

Załącznik 2
do wniosku habilitacyjnego
dr inż. Bartosz Szelaąg

**Autoreferat w języku polskim
wraz z informacją o współpracy naukowej, osiągnięciach
dydaktycznych i działalności organizacyjnej**

Spis treści:

1. Imię i nazwisko
2. Posiadane stopnie i dyplomy
3. Przebieg pracy zawodowej
4. Wykazanie osiągnięcia naukowego wynikającego z art. 16 ust. 2 Ustawy z dnia 14 marca 2003 roku o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. 2017 poz. 789)
5. Działalność naukowo-badawcza w latach 2006 – 2013 (przed uzyskaniem stopnia doktora)
6. Działalność naukowo-badawcza w latach 2013 – 2018 (po uzyskaniu stopnia doktora)
7. Zakres analiz prowadzonych po uzyskaniu stopnia doktora
8. Działalność dydaktyczna i organizacyjna

1) Imię i nazwisko: Bartosz Szelaąg

2) Posiadane stopnie i dyplomy

- Magister inżynier – Politechnika Świętokrzyska, Wydział Budownictwa Lądowego, Dyscyplina: Inżynieria Środowiska, Specjalność: Inżynieria Komunalna, 2006, tytuł pracy magisterskiej: *Optymalny dobór metody układania kabli teleinformatycznych w kanalizacji ściekowej.*
- Doktor inżynier – Politechnika Świętokrzyska, Wydział Inżynierii Środowiska, Geomatyki i Energetyki, Dyscyplina: Inżynieria Środowiska, Specjalność: Inżynieria Wodna, 2013, tytuł rozprawy doktorskiej: *Wpływ kształtu hydrogramu dopływu na pojemność i dobór upustów małego zbiornika retencyjnego.*
- Studia podyplomowe – Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Środowiska, Dyscyplina: Inżynieria Środowiska, Specjalność: Klimatyzacja i Chłodnictwo, 2010, tytuł pracy dyplomowej: *Analiza wpływu warunków hydrologicznych w rzece na funkcjonowanie pomp ciepła.*

3) Przebieg pracy zawodowej

- 01.03.2007 – 30.10.2007 – asystent projektanta, Pracownia Projektowa GlobTech Centrum w Kielcach,
- 05.11.2007 – 08.02.2008 – asystent projektanta, Przedsiębiorstwo Projektowo–Usługowo–Handlowe w Kielcach,
- 01.03.2008 – 31.08.2008 – asystent projektanta, Pracownia Projektowa PIOSAN w Kielcach,
- 01.03.2009– 31.08.2012 – asystent, Katedra Inżynierii Wodnej, Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, Politechnika Świętokrzyska w Kielcach,
- 01.09.2012 – 29.05.2013 – asystent, Katedra Geotechniki, Geomatyki i Gospodarki Odpadami, Wydział Inżynierii Środowiska, Geomatyki i Energetyki, Politechnika Świętokrzyska w Kielcach,
- 01.06.2013 – obecnie – adiunkt, Katedra Geotechniki, Geomatyki i Gospodarki Odpadami, Politechnika Świętokrzyska w Kielcach,
- 01.06.2016 – 31.12.2016 – asystent projektanta, Pracownia Projektowa PIOSAN w Bilczy,
- 01.03.2017 – 31.12.2017 – inżynier budowy w firmie „Mbak Sieci i Instalacje Sanitarne” w Daleszycach,

- 01.04.2018 – 30.06.2018 – inżynier budowy w firmie „Mbak Sieci i Instalacje Sanitarne” w Daleszycach.

4) Wskazanie osiągnięcia naukowego wynikającego z art. 16 ust. 2 Ustawy z dnia 14 marca 2003 roku o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. 2017 poz. 789)

Głównym osiągnięciem naukowym jest monografia pt.: „*Modelowanie matematyczne, optymalizacja i sterowanie pracą przepływowych oczyszczalni ścieków*”, poświęcona zagadnieniom tworzenia modeli statystycznych do poprawy efektywności przebiegu procesów biochemicznych w oczyszczalniach ścieków. Praca ta stanowi oryginalne opracowanie o charakterze interdyscyplinarnym z zakresu inżynierii środowiska, matematyki i statystyki stosowanej oraz informatyki, w którym omówiono szeroko zagadnienia opracowywania modeli matematycznych za pomocą metod eksploracji danych (ang. data mining). Opracowane i opisane w pracy modele są przeznaczone do optymalizacji i sterowania biologicznymi oczyszczalniami ścieków ze szczególnym uwzględnieniem aspektów technologicznych. Przedstawiona praca stanowi równocześnie odpowiedź na narastający obecnie problem, w jaki sposób eksploatować w sposób ekonomiczny oczyszczalnię ścieków prowadząc jednocześnie do poprawy jakości ścieków oczyszczonych wprowadzanych do odbiornika, ograniczając w rezultacie zanieczyszczanie środowiska [1, 2]. Kwestia ta obecnie jest jedynie ogólnie zdefiniowana w postaci aktów prawnych w ustawodawstwie unijnym i krajowym, narzucających wielkości dopuszczalnych stężeń wskaźników jakości ścieków oczyszczonych, które nie mogą zostać przekroczone. W kraju obowiązuje w tym zakresie Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 18 listopada 2014 r. w sprawie warunków, jakie należy spełnić przy wprowadzaniu ścieków do wód lub do ziemi, oraz w sprawie substancji szczególnie szkodliwych dla środowiska wodnego. W ustawodawstwie unijnym jest to przede wszystkim dyrektywa 91/271/EWG odnosząca się do kwestii oczyszczania ścieków komunalnych. Zgodnie z obowiązującymi aktami prawnymi podstawą projektowania oczyszczalni jest równoważna liczba mieszkańców (RLM), która stanowi podstawę doboru technologii oczyszczania ścieków. Zaprojektowany układ technologiczny ma zapewniać odpowiednie usunięcie związków organicznych (BZT_5 , $ChZT_{(Cr)}$), azotu ogólnego (N_{og}) i fosforu ogólnego (P_{og}), co ustalono w Rozporządzeniu z dnia 18 listopada 2014 roku. Natomiast sposób uzyskania wymaganego stopnia oczyszczania ścieków, biorąc pod uwagę bilans energetyczny obiektu, jest dowolny i zależy od przedsiębiorstwa zarządzającego oczyszczalnią ścieków.

W warunkach rzeczywistych wartości wskaźników jakości przyjęte do obliczeń oczyszczalni ścieków nie przyjmują wartości stałych, ale zmieniają się w szerokim zakresie. Równocześnie zmienia się w czasie ilość dopływających ścieków i temperatura powietrza, co ma istotny wpływ na przebieg procesów oczyszczania przebiegających w reaktorze biologicznym i w rezultacie na jakość odpływających ścieków. Dlatego, w celu uzyskania na wylocie z oczyszczalni wymaganych wartości wskaźników jakości ścieków, zachowania ciągłości procesów zachodzących w reaktorze biologicznym i utrzymania wysokiej niezawodności działania oczyszczalni, konieczne jest aktywne sterowanie i bieżąca kontrola nastaw reaktora biologicznego. W praktyce jest to zadanie bardzo skomplikowane, wymagające ciągłych zmian wielu nastaw regulatorów w taki sposób, aby zapewnić wymaganą jakość ścieków oczyszczonych i aby sterując jednym procesem, nie zakłócić innych procesów przebiegających w bioreaktorze. Z uwagi na to, że eksploatacja oczyszczalni ścieków wymaga równoczesnej kontroli wielu procesów, stosuje się szereg urządzeń pomiarowych zamontowanych na jej obiektach technologicznych. Idealną sytuacją byłoby prowadzenie ciągłych pomiarów ilości i jakości ścieków na dopływie, nastaw reaktora oraz jakości ścieków na odpływie z oczyszczalni. Obecnie większość obiektów krajowych posiada monitoring on line nastaw reaktora biologicznego i jakości ścieków na odpływie. Natomiast rzadko występują przypadki, gdy prowadzone są ciągle pomiary jakości ścieków na dopływie do obiektu. W tych przypadkach wartości wskaźników jakości ścieków dopływających wyznaczane są za pomocą oznaczeń analitycznych, jednak są one mierzone okresowo a nie w sposób nieciągły. Stan ten wynika z faktu, że zgodnie z obowiązującymi aktami prawnymi nie ma takich wymagań i zachodzi jedynie potrzeba okresowej oceny efektywności działania oczyszczalni ścieków w zależności od wielkości obiektu. Mimo tego można stwierdzić, że w oczyszczalniach ścieków zarówno o wysokim stopniu zautomatyzowania i rozbudowanym systemie monitoringu, jak i w obiektach, w których pomiary wykonywane są głównie za pomocą oznaczeń laboratoryjnych, gromadzone są ogromne ilości danych, które można wykorzystać do opracowania różnych modeli procesowych. Fakt ten wzbudza szerokie zainteresowanie naukowców, na co wskazuje znaczna liczba publikacji zagranicznych [3,4,5]. W publikacjach tych na podstawie zgromadzonych danych pomiarowych opracowuje się modele matematyczne do prognozowania jakości ścieków na odpływie oraz kontroli przebiegu procesów nitrifikacji, denitrifikacji i defosfatacji. Do tego celu można zastosować zarówno modele fizykalne, jak i modele parametryczne [6,7,8]. Jednak z uwagi na dużą złożoność modeli fizykalnych i wynikające z tego faktu długie czasy obliczeń pojedynczych symulacji takich modeli, co ma istotne znaczenie w przypadku ich stosowania w zadaniach optymalizacji i sterowania, obecnie

w większości przypadków modelowania oczyszczalni ścieków stosuje się prostsze obliczeniowo modele parametryczne tzw. szarej lub czarnej skrzynki. Z punktu widzenia eksploatatora oczyszczalni ścieków interesujące jest nie tylko modelowanie i prognozowanie przebiegu procesu oczyszczania, ale także sterowanie nim, to znaczy wyznaczanie takich nastaw bioreaktora, aby zapewnić przebieg procesu gwarantujący zadane wartości wskaźników jakości ścieków na odpływie i jednocześnie zminimalizować koszty eksploatacji obiektu. Takie postawienie zadania cieszy się ostatnio coraz większym zainteresowaniem badaczy, co potwierdza zwiększająca się liczba prac na ten temat w kraju i zagranicą [3,4,9], przy czym odnośnych publikacji krajowych jest niestety stosunkowo mało [10,11,12]. W pracach tych wykazuje się, że dla obiektów, w których gromadzone są dane w trybie ciągłym (dotyczące ilości i jakości ścieków na dopływie i odpływie z oczyszczalni oraz parametrów operacyjnych bioreaktora), wyznaczane modele pozwalają na uzyskanie zadowalających prognoz jakości ścieków na wylocie i również wskazują na możliwości obniżenia kosztów eksploatacyjnych. W przypadku braku ciągłych pomiarów jakości ścieków na dopływie do oczyszczalni, gdy wskaźniki jakości są oznaczane metodą analityczną, wyznaczane modele matematyczne są mało dokładne i mogą mieć jedynie ograniczone zastosowanie praktyczne. Z uwagi na ograniczoną w takim przypadku liczbę pomiarów z dopływu do oczyszczalni dobierane na ich podstawie wartości nastaw w bioreaktorze są zwykle nieoptymalne. W efekcie prowadzi to do zawyżonych kosztów eksploatacyjnych i również problemów z osiągnięciem zadanych wartości wskaźników jakości ścieków oczyszczonych.

Biorąc powyższe pod uwagę, można sformułować następujące dwa pytania: jak modele użyteczne dla celów sterowania oczyszczalnią wyznaczać w przypadku, gdy jest do dyspozycji komplet danych pomiarowych uzyskiwanych z monitoringu on – line, i jak tworzyć użyteczne modele w sytuacji, gdy są problemy z pozyskiwaniem takich danych. Można powiedzieć, że jest to w ogólności problem optymalizacji pracy oczyszczalni dla dwóch przypadków odniesionych do jakości posiadanych danych pomiarowych. Dla rozwiązania każdego zadania optymalizacji należy dysponować modelem matematycznym badanego procesu oraz należy zdefiniować odpowiednie kryteria optymalizacyjne. Podstawowym kryterium oceny efektywności pracy oczyszczalni jest kryterium ekonomiczne: proces oczyszczania powinien być realizowany w taki sposób, aby uzyskać najniższe koszty eksploatacji przy zapewnieniu wymaganej jakości ścieków oczyszczonych. Kolejne kryteria mogą mieć charakter techniczny i odnosić się do utrzymania na odpowiednim poziomie przebiegu poszczególnych procesów w reaktorze biologicznym, do minimalizacji zużycia dawkowanych środków chemicznych lub minimalizacji zużycia tlenu na napowietrzanie ścieków. Kryteriów technicznych może być

wiele i jest to uzależnione od tego, co technolog prowadzący proces oczyszczania chce przede wszystkim uzyskać. Kryteriami stanowiącymi kombinację kryterium ekonomicznego i kryteriów technicznych są kryteria niezawodnościowe. W takim przypadku można skoncentrować się na analizie niezawodności działania obiektu w odniesieniu do jednego procesu najistotniejszego dla technologa lub do kilku procesów równocześnie.

W ostatnich latach przedstawiono szereg prac dotyczących zastosowania modelowania matematycznego w optymalizacji i sterowaniu oczyszczalnią ścieków [13,14,15] za pomocą złożonych metod obliczeniowych. W obszarze sterowania i optymalizacji tymi obiektami do rozwiązania pozostaje cały szereg zagadnień dotychczas nie badanych, które dotyczą m.in. sterowania bioreaktorem w omawianym wyżej przypadku, gdy nie są prowadzone ciągłe pomiary wskaźników jakości ścieków na dopływie a jedynie pomiary okresowe, co ma miejsce w większości krajowych oczyszczalni ścieków. Innym takim problemem jest badanie wpływu procesu sedymentacji osadu w osadniku wtórnym na jakość ścieków na odpływie, który to fakt jest uwzględniany dotychczas w ograniczonym stopniu przy doborze strategii sterowania reaktorem biologicznym. Kolejnym istotnym zagadnieniem jest dobór metody modelowania oczyszczalni. Należy rozważyć kwestię, czy tworzyć modele o prostszej strukturze, wymagające mniejszych nakładów obliczeniowych i krótszego czasu obliczeń, czy może stosować modele bardziej złożone i przez to zwykle bardziej dokładne. Postawione zadanie jest bardzo trudne, bowiem stanowi kompromis między dokładnością obliczeń i złożonością modelu, co będzie miało w praktycznych zastosowaniach istotny wpływ na decyzje podejmowane przez technologa oczyszczalni. Przy tym należy mieć na uwadze, że w przypadku stosowania modeli parametrycznych, z uwagi na brak fizycznej interpretacji ich parametrów, mogą pojawić się problemy z jednoznaczną oceną otrzymywanych wyników.

W monografii pt.: „*Modelowanie matematyczne, optymalizacja i sterowanie pracą przepływowych oczyszczalni ścieków*” przedstawiono metodykę tworzenia modeli procesowych do modelowania ilości i jakości ścieków na wlocie i wylocie z oczyszczalni i sedymentacji osadu czynnego w osadniku wtórnym. Do tego celu zastosowano szereg metod data mining, zaczynając od najprostszych modeli liniowych, poprzez modele bazujące na teorii drzew regresyjnych i klasyfikacyjnych (metody drzew wzmacnianych i lasów losowych), a kończąc na złożonych metodach uczenia maszynowego, jak metoda wektorów nośnych, sztuczne sieci neuronowe typu perceptron wielowarstwowy oraz kaskadowe sieci neuronowe (metody deep learning). W przypadku badań dotyczących osadu czynnego obliczenia modelowania dotyczą procesu jego sedymentacji z zastosowaniem modeli do prognozy odnośnych wartości liczbowych i zmiennych lingwistycznych (badanie zjawiska puchnięcia

osadu). Wykorzystując obliczone modele statystyczne do symulacji procesów zachodzących w bioreaktorze opracowano metodykę optymalizacji działania oczyszczalni ścieków. Modele statystyczne wyznaczano na podstawie wieloletnich ciągów pomiarowych pochodzących z oczyszczalni ścieków Sitkówka–Nowiny, Trepcza i Rzeszów.

Ze względu na złożoną postać wyznaczanych modeli opracowano metodykę ich tworzenia pozwalającą na analizę niezawodności pracy oczyszczalni w horyzoncie czasowym długo i krótkookresowym. Na podstawie wykonanych w pracy badań sformułowano następujące wnioski końcowe:

1. Do analizy wrażliwości wyznaczanej struktury sieci neuronowej (dobór funkcje aktywacji i liczby neuronów w warstwach ukrytych) i uwzględnianych w modelowaniu zmiennych niezależnych (wartości przepływów i opadów), w przypadku prognozy dopływu ścieków do oczyszczalni należy zastosować metodę regresji logistycznej. Opracowany dla tego procesu model szarej skrzynki pozwala na ocenę wpływu uwzględnionych w nim zmiennych niezależnych na dokładność predykcji dopływu. W opracowanym modelu można analizować wpływ na wyniki zarówno poszczególnych zmiennych, jak i wydzielanych grup zmiennych, podczas gdy w dotychczasowych analizach rozważano jedynie wpływ pojedynczych zmiennych. Zaprezentowane w pracy podejście stanowi alternatywne rozwiązanie do obecnie stosowanych metod, w których zachodzi potrzeba wykonywania obliczeń o dużym nakładzie czasowym lub wymaga się implementacji złożonych algorytmów numerycznych.
2. Wykazano na podstawie przeprowadzonych badań, że możliwe jest modelowanie jakości ścieków (BZT_5 , $ChZT$, Z_o , N_{og} , $N-NH_4$, P_{og}) na dopływie do oczyszczalni ścieków na podstawie jedynie pomiarów dopływu. Rezultaty te wskazują na to, że zróżnicowany stopień rozcieńczenia ścieków determinuje jakość ścieków, co wykazano na przykładzie dwóch obiektów (oczyszczalnie Sitkówka–Nowiny i Rzeszów). Spośród badanych w pracy metod najlepsze wyniki modelowania w tym przypadku (najmniejsze wartości błędów prognozy wybranych wskaźników jakości ścieków) otrzymano stosując metodę kaskadowych sieci neuronowych (wielowarstwowych). Z kolei największe błędy prognozy otrzymano metodami lasów losowych i drzew wzmacnianych. W przypadku niezadowalających zdolności predykcyjnych modeli do prognozy jakości ścieków wyznaczanych na podstawie wartości dopływów w oparciu o metody uczenia maszynowego, alternatywnym rozwiązaniem może być opracowanie klasyfikatora wskaźników jakości i ładunków zanieczyszczeń. Zaproponowane w pracy narzędzie, zbudowane przy użyciu metody

wektorów nośnych, pozwala na identyfikację stanu pracy oczyszczalni na dopływie do obiektu (stwierdzanie ewentualnego przeciążenia hydraulicznego i niedoboru biogenów) z dobowym wyprzedzeniem, na podstawie wartości natężenia przepływu zmierzonych w dobach poprzednich. Opracowany model umożliwia prognozowanie stanów incydentalnych niebezpiecznych dla bioreaktora. Model ten może stanowić użyteczne narzędzie dla technologa, który przy jego użyciu będzie w stanie podejmować odpowiednie decyzje eksploatacyjne dotyczące korekty parametrów operacyjnych bioreaktora (zmiana stopni recyrkulacji, stężenia tlenu rozpuszczonego w komorach osadu czynnego, dawkowania metanolu itp.).

3. Na podstawie wykonanych badań stwierdzono, że jest możliwe modelowanie procesu sedymentacji osadu czynnego w bioreaktorze i jakości ścieków na wylocie z oczyszczalni ścieków w przypadku nieciągłości pomiarów jakości ścieków na dopływie do obiektu. Uzyskano tą możliwość tworząc modele hybrydowe. Rozwiązanie problemu polega na zastąpieniu pomiarów zmiennych niezależnych uwzględnianych w modelach procesowych (dotyczących jakości ścieków) wynikami odpowiednich obliczeń. Najlepsze wyniki modelowania (najmniejsze błędy prognozy) sedymentacji osadu czynnego otrzymano dla takich sytuacji za pomocą modeli hybrydowych bazujących na kombinacjach modelu kaskadowych sieci neuronowych jako modelu procesowego i modeli kaskadowych sieci neuronowych lub wektorów nośnych jako modeli do wyznaczania wartości wskaźników jakości ścieków. W przypadku modeli do prognozy stężenia azotu amonowego i fosforu ogólnego w ściekach surowych najmniejsze wartości błędów uzyskano stosując metody wektorów nośnych i kaskadowych sieci neuronowych, natomiast dla azotu ogólnego zadowalające rezultaty obliczeń otrzymano za pomocą modeli kaskadowych sieci neuronowych.
4. W wyniku prowadzonych badań stwierdzono, że do identyfikacji zdolności sedymentacyjnych osadu czynnego w osadniku wtórnym można zastosować metodę regresji logistycznej, wykorzystując pomiary ilości i jakości ścieków na dopływie do obiektu (BZT_5 , N_{og} , P_{og} , $N-NH_4$), pomiary temperatury w bioreaktorze i parametrów operacyjnych bioreaktora (stężenie osadu czynnego, stężenie tlenu rozpuszczonego, ilość dawkowanego PIX). Należy podkreślić, że wyniki obliczeń otrzymane modelem logitowym nie odbiegają od rezultatów uzyskanych złożonymi modelami klasyfikacyjnymi opartymi o metody sztucznych sieci neuronowych, wektorów nośnych, lasów losowych lub drzew wzmocnianych. Wykonane obliczenia (na przykładzie oczyszczalni Sitkówka–Nowiny i

Trepcza) wykazały, że wartości empirycznych współczynników w modelu regresji logistycznej zależą od dynamiki jakości ścieków na dopływie do oczyszczalni i rozwiązań technologicznych przyjętych na obiektach.

5. Kluczowe znaczenie na etapie tworzenia modeli procesowych (dotyczących jakości ścieków na wylocie z oczyszczalni i sedymentacji osadu) przy pomocy metod czarnej skrzynki (sztuczne sieci neuronowe, metoda wektorów nośnych, lasy losowe, drzewa wzmacniane itp.) ma analiza wrażliwości tworzonego modelu. Zaproponowana w pracy metoda analizy wrażliwości pozwala ocenić, na ile opracowany model poprawnie symuluje wpływ zmiennych niezależnych (w tym przede wszystkim zmiennych sterujących) na badane zjawisko, co jest kluczowe z punktu widzenia późniejszego wdrożenia wyznaczonych modeli statystycznych.
6. Model matematyczny oczyszczalni ścieków opracowany w oparciu o metody data mining (sieci neuronowe, regresja logistyczna) pozwala na badanie interakcji między procesami zachodzącymi w osadzie czynnym (sedymentacja) i jakością ścieków na wylocie (związki azotu i fosforu). Stanowi on cenne i oryginalne narzędzie badawcze, którego do tej pory nie było w kraju i zagranicą. Wykonane obliczenia wykazały, że za pomocą tego modelu możliwa jest optymalizacja pracy oczyszczalni ścieków (dobór odpowiednich nastaw, takich jak korekta stężenia osadu czynnego, stężenia tlenu rozpuszczonego w komorach i ilości dawkowanego PIX) nawet w przypadku braku ciągłości danych pomiarowych dotyczących jakości ścieków na dopływie do obiektu.
7. Opracowany w pracy model do analizy efektywności pracy bioreaktora (w odniesieniu do sedymentacji osadu czynnego) umożliwia ocenę niezawodności pracy oczyszczalni dla przyjętej strategii sterowania reaktorem w ujęciu długookresowym. Model ten pozwala na ocenę wpływu zmienności ilości i jakości ścieków na dopływie i temperatury osadu czynnego (w ujęciu sezonowym wynikającym z pór roku) na dobór odpowiednich nastaw w bioreaktorze, co do tej pory w modelach o podobnym charakterze nie było uwzględniane (zmienność badanych zmiennych jest prognozowana za pomocą generatorów Monte Carlo na podstawie ich rozkładów wyznaczonych przy użyciu danych pomiarowych). Jako nowe podejście w zaprezentowanym modelu należy uznać możliwość symulacji wpływu awarii analizatorów jakości ścieków na dopływie do oczyszczalni na dobór nastaw i niezawodność pracy oczyszczalni.
8. W wyniku wykonanych badań wykazano, że długość ciągu pomiarowego i sposób gromadzenia danych pomiarowych (sposób ciągły - dane są gromadzone w trybie *on-line*

ze stałą rozdzielczością; sposób nieciągły - odstęp czasu między kolejnymi pomiarami (krok próbkowania nie jest stały) są czynnikami determinującymi dobór metody do prognozowania jakości pracy oczyszczalni ścieków. Na podstawie opracowanych w pracy algorytmów można optymalizować długość okresu pomiarowego, przy uwzględnieniu którego ma być tworzony model matematyczny (o zadawalających zdolnościach predykcyjnych), przyjmując na początku eksperymentu określoną metodę data mining do symulacji zjawiska i sposób gromadzenia danych do jego opisu. W pracy wykazano, że stosując do prognozy pracy oczyszczalni ścieków metody sieci neuronowych (perceptron wielowarstwowy, kaskadowe, wektory nośne) wystarczą dane z rozdzielczością dobową obejmujące okres 6 miesięcy, tj. 180 wartości (dla zmiennej zależnej i zmiennych niezależnych), gromadzone w trybie ciągłym lub nieciągłym, aby opracowany model charakteryzował się wysokimi zdolnościami predykcyjnymi. Przy czym modele opracowane na podstawie danych mierzonych w trybie on-line dla przyjętych długości szeregów czasowych charakteryzują się lepszymi zdolnościami predykcyjnymi, niż w przypadku danych mierzonych w trybie nieciągłym. Pośród badanych metod modelowania (liniowa regresja wieloraka – MLR, programowanie genetyczne – GP, k – najbliższych sąsiadów – k-NN, lasy losowe – RF, drzewa wzmacniane – BT, wektory nośne - SVM, sieci neuronowe kaskadowe (CNN) w tym perceptron wielowarstwowy – MLP) stwierdzono, że metody MLP, CNN i SVM wykazują mniejszą wrażliwość na liczbę danych pomiarowych, niż modele opierające się na metodach lasów losowych, drzew wzmacnianych, k–najbliższych sąsiadów i programowania genetycznego. Tym samym przede wszystkim te metody powinny być dedykowane do modelowania oczyszczalni ścieków.

9. Możliwa jest ocena, symulacja i kontrola efektywności pracy oczyszczalni ścieków w trybie on-line na podstawie wartości współczynników niezawodności w odniesieniu do sedymentacji osadu czynnego (COR_{I_0}) i jakości ścieków na wylocie z oczyszczalni ($COR_{F/M}$), wyrażonej w sposób uproszczony (obciążenie substratowe bioreaktora). Rozwiązanie to jest możliwe nawet w przypadku nieciągłości pomiarów wskaźników jakości ścieków na dopływie do oczyszczalni. Brakujące wartości wskaźników jakości są modelowane na podstawie pomiarów natężenia dopływu do oczyszczalni przy zastosowaniu metod data mining. Podstawę doboru nastaw (stężenie osadu czynnego, stężenie tlenu rozpuszczonego, ilość dawkowanego PIX) w bioreaktorze stanowi wartość współczynnika Φ , będącego liniową kombinacją zmiennych dotyczących ilości i jakości ścieków (BZT_5/N_{og} , BZT_5/P_{og} , $N-NH_4$) oraz temperatury w komorach osadu czynnego. W pracy

wykazano, że współczynnik Φ ma charakter sezonowy, zależy od pory roku i jest wrażliwy na przeciążenia hydrauliczne. Przyjęte rozwiązanie stanowi uproszczenie w odniesieniu do dotychczasowych sposobów postępowania, gdy wartości nastaw ustalano drogą symulacji komputerowych modeli wyznaczanych metodami uczenia maszynowego.

5) Działalność naukowo – badawcza w latach 2006 – 2013 (przed uzyskaniem stopnia doktora)

W 2006 roku ukończyłem studia, uzyskując tytuł magistra inżyniera na Wydziale Budownictwa Politechniki Świętokrzyskiej na kierunku Inżynieria Środowiska, specjalność Inżynieria Komunalna. Pracę magisterską pt.: *„Optymalny dobór metody układania kabli teleinformatycznych w kanalizacji ściekowej”* wykonałem pod kierunkiem dr inż. Dariusza Zwierzchowskiego. Celem pracy był przegląd obecnie stosowanych w kraju i zagranicą metod układania kabli w kanałach ścieków, a następnie na bazie zebranych informacji opracowanie metody ich doboru. Na podstawie pozyskanych danych przedstawiłem w pracy magisterskiej metodę doboru kabli światłowodowych w kanałach w zależności od uwarunkowań lokalnych i ograniczeń wykorzystywanej metody. Opracowany przeze mnie materiał cieszył się dużym zainteresowaniem specjalistów zajmujących się tymi zagadnieniami i na jego podstawie wydana została monografia, której byłem współautorem, pt.: *„Metody układania kabli telekomunikacyjnych w obiektach infrastruktury miejskiej”*. Należy zwrócić uwagę, że praca ta stanowiła wówczas jedyne opracowanie z tego zakresu, jakie ukazało się w kraju. Tematykę układania kabli kontynuowałem w ramach współpracy z Zakładem Hydrauliki w Szkole Głównej Gospodarstwa Wiejskiego, czego efektem były publikacje [16, 17], których byłem współautorem.

Po uzyskaniu tytułu zawodowego magistra inżyniera w latach 2007÷2008 podjąłem pracę w biurach projektowych (PIOSAN, Przedsiębiorstwo Projektowo–Usługowo–Handlowe) w Kielcach na stanowisku asystenta projektanta, gdzie zajmowałem się projektowaniem sieci zewnętrznych i instalacji wewnętrznych (wodociągowych, kanalizacyjnych: sanitarnej i deszczowej, gazowych i ciepłowniczych) w obiektach mieszkalnych i obiektach wielkokubaturowych. Po tym okresie, w 2009 roku podjąłem pracę na stanowisku asystenta w Katedrze Geotechniki i Inżynierii Wodnej w Zakładzie Inżynierii Wodnej na Wydziale Budownictwa i Inżynierii Środowiska w Politechnice Świętokrzyskiej. Bazując na doświadczeniu zawodowym zdobytym podczas projektowania podjąłem decyzję o zmianie kierunku dotychczasowych zainteresowań. Jedną z pierwszych prac, których się podjąłem, była

analiza wpływu doboru urządzeń upustowych zbiornika retencyjnego na spłaszczenie hydrogramu dopływu w małych zlewniach rzecznych, co zostało opublikowano w pracach [18, 19, 20].

Mając na uwadze liczne problemy związane z eksploatacją sieci kanalizacji deszczowej (wylania ścieków na powierzchnię terenu) na terenie miasta Kielce przystąpiliśmy we współpracy z Miejskim Zarządem Dróg do wykonania posterunków do pomiarów:

- opadów deszczów o wysokiej rozdzielczości,
- przepływów i napełnienia kanału na odpływie z wybranej zlewni miejskiej,
- jakości ścieków za pomocą samplera na odpływie z wybranej zlewni miejskiej,

przy których budowie brałem czynny udział. Należy podkreślić, że w przypadku sieci kanalizacyjnych kluczowym czynnikiem determinującym wysoką wiarygodność uzyskanych wyników pomiarów jest ich odpowiednia lokalizacja, w wyznaczaniu których aktywnie uczestniczyłem realizując szereg eksperymentów. Na terenie miasta Kielce był to pierwszy do tej pory poligon badawczy pozwalający na badanie zależności między intensywnością opadu, przepływem ścieków i ich jakością w małej zlewni miejskiej. Ponadto, był to jeden z nielicznych na terenie kraju poligonów badawczych, który umożliwiał badanie zjawiska opad – odpływ (ze względu na ilość i jakość). Na podstawie zebranych wyników pomiarów dotyczących ilości i jakości ścieków opublikowano artykuł [21], którego byłem współautorem.

Moją uwagę zwrócił szczególnie jeden fakt. Otóż analiza uzyskanych wyników pomiarów przepływów wskazywała na występowanie hydrogramów odpływu wywołanych intensywnymi opadami, które miały miejsce w krótkim odstępie czasu. Problem ten został ujęty w wytycznych ATV A-118 dotyczących oceny przepustowości sieci kanalizacyjnych. Jednak na etapie wymiarowania obiektów takich, jak zbiorniki retencyjne, jest on pomijany, co w efekcie może prowadzić do zaniżenia ich wymaganej pojemności. Dlatego, na podstawie wykonanych analiz hydrogramów odpływu i obliczeń dotyczących zbiorników retencyjnych zlokalizowanych w zlewniach rzecznych stwierdziłem, że zachodzi potrzeba modyfikacji metod wymiarowania zbiorników retencyjnych, która polegałaby na ujęciu w procedurze obliczeniowej kształtu hydrogramu. Rozważania z tego zakresu przedstawiłem w postaci rozprawy doktorskiej zatytułowanej *„Wpływ kształtu hydrogramu dopływu na pojemność i dobór upustów małego zbiornika retencyjnego”*. Celem rozprawy było opracowanie metod pozwalających zaprojektować pojemność zbiornika retencyjnego zlokalizowanego w systemie kanalizacji deszczowej. Prowadzone badania koncentrowały się na ustaleniu analitycznych zależności między kształtem hydrogramu dopływu do zbiornika a jego pojemnością i

dobranymi spustami. Z uwagi na brak w literaturze opisu hydrogramów złożonych (tj. powstałych z nałożenia się dwóch hydrogramów pojedynczych) zaproponowałem własną metodę tego opisu. Opisując kształt hydrogramu odpływu ze zlewni uwzględniłem szereg następujących parametrów: stosunek przepływów maksymalnych w hydrogramach pojedynczych, bezwymiarowe przesunięcie czasowe między tymi przepływami, nierównomierność rozkładu objętości ścieków. W rozprawie wykazano, że:

- dobierając odpowiednio spusty ze zbiornika i przekrój komory akumulacyjnej można wyeliminować przepełnienie zbiornika mimo tego, że dopływają do niego w krótkich odstępach czasu ścieki opadowe wywołane intensywnymi zdarzeniami opadowymi,
- kluczowym parametrem determinującym maksymalną pojemność akumulacyjną zbiornika jest zróżnicowanie poszczególnych kulminacji w hydrogramie; najbardziej niekorzystny przypadek ma miejsce, gdy wartości poszczególnych kulminacji w hydrogramie dopływu przyjmują identyczne wartości,
- parametry kształtu fali złożonej – stosunek przepływów maksymalnych oraz bezwymiarowe przesunięcie czasowe między przepływami maksymalnymi mają istotny wpływ na wymiarowanie zbiornika, co jest związane z wymaganą zdolnością opróżniania się zbiornika w okresie pomiędzy przepływami szczytowymi.

Na etapie pisania rozprawy doktorskiej odbyłem dwa staże krótkoterminowe związane bezpośrednio z tematyką modelowania pojemności zbiorników retencyjnych zlokalizowanych w systemach kanalizacji deszczowej. Pierwszy z nich odbyłem w marcu 2012 roku w Instytucie Inżynierii Środowiska w Zakładzie Wodociągów i Kanalizacji w Politechnice Częstochowskiej. W trakcie stażu zapoznałem się z programem SWMM (Storm Water Management Model) i możliwościami jego zastosowania do symulacji różnych rozwiązań konstrukcyjnych zbiorników (jedno- i wielokomorowe, grawitacyjne, pompowe itp.). Efektem stażu i podjętej wówczas współpracy było opracowanie uniwersalnej metody wymiarowania zbiornika, która uwzględniała kształt hydrogramu dopływu ze zlewni miejskiej; metoda ta została przedstawiona w pracy [22]. Kolejny staż odbyłem w czerwcu 2012 roku w Szkole Głównej Gospodarstwa Wiejskiego w Zakładzie Hydrauliki w Warszawie, podczas którego zapoznałem się szczegółowo z równaniami różniczkowymi opisującymi proces napełniania zbiornika w warunkach ruchu nieustalonego i z metodyką ich rozwiązywania.

6) Działalność naukowo-badawcza w latach 2013 – 2018 (po uzyskaniu stopnia doktora)

Po obronie doktoratu, która odbyła się w dniu 29.05.2013, prowadzone przeze mnie obecnie badania koncentrują się na dwóch zagadnieniach. Pierwsze z nich dotyczy symulacji pracy systemów kanalizacji deszczowej i obiektów w niej zlokalizowanych za pomocą modeli fizykalnych. Drugie zagadnienie dotyczy modelowania sieci kanalizacyjnych (kanalizacji deszczowej i sanitarnej) oraz oczyszczalni ścieków, ze szczególnym uwzględnieniem procesów biochemicznych w reaktorach biologicznych, za pomocą metod data mining.

Po uzyskaniu stopnia doktora zakres prowadzonych wcześniej badań poszerzyłem w znacznym zakresie. Wykorzystując wiedzę, jaką zdobyłem podczas odbywania stażu w Instytucie Inżynierii Środowiska w Zakładzie Wodociągów i Kanalizacji w Politechnice Częstochowskiej, zająłem się zagadnieniami z zakresu symulacji ilości i jakości ścieków z wykorzystaniem modelu SWMM. Współpracując z Zakładem Hydrauliki na Wydziale Budownictwa i Inżynierii Środowiska w Szkole Głównej Gospodarstwa Wiejskiego i dodatkowo z Instytutem Geofizyki PAN zająłem się analizą działania systemów kanalizacyjnych metodą modelowania matematycznego z uwzględnieniem niepewności modeli hydrodynamicznych. Jednak to podejście, uwzględniając fizykę badanego zjawiska, nie brało pod uwagę stochastycznego charakteru zdarzeń opadowych. Dlatego zwróciłem uwagę na potrzebę pogłębienia wiedzy z zakresu statystyki stosowanej w odniesieniu do modelowania opadów. W tym celu w 2014 roku nawiązałem współpracę z Katedrą Wodociągów i Kanalizacji na Wydziale Inżynierii Środowiska w Politechnice Wrocławskiej i zająłem się wyznaczaniem typowych zmienności opadu w zdarzeniach opadowych w zależności od czasu ich trwania. Równolegle, współpracując z Wydziałem Matematyki, Informatyki i Mechaniki w Uniwersytecie Warszawskim, zdobywałem wiedzę z zakresu modelowania zjawisk o charakterze stochastycznym z uwzględnieniem wielowymiarowych rozkładów gęstości prawdopodobieństwa.

Mając na uwadze problemy z kalibracją modeli hydrodynamicznych i zbieraniem szczegółowych danych o charakterystyce zlewni, co nie zawsze jest możliwe, zwróciłem uwagę na potrzebę poszukiwania alternatywnych narzędzi do symulacji sieci kanalizacyjnych i obiektów w niej zlokalizowanych. Dlatego dalsze prowadzone przeze mnie badania dotyczyły implementacji metod data mining w modelowaniu zjawisk przepływowych w kanałach deszczowych i obiektach typu zbiorniki retencyjne, przelewy burzowe i oczyszczalnie ścieków deszczowych.

Kluczowy wpływ na ukierunkowanie moich zainteresowań badawczych miało nawiązanie w 2016 roku współpracy z Centrum Zastosowań Informatyki w Inżynierii Środowiska w Instytucie Badań Systemowych PAN w Warszawie. Podjęte następnie w wyniku tych kontaktów badania dotyczyły modelowania złożonych procesów biochemicznych w reaktorach biologicznych oczyszczalni ścieków. Z uwagi na ograniczone możliwości analitycznego opisu zależności między ilością i jakością ścieków na dopływie oraz parametrami operacyjnymi bioreaktora a dynamiką zachodzących w nich procesów, co było możliwe w przypadku sieci kanalizacji deszczowej, zacząłem się zapoznawać się z licznymi metodami uczenia maszynowego, zaczynając od prostych modeli jak metody k-najbliższych sąsiadów, lasów losowych itp. a kończąc na wielowarstwowych sieciach neuronowych (metody deep learning). W celu testowania możliwości aplikacyjnych modeli statystycznych w warunkach rzeczywistych nawiązałem współpracę z czterema oczyszczalniami ścieków: Cedzyna i Sitkówka–Nowiny pod Kielcami, Rzeszów i Trepcza (okolice Sanoka), dla których opracowywałem modele matematyczne. W trakcie prowadzonych badań, zdobywając doświadczenie z zakresu budowy modeli statystycznych, podjąłem współpracę z Katedrą Inżynierii Sanitarnej i Gospodarki Wodnej na Wydziale Inżynierii Środowiska i Geodezji w Uniwersytecie Rolniczym w Krakowie, gdzie zajmowałem się zagadnieniami z zakresu:

- wymiarowania zbiorników wodociągowych na podstawie opracowanych modeli statystycznych,
- symulacji i poprawy efektywności pracy oczyszczalni ścieków na podstawie modeli statystycznych.

W ramach współpracy z Uniwersytetem Rolniczym w Krakowie w okresie 01-30.09.2017 odbyłem staż w Slovak University of Agriculture in Nitra, Horticulture and Landscape Engineering Faculty, Department of Water Resources and Environmental Engineering. Tematem przewodnim mojego stażu była symulacja i optymalizacja procesów w bioreaktorach. W trakcie odbywania stażu nie koncentrowałem się wyłącznie na implementacji metod data mining do symulacji działania oczyszczalni ścieków. Skupiłem się również na interpretacji wyników obliczeń uzyskiwanych za pomocą modeli czarnej skrzynki. Jest to kluczowe zagadnienie podczas tworzenia modelu procesowego bioreaktora. Model ten powinien być użyteczny podczas eksploatacji obiektu i powinien poprawnie odzwierciedlać przebieg badanego zjawiska. Badania podjęte podczas odbywania stażu w Nitrze były następnie kontynuowane we współpracy z Zakładem Technologii Wody i Ścieków w Politechnice Śląskiej.

Dysponując doświadczeniem zdobytym podczas tworzenia modeli matematycznych oczyszczalni ścieków od 2017 roku uczestniczę w projekcie POIR.01.01.01-00-0685/16 finansowanym przez NCBiR pt.: *„Opracowanie innowacyjnego urządzenia do płukania i napowietrzania rurociągu tłocznego ścieków sprężonym powietrzem, ograniczającego procesy zagniwania ścieków”*, w którym zajmuję się tworzeniem modeli matematycznych do opisu zjawisk przepływu mieszaniny woda – powietrze w przewodzie tłocznym kanalizacji ciśnieniowej. W projekcie tym zajmuję się także opracowywaniem procedur laboratoryjnych dla eksperymentów pomiarowych dotyczących współpracy pompy ściekowej z przewodem ciśnieniowym. Projekt jest realizowany wspólnie z firmą Ekowodrol z Koszalina a głównym wykonawcą zadań z zakresu modelowania, sterowania i optymalizacji procesu napowietrzania przewodu tłocznego jest Instytut Badań Systemowych PAN. Czas trwania projektu obejmuje okres od 2017 do 2019 roku.

Równolegle, w ramach moich zainteresowań z zakresu modelowania procesów w inżynierii środowiska, zostałem jednym z wykonawców w grantie z Programu Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego w konkursie „Inkubator Innowacyjności+”. Projekt ten dotyczy otrzymywania z popiołów powstałych po spaleniu osadów ściekowych nawozu fosforowego wzbogaconego w biogeny. Projekt został zaprezentowany podczas Forum XIII edycji ARP Innovation Pitch i jego wyniki mają szansę wdrożenia, ponieważ zainteresowała się nimi „Grupa Azoty PUŁAWY”. Mój udział w projekcie obejmuje zaplanowanie eksperymentów umożliwiających utworzenie modelu matematycznego procesu i statystyczną analizę uzyskanych wyników badań.

7) Zakres badań prowadzonych po uzyskaniu stopnia doktora

Po obronie doktoratu prowadzone przeze mnie badania początkowo koncentrowały się na modelowaniu i ocenie efektywności działania obiektów (zbiorniki retencyjne, przelewy burzowe) w systemach kanalizacyjnych za pomocą modeli hydrodynamicznych (SWMM). W ramach tych badań, na podstawie zgromadzonych danych dotyczących charakterystyk fizyko–geograficznych zlewni w Kielcach, opadów o wysokiej rozdzielczości i przepływów, zająłem się tworzeniem modelu hydrodynamicznego zlewni z terenu miasta Kielce do prognozy ilości i jakości ścieków deszczowych. Wynikiem prac był szereg artykułów [23, 24, 25], które zostały zaprezentowane na Międzynarodowej Konferencji ECOPole 2014.

W kolejnym etapie badań skupiłem się na problemie kalibracji modeli hydrodynamicznych. Wykonane obliczenia wykazały, że wyznaczane w tych modelach

współczynniki (szerokość drogi spływu, współczynniki retencji terenów uszczelnionych i nieuszczelnionych, współczynniki szorstkości ścian kanałów) mają charakter probabilistyczny i można je opisać za pomocą rozkładów empirycznych. Wpływ niepewności modelu na projektowanie obiektów zlokalizowanych w systemach kanalizacji deszczowej zaprezentowano w pracy [26] na przykładzie rurowego zbiornika retencyjnego. Wykazano tam, że pojemność zbiornika wyznaczona na podstawie modelu hydrodynamicznego, gdy w obliczeniach pominięto wpływ niepewności, jest mniejsza, niż w rozwiązaniu deterministycznym. Ponadto stwierdzono, że przy formułowaniu modelu występują zależności o charakterze zbliżonym do liniowych między długością zbiornika rurowego a retencją terenów uszczelnionych i nieuszczelnionych, współczynnikiem szorstkości ścian kanałów Manninga oraz udziałem powierzchni uszczelnionej. Jest to istotne z punktu widzenia projektowania zbiornika, bowiem decyduje o jego niezawodności i eliminuje potencjalne problemy z jego przepełnieniem. Przedstawiona w publikacji problematyka wpływu niepewności modeli hydrodynamicznych na wymiarowanie obiektów zlokalizowanych w sieciach kanalizacyjnych jest podejściem innowacyjnym. Wykonane obliczenia dotyczące symulacji pracy sieci kanalizacyjnych za pomocą modeli fizykalnych wykazały, że poprawne skalibrowanie modelu fizykalnego jest bardzo trudne a otrzymane wyniki nie zawsze są wiarygodne. To skłoniło mnie do poszukiwania innych metod wyznaczania modeli matematycznych. Dlatego w kolejnym etapie badań skoncentrowałem się na tworzeniu modeli statystycznych za pomocą metod data mining. Rezultatem tego była praca [27], w której przedstawiono nowatorski sposób modelowania stochastycznego, w którym:

- do prognozy działania przelewu zastosowano modele regresji logistycznej,
- uwzględniono niepewność estymowanych współczynników w modelu logitowym,
- do symulacji opadów metodą Monte Carlo wykorzystano rozkłady teoretyczne zmiennych niezależnych determinujących wystąpienie zrzutu przelewem burzowym.

Wykonane obliczenia wykazały, że model regresji logistycznej może stanowić alternatywne narzędzie dla modelu hydrodynamicznego, a niepewność estymowanych współczynników ma istotny wpływ na prognozowaną liczbę zrzutów przelewem burzowym. Na tym etapie badań, nie udało mi się znaleźć fizykalnej interpretacji współczynników w modelu logitowym. Dlatego podjąłem dalsze badania mające na celu opracowanie uniwersalnego modelu matematycznego do prognozy działania przelewu burzowego. Problem symulacji przelewu burzowego był przeze mnie intensywnie rozwijany w okresie kolejnych 2 lat. W rezultacie w pracy [28] przedstawiono model logitowy, w którym wyznaczone empiryczne współczynniki mają

fizykalną interpretację. W praktyce taki model można uogólnić i zastosować dla różnych zlewni miejskich. Mając na uwadze szereg uproszczeń przy modelowaniu pracy obiektów zlokalizowanych w obrębie sieci kanalizacyjnych opracowałem model probabilistyczny do analizy pracy przelewu burzowego, w którym uwzględniłem również liczbę zdarzeń opadowych, która nie jest wartością stałą, ale zmienia się w szerokim zakresie, co omówiono w pracy [29]. Podsumowanie zdobytych doświadczeń znalazło odzwierciedlenie w pracy [30], w której zaproponowano innowacyjny złożony model probabilistyczny do analizy działania przelewu burzowego. Model ten składa się z trzech komponentów:

- modeli empirycznych do prognozy objętości zrzutu, maksymalnego chwilowego odpływu i udziału ścieków bezpośrednio odprowadzanych do odbiornika,
- generatorów Monte Carlo charakterystyk opadowych deszczów w epizodach opadowych determinujących parametry pracy przelewu burzowego,
- generatorów Monte Carlo do symulacji niepewności estymowanych współczynników w modelach empirycznych.

W publikacji przedstawiono modele empiryczne, w których wartości parametrów przelewu uzależniono od maksymalnej wydzielonej w zdarzeniu opadowym 30-minutowej wysokości opadu deszczu ($P_{t=30}$). Równocześnie wykazano, że graniczna wysokość $P_{t=30}$ warunkująca wystąpienie zrzutu zależy od charakterystyk fizyko-geograficznych zlewni, co czyni otrzymane zależności uniwersalnymi. Wykonane w pracy analizy wykazały, że przy projektowaniu przelewu burzowego konieczne jest uwzględnienie zarówno stochastycznego charakteru ilości zdarzeń opadowych, jak i niepewności parametrycznej otrzymanych zależności empirycznych. Pominięcie tego faktu może prowadzić równocześnie do zaniżenia krawędzi przelewu burzowego oraz przeciążenia oczyszczalni ścieków i kanału zrzutowego poniżej przelewu, co będzie generowało problemy podczas eksploatacji sieci kanalizacji deszczowej.

Na podstawie zdobytych doświadczeń podczas tworzenia modeli statystycznych w zlewniach miejskich przystąpiłem do modelowania bardziej złożonych procesów, jakie mają miejsce w obiektach technologicznych oczyszczalni ścieków komunalnych. W badaniach tych korzystałem z danych pomiarowych z oczyszczalni ścieków w Cedzynie i w Sitkówce-Nowiny pod Kielcami oraz Trepczy i Rzeszowie. Zakres prowadzonych badań podzieliłem na dwa etapy:

- modelowanie ilości i jakości ścieków na dopływie do oczyszczalni ścieków,

- prognoza zjawisk zachodzących w bioreaktorze oczyszczalni ze szczególnym uwzględnieniem tych dotyczących osadu czynnego.

W pierwszym etapie badań zająłem się modelowaniem ilości ścieków dopływających do oczyszczalni i oceną wpływu struktury tworzonego modelu sztucznej sieci neuronowej na wyniki obliczeń. Równocześnie badałem możliwość prognozy jakości ścieków na dopływie do oczyszczalni wyłącznie na podstawie pomiarów ilości dopływających ścieków i ich temperatury, stosując różne metody data mining (wieloraka regresja sklejana, lasy losowe, drzewa wzmocnione, sieci neuronowe itp.). Wykonane obliczenia wykazały, że jest możliwa prognoza jakości ścieków na dopływie do oczyszczalni na podstawie pomiarów natężenia przepływu i temperatury ścieków surowych, a najlepsze rezultaty modelowania uzyskano za pomocą metody kaskadowych sieci neuronowych. Wynik ten wskazuje na to, że stopień rozcieńczenia ścieków i kinetyka procesów są kluczowymi czynnikami mającymi wpływ na jakość ścieków, co stwierdzono na podstawie obliczeń dla dwóch obiektów, tj. oczyszczalni ścieków w Rzeszowie i oczyszczalni Sitkówka–Nowiny. Wyniki wykonanych prac opublikowano w artykułach [31, 32] oraz zaprezentowano na międzynarodowych konferencjach ASEE 2017 we Wrocławiu i ISC 2018 (Industrial Simulation Conference) w Porta del Gada w Portugalii.

Doświadczenie zdobyte podczas modelowania ilości i jakości ścieków pozwoliły mi przystąpić do symulacji bardziej skomplikowanych zjawisk. W drugim etapie badań zająłem się modelowaniem osadu czynnego – jego stężenia i sedymentacji (opadalności i objętościowego indeksu osadu). W obu przypadkach przeanalizowałem odpowiednio wpływ poszczególnych zmiennych niezależnych uwzględnianych w modelu (ilość i jakość ścieków na dopływie do oczyszczalni oraz parametry pracy bioreaktora) na wyniki modelowania w zależności od stosowanej metody data mining. Jest to istotne z punktu widzenia kontroli bioreaktora w przypadkach, gdy dla poszczególnych zmiennych niezależnych (zmienne sterujące, temperatura w komorach osadu czynnego, pH itp.) brakuje ciągłych pomiarów, na przykład na skutek awarii systemu monitoringowego. Ten problem jedynie w ograniczonym zakresie był do tej pory rozpatrywany w literaturze. Badane zagadnienie jest kluczowe z punktu widzenia doboru odpowiedniej metody modelowania bioreaktora, co w konsekwencji ma wpływ na późniejsze zastosowanie opracowanego modelu do optymalizacji pracy bioreaktora. W ramach prowadzonych prac znaczny udział poświęciłem symulacji opadalności osadu czynnego. Parametr ten jest bardzo często monitorowany na oczyszczalniach ścieków i jest pomocny podczas ich eksploatacji, ponieważ na jego podstawie można wyznaczyć

objętościowy indeks osadu czynnego. Wykonane przeze mnie obliczenia dla oczyszczalni ścieków w Cedzynie (RLM=5000) wykazały, że możliwe jest modelowanie opadalności osadu z zadowalającą dokładnością metodami wektorów nośnych i sztucznych sieci neuronowych z dynamicznym krokiem czasowym do przodu (od 0,50 godziny do 6 godzin), na podstawie pomiarów natężenia dopływu, temperatury w bioreaktorze i stopnia recyrkulacji zewnętrznej [33]. Spośród badanych przeze mnie metod najmniejsze błędy prognozy (średni błąd względny nie większy, niż 20%) otrzymałem za pomocą modelu sztucznych sieci neuronowych. Zaproponowałem także model szarej skrzynki (przy użyciu metody programowania genetycznego) do modelowania opadalności osadu, w którym, uwzględniałem wartości opadalności ustalane na podstawie wcześniejszych pomiarów. Dla tego modelu uzyskano średni błąd względny na poziomie 16%. Biorąc pod uwagę otrzymane wyniki można przyjąć, że model wyznaczony z użyciem metody programowania genetycznego może znaleźć zastosowanie podczas eksploatacji oczyszczalni i może stanowić proste w obsłudze narzędzie, pomocne przy korekcie recyrkulacji w bioreaktorze.

Kolejnym obiektem, na którym analizowałem możliwość prognozowania opadalności osadu czynnego, był obiekt wielokrotnie większy niż Cedzyna, ponieważ była to oczyszczalnia ścieków w Sitkówce–Nowiny (RLM=275000). Wykonane dla niej obliczenia za pomocą metody wektorów nośnych, drzew wzmacnianych i wielorakiej regresji sklejaney (MARS), na podstawie pomiarów ilości i jakości ścieków surowych oraz parametrów bioreaktora wykazały, że najmniejsze błędy prognozy opadalności osadu (średni błąd względny ok. 4%) otrzymano metodą MARS [34]. W przypadku oczyszczalni Sitkówka-Nowiny (podobnie jak dla oczyszczalni Cedzyna) wykazałem również możliwość prognozy opadalności osadu, za pomocą modelu uproszczonego i na podstawie natężenia dopływu ścieków, temperatury w bioreaktorze i stopnia recyrkulacji, uzyskując średni względny błąd prognozy ok. 10%. Z uwagi na to, że na oczyszczalni Sitkówka–Nowiny pomiary jakości ścieków nie są wykonywane ze stałą rozdzielczością, możliwość zastosowania w praktyce modelu wyznaczonego na podstawie takich wartości jest ograniczona. Natomiast model uproszczony daje możliwość jego implementacji w oczyszczalni ścieków.

Poza modelami parametrycznymi do symulacji procesu sedymentacji osadu czynnego zajmowałem się także wykorzystaniu do tego celu modeli klasyfikacyjnych. W badaniach tych skoncentrowałem się na zastosowaniu modelu regresji logistycznej. Pierwszą z prac zaprezentowałem na Kongresie Inżynierii Środowiska w dniach 29.05–01.06.2016 w Lublinie. W pracy tej, bazując na pomiarach parametrów operacyjnych bioreaktora i składu mikrobiologicznego osadu czynnego (obecność w osadzie bakterii nitkowatych *Thiothrix sp.*,

Sphaerotilus natans, *Beggiatoa sp.*, *Nostocoida sp.*), przedstawiono model do identyfikacji zjawiska puchnięcia osadu [35]. Opracowany model daje możliwość analizy interakcji między uwzględnianymi w nim zmiennymi (parametrami bioreaktora i bakteriami nitkowatymi), co do tej pory nie było przedmiotem badań. Ponieważ badania mikrobiologiczne na rozpatrywanym obiekcie były wykonywane tylko raz w miesiącu, więc opracowany model mógł mieć jedynie charakter poznawczy a nie aplikacyjny. Dlatego na podstawie pomiarów ilości i jakości ścieków oraz parametrów operacyjnych bioreaktora z oczyszczalni Sitkówka–Nowiny przedstawiłem nowy model już o satysfakcjonujących zdolnościach predykcyjnych [36]. W modelu tym uwzględniłem, jak wspomniałem powyżej, ilość i jakość ścieków na dopływie (biochemiczne zapotrzebowanie na tlen) oraz następujące parametry bioreaktora: stężenie tlenu rozpuszczonego, stężenie i temperatura osadu czynnego, ilość dawkowanego PIX w ciągu doby. Mimo tego, że wartości parametrów operacyjnych monitorowane są z wysoką rozdzielczością, to czas wykonania oznaczenia BZT₅ ogranicza praktyczne zastosowanie modelu na obiekcie. Rezultaty uzyskanych wyników przedstawiłem na konferencji EKO–DOK w dniu 20.04.2017 roku w Boguszowie–Gorcach; zostały one opublikowane w materiałach konferencyjnych, które ukazały się w postaci monografii.

W kolejnym etapie badań zajmowałem się dalszymi analizami procesów sedymentacji i stężenia osadu czynnego oraz obciążenia substratowego komór osadu czynnego z zastosowaniem autorskich koncepcji modeli, za pomocą których możliwa jest poprawna symulacja działania bioreaktora nawet w przypadku braku ciągłości w pomiarach wybranych wskaźników jakości ścieków uwzględnianych w modelu jako zmienne niezależne. Uzyskane wyniki prac zostały opublikowane w artykułach [37, 38, 39]. Model do prognozy stężenia osadu czynnego i obciążenia substratowego komór osadu czynnego opracowany za pomocą metody wektorów nośnych został zaprezentowany w postaci referatu pt.: „*Modelling Mixed liquor suspended solid and substrate load*” na Międzynarodowej Konferencji ISC 2017, która odbyła się w dniach 31.05-01.06.2017 roku w Warszawie. Praca ta została doceniona przez Komitet Naukowy konferencji, ponieważ otrzymała główną nagrodę (zwolnienie z opłat na kolejnej konferencji ISC) za najlepszy z prezentowanych artykułów. W dalszym etapie badań zaprezentowany model istotnie rozbudowałem, to znaczy:

- zastosowałem w obliczeniach kolejne metody data mining, tj. kaskadowych sieci neuronowych i drzew wzmacnianych,
- uwzględniłem, że mogą w ciągach pomiarowych zmiennych niezależnych wystąpić nieciągłości.

Wyniki tych badań przedstawiłem na Międzynarodowej Konferencji Mikrozanieczyszczenia w dniu 05.12.2017 roku w Częstochowie. Dalszym efektem tych prac były publikacje [39, 40].

Kolejne etapy badań z zakresu modelowania oczyszczalni ścieków, obejmujące:

- opracowanie modeli do identyfikacji jakości ścieków na dopływie,
- opracowanie modeli niezawodności bioreaktora w ujęciu długookresowym,
- wpływ długości używanych w obliczeniach ciągów pomiarowych, sposobu gromadzenia danych i metody symulacji na zdolności predykcyjne modeli statystycznych,
- optymalizację pracy oczyszczalni ścieków w przypadku braku ciągłości w pomiarach wskaźników jakości ścieków na dopływie do oczyszczalni,
- badanie interakcji między jakością ścieków na wylocie z oczyszczalni a sedymentacją osadu czynnego w bioreaktorze,

i uzyskane wyniki zostały przedstawione w monografii pt. pt.: *„Modelowanie matematyczne, optymalizacja i sterowanie pracą przepływowych oczyszczalni ścieków”*.

8) Działalność dydaktyczna i organizacyjna

W ramach działalności dydaktycznej w Politechnice Świętokrzyskiej prowadzę zajęcia na Wydziale Inżynierii Środowiska, Geomatyki i Energetyki oraz Budownictwa Lądowego i Architektury od 2009 roku do chwili obecnej. Są to zajęcia dla studentów I i II stopnia, stacjonarnych i niestacjonarnych, na kierunku Inżynieria Środowiska, Budownictwo i Geologia Inżynierska z przedmiotów: Mechanika płynów (wykład, projekt, laboratorium), Hydraulika (wykład, laboratorium), Hydraulika i hydrologia (wykład, projekt), Optymalizacja systemów wodociągowo–kanalizacyjnych (wykład, projekt), Pompy i wentylatory (wykład), Odciągi miejscowe (wykład), Instalacje specjalne (wykład), Hydrogeologia (wykład, projekt, ćwiczenia), Hydrogeologia i ochrona wód podziemnych (wykład, projekt, ćwiczenia).

Po uzyskaniu stopnia doktora (tj. od 2013 roku) prowadzę także zajęcia ze studentami w ramach programu ERASMUS z przedmiotów Mechanika płynów i Hydraulika i hydrologia. Dla zajęć laboratoryjnych z przedmiotu Mechanika płynów opracowywałem procedury badawcze do analizy warunków ruchu nieustalonego, na podstawie których przygotowałem materiały dydaktyczne i instrukcje do wykonywania eksperymentów. Ponadto, w ramach przedmiotu Optymalizacja systemów wodociągowo–kanalizacyjnych przygotowałem materiały dydaktyczne, które zostały wydane w postaci skryptu pt: *„Komputerowe wspomaganie modelowania sieci kanalizacji deszczowej: zagadnienia wybrane”*.

Po uzyskaniu stopnia doktora (tj. od 2013 roku) byłem promotorem 2 dwóch prac magisterskich, 15 prac inżynierskich i recenzowałem 20 prac inżynierskich i 2 magisterskie.

Od 2013 roku biorę czynny udział w „Dniach otwartych” organizowanych w Politechnice Świętokrzyskiej. Ponadto, od 2017 roku organizuję dla studentów dodatkowe zajęcia z zakresu modelowania matematycznego systemów kanalizacyjnych, w czasie których zapoznaję ich z programem SWMM (Storm Water Management Model).

Obecnie jestem promotorem pomocniczym w przewodzie doktorskim:

- Olgi Woyciechowskiej (Dyscyplina: Ochrona i Kształtowanie Środowiska, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie, Wydział Inżynierii Środowiska i Geodezji) pt.: *„Analiza wielkości i nierównomierności zapotrzebowania na wodę w aspekcie obliczania pojemności sieciowych zbiorników wyrównawczych”*. Opiekę naukową nad doktorantem sprawuję od 22.03.2017,
- Pawła Świetlika (Dyscyplina: Inżynieria Środowiska, Politechnika Świętokrzyska, Wydział Inżynierii Środowiska, Geomatyki i Energetyki) pt.: *„Modelowanie niepewności ocen zagrożeń akustycznych dla środowiska wynikających z hałasu komunikacyjnego drogowego rejestrowanego przez miejskie systemy monitoringu”*. Opiekę naukową nad doktorantem sprawuję od 04.04.2018.

Od 2017 roku jestem członkiem Wydziałowej Komisji Rekrutacyjnej na kierunkach: Inżynieria Środowiska, Odnawialne Źródła Energii, Geodezja i Kartografia.

Po uzyskaniu stopnia doktora otrzymałem w latach 2014, 2016 i 2018 nagrody Rektora za osiągnięcia naukowe.

Równoległe do prowadzonej działalności naukowo–dydaktyczno–organizacyjnej w latach 2016–2018 odbyłem praktykę w Pracowni Projektowej PIOSAN w Bilczy jako asystent projektanta oraz w firmie „Mbak Sieci i Instalacje Sanitarne” jako inżynier budowy w celu uzyskania uprawnień projektowych (przewidywany termin przystąpienia do egzaminów jest planowany w czerwcu 2019 roku).

Literatura

- 1) A. Thunberg, A.M. Sundin, B. Carlsson (2009). Energy optimization of the aeration process at Kåppala wastewater treatment plant. 10th IWA Conference on Instrumentation, Control & Automation.

- 2) K. Minsoo, K. Yejin, K. Hyosoo, P. Wenhua, K. Changwon (2016). Operator decision support system for integrated wastewater management including wastewater treatment plants and receiving water bodies. *Environmental Science and Pollution Research*. Vol. 23, 10785–10798.
- 3) X.F. Alsina, M. Arnell, Y. Amerlinck, L. Corominas, K.V. Gernaey, L. Guo, E. Lindblom, I. Nopen, J. Porro, A. Shaw, L. Snip, P.A. Vanrolleghem, U. Jeppsson (2014). Balancing effluent quality, economic cost and greenhouse gas emissions during the evaluation of (plant-wide) control/operational strategies in WWTPs. *Science of the Total Environment*. Vol. 466 – 467, 616–624.
- 4) A.C. Avella, T. Görner, J. Yvon, P. Chappe, P. Guinot-Thomas, P. Donato (2011). A combined approach for a better understanding of wastewater treatment plants operation: Statistical analysis of monitoring database and sludge physico-chemical characterization. *Water Research*. Vol. 45, No. 3, 981–992.
- 5) E. Ayasa, A. De la Sota, P. Grau, J.M. Sagarna, A. Salterain, J. Suescun (2006). Supervisory control strategies for the new WWTP of Galindo-Bilbao: the long run from the conceptual design to the full-scale experimental validation. *Water Science and Technology*. Vol. 53, No. 4 – 5, 193–201.
- 6) M.A. Brdys (2014). Integrated monitoring, control and security of Critical Infrastructure Systems. *Annual Reviews in Control*. Vol. 38, No.1, 47–70.
- 7) H. Haimi, M. Mulas, F. Corona, S. Marsili-Libelli, P. Lindell, M. Heinonen, R. Vahala (2016). Adaptive data-derived anomaly detection in the activated sludge process of a large-scale wastewater treatment plant. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. Vol. 52, 65–80.
- 8) H. Boztoprak, Y. Özbay, D. Güçlü, M. Küçükhemek (2015). Prediction of sludge volume index bulking using image analysis and neural network at a full-scale activated sludge plant. *Desalination and Water Treatment*. Vol. 57, No. 37, 1–11.
- 9) A.M.P. Martins, C. Picoreanu, J.J. Heijnjen, M.C.M. Loosdrecht (2004). Three-Dimensional Dual-Morphotype Species Modeling of Activated Sludge Flocs. *Environmental Science & Technology*. Vol. 38, No. 21, 5632-5641.

- 10) M.A. Brdyś, M. Grochowski, T. Gminski, K. Konarczak, M. Drewa (2008). Hierarchical predictive control of integrated wastewater treatment systems. *Control Engineering Practice*. Vol. 16, No. 6, 751–767.
- 11) M.A. Brdyś, K. Konarczak (2002). Model predictive medium control layer for integrated sewer-wastewater treatment plant systems. *1IFAC International Conference on Technology, Automation and Control of Wastewater and Drinking Water Systems-Ti4SWiK'02*, Gdansk–Sobieszewo, June 19-21, Poland.
- 12) J. Mąkinia (2010). *Mathematical Modelling and Computer Simulation of Activated Sludge Systems*. IWA Publishing, London.
- 13) L. Corominas, H.F. Larsen, X.F. Alsina, P.A. Vanrolleghem (2013). Including Life Cycle Assessment for decision-making in controlling wastewater nutrient removal systems. *Journal of Environmental Management*. Vol. 128, 759-767.
- 14) M. Mulas, S. Tronci, F. Corona, H. Haimi, P. Lindell, M. Heinonen, R. Vahala, R. Baratti (2015). Predictive control of an activated sludge process: An application to the Viikinmäki wastewater treatment plant. *Journal of Process Control*. Vol. 35(C), 89–100.
- 15) A. Asadi, A. Verma, K. Yang (2016). Wastewater treatment aeration process optimization: A data mining approach. *Journal of Environmental Management*. Vol. 203, No.1, 1-10.
- 16) J. Kubrak, B. Szelać (2012). Rachunkowa analiza przepustowości przewodu wodociągowego z kablem telekomunikacyjnym. *Instal, Teoria i praktyka w instalacjach*. Nr 7/8, 58 – 62.
- 17) P. Siwicki, B. Szelać (2010). Zastosowanie modelu CFD FLUENT do określania strat hydraulicznych w kołowych przewodach wodociągowych ze światłowodem. *Przegląd Naukowy, Inżynieria i Kształtowanie Środowiska*, Vol. 4, No. 4, 3 – 13.
- 18) B. Szelać, Ł. Bąk, J. Górski (2012). Analiza roli kaskady zbiorników retencyjnych w ochronie przeciwpowodziowej na przykładzie miasta Kunów. *Acta Scientiarum Polonorum Formatio Circumiectus*, Vol. 11, No. 2, 59 – 74.
- 19) Ł. Bąk, J. Górski, B. Szelać (2012). Wpływ kaskady zbiorników małej retencji Suchedniów i Rejow na redukcję fali wezbraniowej na rzece Kamionka. *Acta Scientiarum Polonorum Formatio Circumiectus*, Vol. 11, No. 1, 13 – 22.

- 20) Sz.L. Dąbkowski, J. Górski, B. Szelał (2009). Rola małego zbiornika wodnego w ochronie przed powodzią (w warunkach miasta Kunów). *Wiadomości Melioracyjne i Łąkarskie*, Vol. 52, No. 4, 155 – 160.
- 21) Sz.L. Dąbkowski, K. Górski, J. Górski, B. Szelał (2010). Wstępne wyniki badań ścieków deszczowych w jednym z kanałów w Kielcach. *Gaz Woda i Technika Sanitarna*, Vol. 6, No. 6, 20 – 24.
- 22) B. Szelał, M. Mrowiec (2016). The methods of evaluating storage volume for single chamber reservoir in urban catchment. *Archives of Environmental Protection*, Vol. 42, No. 2, 20 – 25.
- 23) K. Górski, B. Szelał, J. Górski, Ł. Bąk (2014). Korelacje między wybranymi zanieczyszczeniami w ściekach deszczowych. *Proceedings of ECOpole*. Vol. 8, No. 2, 497 – 504.
- 24) B. Szelał, J. Górski, Ł. Bąk, K. Górski (2013). Modelling of Stormwater Quantity and Quality on the Example of Urbanised Catchment in Kielce. *Ecological Chemistry and Engineering*, Vol. 20, No. 11, 1305 – 1316.
- 25) B. Szelał, J. Górski, Ł. Bąk (2015). Zastosowanie programu SWMM do modelowania ilości i jakości ścieków deszczowych. *Proceedings of ECOpole*. Vol. 9, No. 2, 767 – 775.
- 26) A. Kiczko, B. Szelał, A.P. Koziół, M. Krukowski, E. Kubrak, J. Kubrak, R.J. Romanowicz (2018). Optimal Capacity of a Stormwater Reservoir for Flood Peak Reduction. *Journal of Hydrologic Engineering*, Vol. 23, No. 4, 1 – 9.
- 27) B. Szelał, Ł. Bąk (2016). Probabilistic model for the annual number of storm overflow discharges in a stormwater drainage system. *Urban Water Journal*, Vol. 14, No. 6, 604 – 611.
- 28) B. Szelał, A. Kiczko, J. Studziński, L. Dąbek (2018). Hydrodynamic and probabilistic modelling of storm overflow discharges. *Journal of Hydroinformatics*, Vol. 20, No. 5, 1100 – 1110.
- 29) B. Szelał, Ł. Bąk, R. Suligowski, J. Górski (2018). Statistical models to predict discharge overflow. *Water Science and Technology*. Vol. 7, No. 8, 1208 – 1218.
- 30) B. Szelał, K. Chmielowski, E. Wąsik (2018). Simulation of a storm overflow with probabilistic and hydrodynamic models. *Urban Water Journal*. Vol. 15, 662 – 670.

- 31) B. Szelał, K. Barbusiński, J. Studziński, L. Bartkiewicz (2017). Prediction of wastewater quality indicators at the inflow to the wastewater treatment plant using data mining methods. *E3S Web of Conferences* 22, 00174 (2017).
- 32) B. Szelał, L. Bartkiewicz, J. Studziński (2016). Prognozowanie wybranych wskaźników zanieczyszczeń na dopływie do oczyszczalni metodami czarnej skrzynki. *Ochrona Środowiska*. Vol. 38, No. 4, 39 – 46.
- 33) B. Szelał, J. Gawdzik (2016). Application of selected methods artificial intelligence to activated sludge settleability predictions. *Polish Journal of Environmental Studies*, Vol. 25, No. 4, 1709 – 1714.
- 34) B. Szelał, J. Gawdzik (2017). Assessment of the effect of wastewater quantity and quality, and sludge parameters on predictive abilities of non-linear models for activated sludge settle-ability predictions. *Polish Journal of Environmental Studies*, Vol. 26, No. 1, 315-322.
- 35) E. Bezak-Mazur, R. Stoińska, B. Szelał (2016). Ocena wpływu parametrów operacyjnych i występowania bakterii nitkowatych na objętościowy indeks osadu czynnego – studium przypadku. *Rocznik Ochrona Środowiska*. Vol. 18, 487 – 498.
- 36) B. Szelał, P. Siwicki (2017). Application of the selected classification models to the analysis of the settling capacity of the activated sludge – case study. *E3S Web of Conferences* 17, 00089 (2017).
- 37) B. Szelał, J. Studziński (2017). A data mining approach to the prediction of food-to-mass ratio and mixed liquor suspended solids. *Polish Journal of Environmental Studies*, Vol. 26, No. 5, 2231 – 2238.
- 38) B. Szelał, K. Barbusiński, J. Studziński (2018). Activated sludge process modelling using selected machine learning techniques. *Desalination and Water Treatment*, Vol. 117, 78 – 87.
- 39) B. Szelał, J. Gawdzik, J. Studzinski (2018). Sludge Volume Index (SVI) Modelling: Data Mining Approach. Z. Wilimowska et al. (eds.), *Information Systems Architecture and Technology: Proceedings of 38th International Conference on Information Systems Architecture and Technology – ISAT 2017, Advances in Intelligent Systems and Computing* 657.

- 40) B. Szeląg, K. Barbusiński, J. Studziński (2019). Application of the model of sludge volume index forecasting to assess reliability and improvement of wastewater treatment plant operating conditions. Desalination and Water Treatment. 2019, 1 – 12.

Bartosz Szeląg