z zakresu zarządzania zespołem – warsztaty menedżerskie *Kierowanie zespołem* organizowane przez KC Centrum Rozwoju (Rzeszów, 2019).
- Udział w szkoleniu w ramach programu *Staż Sukcesem Naukowca* dotyczącym innowacji i komercjalizacji wyników badań (Rzeszów, 2013).
- Udział w szkoleniu *Komercjalizacja wiedzy* na Politechnice Świętokrzyskiej w ramach programu *Kreator Innowacyjności* Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego (Kielce, 2013).
- Członek zarządu Kasy Zapomogowo-Pożyczkowej działającej przy Politechnice Rzeszowskiej

Mój udokumentowany wielokierunkowy dorobek naukowy, badawczo-rozwojowy, wdrożeniowy, dydaktyczny i organizacyjny upoważnia mnie do złożenia formalnego wniosku o otwarcie i przeprowadzenie procedury dotyczącej przewodu habilitacyjnego w uprawianej dyscyplinie Inżynieria środowiska, Górnictwo i Energetyka.

Kamil Pochwat

.....
(podpis wnioskodawcy)