

Kraków, 18.09.2023 r.

Dr hab. inż. Agnieszka Leśniak, prof. PK
Politechnika Krakowska
Wydział Inżynierii Lądowej
Katedra Zarządzania w Budownictwie

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Justyny Dziecioł

pt. „Analiza możliwości wykorzystania algorytmów uczenia maszynowego w predykcji współczynnika filtracji dla wybranych kruszyw pochodzenia antropogenicznego”

1. Podstawa opracowania recenzji

Podstawą formalną opracowania recenzji jest pismo Dyrektora Instytutu Dyscypliny Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport Szkoły Głównej Gospodarstwa Wiejskiego Pana Profesora dr. hab. inż. Eugeniusza Kody z dnia 14.07.2023 r.

2. Przedmiot recenzji

Przedmiotem recenzji jest rozprawa doktorska Pani mgr inż. Justyny Dziecioł pt. „Analiza możliwości wykorzystania algorytmów uczenia maszynowego w predykcji współczynnika filtracji dla wybranych kruszyw pochodzenia antropogenicznego”. Pracę przygotowano w Szkole Głównej Gospodarstwa Wiejskiego, w Instytucie Inżynierii Lądowej pod kierunkiem Pana dr. hab. inż. Wojciecha Sasa, prof. SGGW będącego promotorem pracy i Pana dr. inż. Andrzeja Głuchowskiego pełniącego funkcję promotora pomocniczego w postępowaniu doktorskim.

3. Ocena tytułu, układu i treści rozprawy

Rozprawa doktorska ma formę książki i w tym zakresie spełnia wymagania *Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce*.

Zaproponowany tytuł pracy jest właściwy, jasno i precyzyjnie informuje o podjętym problemie, celu i zakresie badań i odpowiada treści pracy.

Praca ma charakter teoretyczno-badawczy i obejmuje 243 strony łącznie z rysunkami, tabelami, streszczeniami w języku polskim i angielskim, spisem literatury, spisem rysunków i tabel. Została podzielona na 10 rozdziałów, które stanowią logiczny układ. Zasadniczą część rozprawy zamieszczono w rozdziałach od 1 do 6. W rozdziałach od 7 do 10 zamieszczono załączniki, spis literatury, spis rysunków i spis tabel. Wydaje się, że lepiej było wymienione wyżej elementy potraktować jako uzupełnienie pracy, bez umieszczania ich w odrębnych rozdziałach, a jako ostatni przyjąć rozdział 6 Wnioski.

Pierwszą część pracy – część literaturową stanowią zasadniczo trzy pierwsze rozdziały. Część badawczą wraz z podsumowaniem kolejne trzy, które stanowią około 80 % zasadniczej treści rozprawy. Proporcja obu części pracy jest właściwa i zgodna z zasadami pisania prac naukowych.

Rozdział 1 zatytułowany „Wstęp” zawiera krótkie wprowadzenie w tematykę rozprawy dotyczącą zasadności wykorzystywania w budownictwie materiałów antropogenicznych, a szczególnie kruszyw antropogenicznych jako zamienników kruszyw naturalnych. We wstępie odnaleźć można uzasadnienie podjętego w pracy problemu badawczego, a także zasygnalizowany przez Autorkę zakres pracy. Wydaje się, że można było umieścić w tym miejscu także treści rozdziału 3 (cel i hipotezy) lub pozostawić we wstępie jedynie ogólne wprowadzenie do tematyki rozprawy przenosząc uzasadnienie i zakres pracy do rozdziału 3.

Rozdział 2 zatytułowano: Przegląd literatury i obejmuje on analizę stanu wiedzy w zakresie kruszyw antropogenicznych, współczynnika infiltracji oraz uczenia maszynowego. Wśród kruszyw antropogenicznych słusznie Autorka szerzej opisała żużel i kruszywo betonowe, które są materiałami rozważanymi w pracy. Charakterystyka współczynnika filtracji jest właściwa i wystarczająca. Opis wybranego narzędzia predykcyjnego w formie uczenia maszynowego zawiera ogólne definicje, przeznaczenie, zadania i algorytmy. W tej części rozprawy moją uwagę zwróciła Tabela 1, do której wrócę w dalszej części recenzji. Cennym fragmentem tego rozdziału jest jego podsumowanie.

W rozdziale 3 Autorka sformułowała cel pracy i hipotezy, wskazała zakres pracy i schemat badań własnych. Bardzo trafne są zamieszczone w tym rozdziale schematy. Przedstawione zwięzłe uzasadnienie podjęcia tematu w celu pracy mogło być nieco obszerniejsze i stanowić odrębny podrozdział.

Rozdział 4 rozpoczyna część badawczą rozprawy i dotyczy wykorzystanych w pracy materiałów i metodyki badań. W pierwszej części Doktorantka prezentuje wyniki przeprowadzonych badań laboratoryjnych w celu określenia właściwości chemicznych i fizycznych dla czterech wybranych rodzajów kruszyw antropogenicznych: żużla wielkopieczowego, żużla paleniskowego, kruszywa betonowego pozyskanego z remontowanej nawierzchni drogowej oraz kruszywa betonowego z odpadów betonowych powstałych podczas realizacji prac badawczych. Ten fragment w pracy jest wartościowy i starannie opracowany. Dalej, opisując zakres badań współczynnika filtracji Doktorantka wskazała dwa etapy: pierwszy, w którym badania zostały wykonane dla kruszyw naturalnych i dla kruszyw antropogenicznych, drugi, w którym prowadzono badania wyznaczenia współczynnika za pomocą algorytmów uczenia maszynowego. Odnosząc się do tytułu pracy zastanawia decyzja o przeprowadzeniu szerokich badań dla kruszyw naturalnych, a w szczególności brak jej wyraźnego uzasadnienia. Do tej uwagi powrócę w dalszej części recenzji.

W podrozdziale 4.2 prezentowana jest metodyka badań, w której Doktorantka wyróżnia metodykę przygotowania materiału i wykonania badań, następnie metodykę predykcji. W moim odczuciu nastąpiło tu zamieszanie pojęciowe. O ile faktycznie podrozdział 4.2 można zatytułować metodyka badań, o tyle przygotowanie materiału i badań oraz predykcja z wykorzystaniem uczenia maszynowego to już metody, a więc świadomie stosowane sposoby postępowania mające prowadzić do osiągnięcia zamierzonego celu. W tej części pracy prezentowane są wykonane przez Doktorantkę laboratoryjne badania współczynnika filtracji metodą stałogradientową dla wszystkich rozważanych w pracy kruszyw. Należy zauważyć, że Doktorantka słusznie przywołuje w tym miejscu swoje doświadczenia przy projektowaniu wartości gradientów hydraulicznych, odwołując się do własnych publikacji i opisując bardzo starannie przygotowanie stanowiska i próbek do badań. Cennym fragmentem tej części pracy są wypunktowane, podjęte działania mające na celu wyeliminowanie, zidentyfikowanych przez Chapuis'a, często popełnianych podczas badań błędów. Następnie

przedstawiono rozdział dotyczący wyboru algorytmów uczenia maszynowego do predykcji współczynnika filtracji. Doktorantka zaproponowała 8, możliwych do rozwiązania zadania predykcji, algorytmów (szkoda jednak, że nie uzasadniła ich wyboru), których mocne i słabe strony zestawiono w Tabeli 9. Zastawia mnie brak odwołania do jakichkolwiek pozycji literatury, które pomogły wymienione wady i zalety zgromadzić. Mam także wątpliwości do wady „*Wymaga pewnej wiedzy z zakresu statystyki, aby zrozumieć model*” wskazanej w przypadku regresji liniowej. Taki zapis może sugerować, że pozostałe algorytmy, które takiej wady nie mają, nie wymagają posiadania przez badacza wiedzy z tego zakresu. W drugim kroku, w oparciu wady i zalety wykluczono z zaproponowanego zestawu dwa algorytmy: naiwny klasyfikator Bayes'a oraz maszynę wektorów nośnych (SVM). Przedstawiona, krótka charakterystyka wybranych algorytmów jest uzasadniona i wystarczająca. Stosunkowo krótki (niecałe 2 strony) podrozdział 4.3 hiperparametry powinno się włączyć do podrozdziału obejmującego predykcję z wykorzystaniem uczenia maszynowego.

Rozdział 5 zatytułowany Omówienie i dyskusja wyników jest najobszerniejszym rozdziałem rozprawy. Nie zamieszczono tu jednak, jak sugeruje tytuł, wyłącznie wyników, ale zaprezentowano pełną procedurę budowy i oceny modeli predykcyjnych z wykorzystaniem wybranych algorytmów. Wyodrębniono dwie części: pierwszą dotyczącą predykcji współczynnika filtracji dla kruszyw naturalnych i drugą dla kruszyw antropogenicznych. Całość procesu budowy modeli i ich oceny bardzo dobrze przedstawiono na rys. 3.3. W moim doznaniu nie jest to schemat analizy procesu modelowania tylko schemat procesu modelowania. W pierwszej kolejności opisano sposób gromadzenia danych. Zabrakło w nim jednak krótkiego wyjaśnienia, jak pozyskano dane o właściwościach fizycznych dla kruszyw naturalnych. W tytule kolejnego podrozdziału wkradła się omyłka pisarska - nie chodzi bowiem o eksploatację ale o eksplorację danych, w ramach której przeprowadzono kompleksową analizę związków korelacyjnych w zbiorze zmiennych. Przedstawiona na Rys. 37 mapa korelacyjna jest trafna, ale w moim odczuciu zabrakło komentarza wyznaczonych związków korelacyjnych. Następnie dokonano modelowania procesu predykcji współczynnika filtracji z zastosowaniem algorytmów w podziale próby 70% - zbiór uczący, 30% - zbiór testowy oraz w podziale próby metodą walidacji krzyżowej. Oceny poprawności predykcji wyników generowanych przez modele do danych rzeczywistych dokonano na podstawie nie budzących wątpliwości wybranych rodzajów błędów. Wartościowe są tutaj także graficzne porównania wyników modelowania z obserwacjami. Na uwagę zasługuje szeroka analiza jakości predykcji w postaci przeprowadzonych testów i analiz diagnostycznych, a także ocena wydajności modeli z wykorzystaniem kryteriów informacyjnych. Dla podejścia podziału próby metodą walidacji krzyżowej zastosowano 10-krotną walidację. Podobnie jak wcześniej, dokonano oceny poprawności prognozy jakości i wydajności modeli predykcyjnych. Zwraca uwagę brak jakichkolwiek odwołań do literatury w opisie walidacji krzyżowej. Druga część rozdziału to analogicznie przeprowadzone modelowanie dla kruszyw antropogenicznych wraz z oceną zbudowanych modeli. Podrozdział 5.3 stanowi interpretację i dyskusję otrzymanych wyników. Warto podkreślić wykorzystanie przez Doktorantkę techniki SHAP pozwalającej na ocenę wpływu przydatności przyjętych w modelu zmiennych wejściowych na wynik prognozy modelu. Czytelne i uzasadnione są wykresy prezentujące wyniki prowadzonych analiz, szczególnie te pokazujące ranking zmiennych wejściowych na zmienną generowaną przez model. Krótkim ale cennym opracowaniem jest zestawienie średnich dla obserwowanych wartości współczynnika filtracji z wartościami

wyliczonymi na podstawie wzorów empirycznych oraz wartościami wyznaczonymi przez model AdaBoost (umożliwiający najlepszą predykcję). Wykazano, że zaproponowany model wykorzystujący algorytm uczenia maszynowego generuje wyniki najbliższe rzeczywistym wartościom współczynnika filtracji dla kruszyw antropogenicznych.

Rozdział 6 przedstawia wnioski z przeprowadzonych badań i analiz, wskazuje elementy nowości oraz kierunki dalszych badań. Większą część wniosków opracowano w punktach, co w mojej opinii jest zaletą. Warto zaznaczyć, że Autorka rozprawy mimo szczegółowego podejścia do postawionego problemu naukowego dostrzega możliwości dalszych badań.

Rozdziały 7, 9 i 10 traktuję jako załączniki nie wymagające komentarza.

Rozdział 8 stanowi wykaz literatury, który jest obszerny i zawiera 294 pozycje, co świadczy o wnikliwości Doktorantki. Szkoda, że nie wyodrębniono w oddzielnych grupach aktów prawnych i źródeł internetowych, co zapewniłoby większą przejrzystość tego zestawienia. Należy podkreślić, że wśród cytowanej literatury aż 10 pozycji to prace, których Doktorantka jest współautorką.

Podsumowując tę część recenzji, poza wskazanymi wcześniej uwagami, tytuł, układ i treść rozprawy oceniam pozytywnie. Struktura pracy jest poprawna w podziale na część literaturową i badawczą. Rozdział 1 mógłby, w mojej opinii, zawierać także treści rozdziału 3 (cel i hipotezy). Cenne jest sporządzone podsumowanie przeglądu literatury, w którym wskazano najistotniejsze wnioski. Kolejność i objętość rozdziałów związanych z zasadniczą treścią pracy z punktu widzenia tematu i celu pracy są akceptowalne, choć podtrzymuję swoją uwagę dotyczącą rozdziałów od 7 do 10, które powinny być załącznikami pracy i nie stanowić odrębnych numerowanych rozdziałów. Rozdział 5 powinien zostać inaczej zatytułowany - jego treść jest znacznie obszerniejsza i zawiera wiele innych istotnych elementów niż wskazuje obecny tytuł.

Praca jest napisana w sposób przystępny, a prezentowane wyniki są poprawnie opisane. Strona graficzna pracy nie budzi żadnych zastrzeżeń, a zestawienia tabelaryczne i prezentowane rysunki są czytelne i uzasadnione.

4. Ocena merytoryczna pracy

4.1. Ocena doboru tematu rozprawy

Problematyka pracy należy do zagadnień mieszczących się w obszarze budowlanego procesu inwestycyjnego i dotyczy wykorzystania w budownictwie materiałów antropogenicznych, a w szczególności poszukiwania efektywnych metod wyznaczania parametrów określających ich właściwości fizyczne.

Temat zastosowania materiałów antropogenicznych w budownictwie zyskał na znaczeniu w ostatnich latach, co wynika z podejmowania szeregu działań przez agencje międzynarodowe związane z ochroną środowiska. Materiały antropogeniczne takie jak odpady przemysłowe czy produkty uboczne, z uwagi na znacznie niższe koszty ich pozyskania, są często wykorzystywane w budownictwie jako ekwiwalent pełnowartościowych materiałów tradycyjnych. Cechuje je jednak zmienność i niejednorodność w zależności od pochodzenia, miejsca odzysku lub czasu składowania,

zatem by precyzyjnie określać możliwości ich zastosowania ważne jest właściwe wyznaczenie ich parametrów.

W pracy, uwagę skupiono na kruszywach antropogenicznych stosowanych jako zamiennik kruszyw naturalnych. Ich wykorzystanie, szczególnie w budowlach ziemnych, wiąże się z ich bezpośrednim kontaktem ze środowiskiem gruntowo-wodnym, a to uzasadnia zwrócenie uwagi na poprawne oszacowanie współczynnika filtracji, który jest jednym z podstawowych parametrów charakteryzujących własności fizyczne kruszyw.

Literatura i praktyka inżynierska wskazują trzy rodzaje metod oznaczania współczynnika filtracji: metody polowe, laboratoryjne i metody wykorzystujące wzory empiryczne. Zarówno metody laboratoryjne, jak i polowe powinny być wykonywane w oparciu o aktualnie obowiązujące normy, co pozwala na ustandaryzowanie wyników otrzymanych badań. Metody te są wiarygodne, jednak czasochłonne i kosztochłonne. Metody z wykorzystaniem wzorów empirycznych mają ograniczony zakres stosowania, gdyż opracowane zostały w wyniku prac eksperymentalnych dla wybranych rodzajów gruntów o określonych krzywych i przedziałach uziarnienia.

Z tych też powodów uzasadnione jest poszukiwanie nowych rozwiązań umożliwiających oszacowanie współczynnika filtracji i uniknięcia wad czy słabości istniejących metod. Jednym z takich podejść może być próba wykorzystania wcześniej zebranej wiedzy z badań polowych i laboratoryjnych, i zastosowanie nowoczesnych narzędzi predykcyjnych np. metod sztucznej inteligencji obliczeniowej. Są one obecnie coraz powszechniej rozwijane, a ich zastosowanie w dyscyplinie naukowej, jaką jest Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport ma coraz bardziej użyteczny charakter i wymiar praktyczny.

W recenzowanej rozprawie doktorskiej Autorka podjęła próbę poszukiwania autorskiej metody charakteryzującej się niską kosztochłonnością i czasochłonnością, bazującej na posiadanej wiedzy i umożliwiającej wiarygodne wyznaczenie jednego z parametrów charakteryzujących własności fizyczne materiałów antropogenicznych. Swoje rozważania zawężyła do kruszyw antropogenicznych postindustrialnych i recydingowych uzasadniając ten wybór ich przydatnością w budownictwie, a prognozowanym parametrem jest współczynnik filtracji. Zmienne wejściowe modelu zostały zdefiniowane jako uziarnienie i stosunki objętościowe kruszyw.

Podjęty przez Doktorantkę wysiłek badawczy związany z budową modeli predykcyjnych opartych na autorskiej bazie danych i algorytmach uczenia maszynowego prowadzi ostatecznie do opracowania metody wyznaczenia współczynnika filtracji dla wybranych kruszyw. Rozważany przez Autorkę problem bez wątpienia, mieści się w przedmiocie badań w dyscyplinie Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport. Uzyskane rezultaty poszerzą wiedzę dotyczącą metod wyznaczenia współczynnika filtracji, a tym samym przyczynią się do wspomagania procesów decyzyjnych w obszarze zasadności wykorzystywania kruszyw antropogenicznych w budownictwie dostarczając jeden z podstawowych parametrów charakteryzujących ich własności fizyczne.

Biorąc powyższe pod uwagę stwierdzam, że podjęty w pracy doktorskiej temat jest aktualny ważny, a podjęty przez Autorkę problem badawczy jest oryginalny. Wybór problematyki związanej z budową modelu predykcyjnego do oszacowania współczynnika filtracji i poszukiwanie algorytmu uczenia maszynowego, który zapewni satysfakcjonującą wartość tego współczynnika bliską wartości obserwowanej jest trafny zarówno z naukowego, jak i praktycznego punktu widzenia.

Doktorantka wskazała zagadnienie, które nie zostało jeszcze zbadane, opracowała własną metodykę badań i zaproponowała autorską metodę wyznaczania współczynnika filtracji dla wybranych kruszyw. Podjęty w pracy doktorskiej temat oceniam jako trafny do rozważań naukowych.

4.2. Ocena celu, hipotezy rozprawy i metody rozwiązania postawionego problemu

Na podstawie przeglądu literatury i wstępnych analiz Doktorantka sformułowała następujący cel pracy:

„Celem pracy jest udowodnienie, że algorytmy uczenia maszynowego znajdują zastosowanie użytkowe w wyznaczaniu parametrów geotechnicznych dla potrzeb zarządzania odpadami, co w pracy zaprezentowano na przykładzie wyznaczenia współczynnika filtracji k.”

Zdefiniowano także cele szczegółowe, które umożliwiają osiągnięcie celu głównego. Są to:

- *Zweryfikowanie użyteczności algorytmów uczenia maszynowego w wyznaczaniu parametrów geotechnicznych, w pracy zaprezentowanego na przykładzie wyznaczenia współczynnika filtracji.*
- *Określenie czy możliwa jest skuteczna predykcja współczynnika filtracji dla gruntów antropogenicznych w oparciu o te same właściwości materiału jak dla gruntów naturalnych.*
- *Wybór właściwego algorytmu uczenia maszynowego, pozwalającego jak najdokładniej oszacować współczynnik filtracji.*
- *Wybór algorytmu uczenia maszynowego, pozwalający na dokładniejszą predykcję współczynnika filtracji w porównaniu do dotychczas stosowanych wzorów empirycznych.*
- *Dobór analiz statystycznych wspomagających proces wyboru i weryfikacji wiarygodności modelu.*
- *Interpretacja funkcjonowania algorytmu pozwalająca na określenie cech mających największy wpływ na model.*

Można odnieść wrażenie, że cel rozprawy jest szerszy niż wskazuje na to tytuł pracy (w tytule mamy ograniczenie do kruszyw antropogenicznych). Cele szczegółowe są zrozumiałe, jednak czytając je pojawiają się pewne wątpliwości, dotyczące ich sformułowania.

- W celu brzmiącym: *‘Wybór właściwego algorytmu uczenia maszynowego, pozwalającego jak najdokładniej oszacować współczynnik filtracji’* zastanawia słowo „właściwego”. Czy jest ono konieczne? I co oznacza? Zapis, że celem będzie wybór algorytmu uczenia maszynowego pozwalający jak najdokładniej oszacować współczynnik filtracji wydaje się wystarczający.

- W celu „*Dobór analiz statystycznych wspomagających proces wyboru i weryfikacji wiarygodności modelu.*” korzystniejszy byłby zapis: „*Wykonanie analiz.*”

- W czwartym celu szczegółowym powinno być: „*pozwalającego*” zamiast „*pozwalający*” .

- Zastanawia także cel szczegółowy pracy: *Wybór algorytmu uczenia maszynowego, pozwalający na dokładniejszą predykcję współczynnika filtracji w porównaniu do dotychczas stosowanych wzorów empirycznych.* Gdyby takiego modelu nie udało się zbudować, ten cel pracy nie zastałby osiągnięty. W tym wypadku korzystniejszym dla Doktorantki było postawienie hipotezy (którą zresztą sformułowała jako hipotezę pomocniczą) i pominięcie tego celu.

W rozprawie sformułowano także hipotezę i hipotezy pomocnicze.

Hipoteza pracy brzmi: „*Możliwa jest racjonalna predykcja współczynnika filtracji dla kruszyw antropogenicznych przy zastosowaniu algorytmów uczenia maszynowego z wykorzystaniem parametrów opisujących właściwości fizyczne – uziarnienie i stosunki objętościowe gruntu.*”

Hipotezy pomocnicze brzmią:

- *Możliwe jest wyznaczenie konkretnego algorytmu uczenia maszynowego najdokładniej dopasowanego do wartości obserwowanych, który ściślej prognozuje wartość współczynnika filtracji niż dotychczas stosowane metody empiryczne.*

- *Zastosowanie parametrów charakteryzujących uziarnienie i stosunki objętościowe gruntu (gęstość objętościowa, wskaźnik porowatości i stopień zagęszczenia) umożliwi prognozowanie wartości współczynnika filtracji zarówno dla kruszyw antropogenicznych jak i gruntów naturalnych.*

Moje wątpliwości budzi postawienie hipotez i użycie sformułowań „*możliwa jest*” oraz „*umożliwia*”. Według mnie, zaplanowanie i wykonanie tak obszernych badań laboratoryjnych i analiz komputerowych pozwalało na sformułowanie tezy pracy.

Założony **cel główny rozprawy został osiągnięty** poprzez realizację celów szczegółowych. Doktorantka zbudowała modele predykcyjne, a tym samym udowodniła, że algorytmy uczenia maszynowego znajdują zastosowanie użytkowe w wyznaczaniu parametrów geotechnicznych. Ich użyteczność i skuteczność dowiedziono w oparciu o akceptowalne wartości błędów. Dokonano wyboru algorytmu o najlepszej jakości predykcji, który prognozuje wskaźnik filtracji najbliższy wartościom obserwowanym. Wskazano model, który dokładniej oszacowuje wskaźnik filtracji niż wzory empiryczne. Dokonano analiz statystycznych dla oceny jakości predykcji w postaci przeprowadzonych testów i analiz diagnostycznych i wskazano zmienne mające największy wpływ na prognozowanie przez model.

Należy także stwierdzić, że postawiona **hipoteza i hipotezy pomocnicze zostały sprawdzone** przeprowadzonymi przez Doktorantkę badaniami. Doktorantka wykazała, że możliwa jest predykcja współczynnika filtracji przy zastosowaniu algorytmów uczenia maszynowego z wykorzystaniem parametrów opisujących właściwości fizyczne zarówno kruszyw naturalnych, jak i antropogenicznych (uziarnienie i stosunki objętościowe gruntu), a wybrany model trafniej prognozuje wartości współczynnika filtracji niż dotychczas stosowane metody empiryczne.

Realizacja celów i sprawdzenie postawionych hipotez wymagały od Autorki przeprowadzenia studiów literaturowych, wykazania się wiedzą w temacie kruszyw budowlanych, ich właściwości fizycznych i chemicznych, znajomością metod wyznaczania współczynnika filtracji, znajomością specyfiki i umiejętnością prowadzenia badań laboratoryjnych, a także posiadaniem umiejętności posługiwania się metodami badawczymi i narzędziami matematycznymi w tym: metodami statystycznymi, algorytmami uczenia maszynowego, językiem oprogramowania R oraz Python i innymi narzędziami informatycznymi. Wybrane i zastosowane metody do rozwiązania postawionego problemu badawczego są trafne i nie budzą żadnych wątpliwości.

Zastosowana w recenzowanej rozprawie metodyka badań opracowana przez Doktorantkę obejmowała następujące etapy:

1. Identyfikację i zdefiniowanie problemu badawczego.

2. Badania laboratoryjne kruszyw antropogenicznych w celu określenia właściwości chemicznych i fizycznych.
3. Badania laboratoryjne współczynnika filtracji dla wybranych kruszyw naturalnych i antropogenicznych.
4. Wybranie zmiennych opisujących do modelowania i zbudowanie bazy danych.
5. Budowa modeli predykcyjnych z wykorzystaniem wybranych algorytmów uczenia maszynowego.
6. Ocena poprawności prognozy, jakości i wydajności modeli predykcyjnych.
7. Ocena przydatności parametrów wejściowych w przewidywaniu zmiennej wyjściowej.
8. Wybór najlepszego modelu predykcyjnego.
9. Porównanie uzyskanych wyników z modelu do wartości uzyskanych z wykorzystaniem wzorów empirycznych.

4.3. Ocena naukowej wartości rozprawy

Mgr inż. Justyna Dziecioł sformułowała problem naukowy – wykazała zasadność poszukiwania nowej metody wyznaczenia współczynnika filtracji dla kruszyw antropogenicznych, a następnie przedstawiła jego oryginalne rozwiązanie. Doktorantka opracowała autorską metodykę badań i konsekwentnie ją realizowała, by osiągnąć zdefiniowane cele pracy.

Do największych osiągnięć naukowych Doktorantki zaliczam:

1. Budowę autorskiej bazy danych zawierającej 1369 próbek dla kruszyw naturalnych i 2889 próbek dla kruszyw antropogenicznych.
2. Budowę modeli predykcyjnych w oparciu o wybrane algorytmy uczenia maszynowego z wykorzystaniem dwóch metod podziału próby na zbiór uczący i testowy.
3. Liczne testy i obszerną analizę diagnostyczną służącą weryfikacji poprawności i jakości działania zaproponowanych modeli.
4. Zastosowanie techniki SHAP do oceny przydatności poszczególnych zmiennych wejściowych w predykcji zmiennej wyjściowej modelu.
5. Trafną ocenę możliwości użytkowych zaproponowanej metody przez porównanie wyników z modelu z wynikami uzyskiwanymi przy zastosowaniu wzorów empirycznych.

5. Uwagi krytyczne

Przy ogólnej pozytywnej ocenie rozprawy nasuwają się pewne uwagi. Mają one charakter dyskusyjny, nie obniżają walorów naukowych, warsztatowych i poznawczych zawartych w treści pracy, jednakże wymagają ustosunkowania się do nich Autorki rozprawy.

5.1. Uwagi dotyczące kwestii merytorycznych

1. Analizując kruszywa antropogeniczne wybrano kruszywa postindustrialne i recyclingowe. Nie znalazłam w pracy uzasadnienia, dlaczego nie uwzględniono w badaniach kruszyw sztucznych. Proszę Doktorantkę o wyjaśnienie.

2. Na stronie 33 Doktorantka zapisała uwagę dotyczącą podziału zbioru danych: „Zwyczajowo dzieli się je w proporcji 70% dane treningowe i 30% dane testowe, rzadziej jest to stosunek 80% do 20%.” Biorąc pod uwagę naukowy charakter rozprawy, czy nie należało się w tym miejscu odwołać do właściwych pozycji literatury? Tym bardziej, że podział 70/30 został zastosowany w prowadzonych badaniach.

3. Tabela 1 str. 36 zawiera modele i metody uczenia, w tytule z kolei odnajdujemy algorytmy, a jeszcze w innym miejscu (str. 32) mowa jest o technikach uczenia maszynowego. Proszę o zdefiniowanie przez Doktorantkę pojęć używanych w pracy: algorytm, model, metoda i technika. Nawiązując dalej do Tabeli 1, czy właściwe jest nazwanie regresji czy klasyfikacji metodą uczenia algorytmu? Czy nie jest to raczej typ zadania (problemu), któremu dedykowany jest algorytm uczenia maszynowego?

4. Odnosząc się do tytułu pracy zastanawia decyzja Doktorantki o przeprowadzeniu badań i analiz komputerowych dla kruszyw naturalnych, którym poświęcona jest znaczna część rozdziału 5. W postawionym celu szczegółowym i hipotezie pomocniczej wprowadzono zapisy dotyczące predykcji opartej o te same zmienne opisujące (tzn. takie same cechy dla obu rodzajów kruszyw). Czy rozważano przyjęcie innych zmiennych wejściowych do modelowania współczynnika filtracji dla kruszyw antropogenicznych niż dla naturalnych?

5. W podrozdziale 4.2.2.1. dokonano wyboru algorytmów spośród 8 wymienionych. Doktorantka zdecydowała się na zastosowanie lasów losowych (*ang. random forest*) - dlaczego nie rozważała prostszego modelu w postaci drzewa regresyjnego, tym bardziej, że wymieniła go w Tabeli 1 jako model pasujący do zadania regresji.

6. Czy wybór algorytmu *k*- najbliższych sąsiadów (*ang. k- Nearest Neighbors*) był właściwy skoro jest to algorytm dedykowany przede wszystkim zadaniom klasyfikacji, co zresztą Doktorantka wskazuje (w Tabeli 1; w Tabeli 9; na str. 75 w opisie algorytmu)? Dodatkowo Doktorantka podkreśla - na str. 77 w pierwszym akapicie „*k-NN zasadniczo nie jest zalecany do analizy dużych zbiorów danych*”, a właśnie w oparciu o taką cechę wyeliminowała algorytm: maszyny wektorów własnych (*ang. SVM*) uzasadniając „*Algorytm Support Vector Machines (SVM) odrzucono mając na względzie to, że nie jest on właściwy dla dużych zbiorów danych*”.

7. Na Rys. 34 str. 83 zestawiono hiperparametry dla zaproponowanych algorytmów uczenia maszynowego. Moją uwagę zwróciły sztuczne sieci neuronowe. Rozumiem, że rozważano sieci z 11 lub 9 lub 7 warstwami ukrytymi. Czy liczba warstw ukrytych była dobrana losowo? Czy rozważano mniej złożone struktury sieci? Która z sieci ostatecznie uzyskała najlepsze wyniki? Ile neuronów przyjęto w warstwach ukrytych?

8. Drugie pytanie dotyczące hiperparametrów brzmi: W jaki sposób ustalono liczbę 12 drzew w algorytmie lasu losowego?

9. Proszę o przedstawienie wybranego rekordu z bazy danych i krótkie wyjaśnienie, jak zmienne opisujące i zmienna opisywana były wprowadzane do modelu. Czy konieczne było np. kodowanie danych?

10. Proszę o interpretację zapisanego w pracy wniosku: „*Obie z zastosowanych metod podziału próby dały porównywalne wyniki analizy błędów oraz dopasowania R^2 , jednak były one mniej optymistyczne dla metody walidacji krzyżowej*”. O czym to może świadczyć? Gdyby należało wybrać

jeden z modeli (w zależności od metody podziału zbioru danych), który należałoby wskazać i dlaczego?

11. Jak wiadomo, z uwagi na dużą różnorodność gruntów antropogenicznych nie można na podstawie określonych parametrów klasyfikować całej grupy tych gruntów o czym świadczy np. możliwość wydzielenia kilku rodzajów gruntu z jednej hałdy. Moje pytanie dotyczy użyteczności modelu. Czy w przypadku zastosowania nowej grupy kruszyw, zaproponowany model będzie efektywny? Czy należałoby przeprowadzić ponowne badania i analizy?

12. Jak Doktorantka ocenia perspektywę praktycznego wykorzystania opracowanej metody wyznaczania współczynnika filtracji? Jakie działania należałoby przedsięwziąć, żeby model był gotowy do użycia w praktyce inżynierskiej?

5.2. Uwagi dotyczące edycji pracy i poprawności językowej

1. Należy podkreślić, że praca przygotowana jest starannie.

2. Bardzo przydatne i wartościowe dla zrozumienia pracy są rysunki, szczególnie te zawierające schematy i algorytmy jak np. Rys. 6; Rys. 7 czy np. Rys. 33.

3. W treści pracy, w opisie Rys. 36 pojawia się odwołanie do osi OX, która nie została na rysunku zaznaczona.

4. W pracy o charakterze naukowym nie należy stosować formy osobowej, którą Doktorantka kilkakrotnie używa np. na str. 37 „*dokonyjemy porównania*”; na str. 70 „*z jakimi mamy to o czynienia*”; na str. 75 „*możemy przewidzieć*”, „*musimy ustalić*”; str. 83 „*gdy optymalizujemy*” str. 101 „*obserwujemy występowanie*”. Nie należy także stosować w odwołaniu do rysunków zapisów jak na str. 103: „*(zobacz rysunek 41 i 42)*”.

5. Wydaje się, że w spisie treści oraz w tytułach rozdziału 5.1.2 i rozdziału 5.2.2 występuje ten sam błąd. Zapisano Eksploatacja danych, a powinno być wg mnie Eksploracja danych.

6. W tabelach, na rysunkach i w tekście pracy znakiem używanym do oddzielenia części całkowitej od części ułamkowej w zapisie liczby zastosowana jest kropka. Zgodnie z polskimi zwyczajami typograficznymi część dziesiętną oddziela się przecinkiem, zapis z kropką stosuje się w tekstach anglojęzycznych.

7. W kilku fragmentach pracy zdecydowanie brakuje odwołań do literatury. Szczególnie jest to rażące na str. 122 w podrozdziale 5.1.4, w którym prezentowana jest metoda walidacji krzyżowej.

8. Str. 87 - Zdanie: *Na rysunku zaprezentowano szereg analiz statystycznych pozwalających na analizę struktury zbioru danych* - jest niepoprawnie sformułowane. Być może chodzi o wyniki analiz statystycznych?

9. W kilku miejscach znajdują się błędy z zapisie pojęcia heteroskedastyczność np. na str. 97 *Analiza hetroskedestyczności* na str. 108; *Analiza hetroskedestyczności*;

10. W treści można odnaleźć drobne błędy językowe, tzw. literówki np.:

- Str. 20 jest: *Podczas procesu mieszania wody (H₂O) i cement tworzą pastę cementową ...* - powinno być: *cementu*;

- Str. 21 jest: *dla kruszyw naturalnych rozwiązania w postaci prognoz przy użyciu wzorów empirycznych jest powszechną praktyką*- powinno być: *są*;

- Str. 32 jest: *Jeszcze węższą podgrupą jest sam uczenie maszynowe* - powinno być: *samo*;

- Str. 37 jest: *jednak głównie skupiają się one wokół sztucznych sieci* - powinno być: głównie;
- Str.40 jest: *przy projektowaniu konstrukcji ścian oporowych* - powinno być: projektowaniu;
- Str. 65 jest: *zweryfikowano podane przez Chappuisa'a* - powinno być Chapius'a;
- Str. 76 jest: *Algorytm k-NN charakteryzuje jego dokładny predykcji oraz szeroka stosowalność jednak, przechowywanie całego zbioru danych.* - powinno być; Algorytm k-NN charakteryzuje dokładność jego predykcji;
- Str. 78 jest: *co daje innym zmiennym większą szansę na wybrani* - powinno być: na wybranie;

6. Wniosek końcowy

Pomimo sformułowanych wcześniej uwag krytycznych, recenzowaną rozprawę uważam za wartościową i oryginalną. Obok znaczenia naukowego i poznawczego, przeprowadzone badania mają duże znaczenie praktyczne dla obszaru inżynierii lądowej, w szczególności geotechniki, budownictwa drogowego i kolejowego czy hydrogeologii.

Recenzowana praca doktorska mgr inż. Justyny Dziecioł **stanowi oryginalne rozwiązanie postawionego problemu naukowego**, a opracowanie autorskiej metody predykcji współczynnika filtracji z wykorzystaniem algorytmów uczenia maszynowego **zapewnia niezbędne cechy nowości i wnosi wkład w rozwój dyscypliny Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport.**

Cel pracy został osiągnięty. Doktorantka wykazała zasadność poszukiwania nowej metody wyznaczania współczynnika filtracji dla kruszyw antropogenicznych. Wykazała się także dobrą znajomością aktualnego stanu wiedzy w zakresie objętym tematem. Opracowała metodykę badań i konsekwentnie ją realizowała. Zbudowała autorską bazę danych, w której zawarła zidentyfikowane parametry opisujące cechy kruszyw i opracowała oryginalne modele bazujące na zaawansowanych algorytmach uczenia maszynowego. Otrzymała oryginalne wyniki i wykazała, że potrafi analizować i krytycznie oceniać uzyskane rezultaty oraz formułować poprawne wnioski. Zaproponowała również kierunki dalszych, możliwych badań. Doktorantka dysponuje bardzo dobrze rozwiniętym warsztatem obliczeniowym w zakresie prowadzonych badań i analiz.

Mgr inż. Justyna Dziecioł wykazała tym samym umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej z wykorzystaniem odpowiednich metod i technik badawczych.

Rozprawa jest opracowana na bardzo dobrym poziomie naukowym i prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną Doktorantki w wymienionej dyscyplinie naukowej.

W związku z powyższym uważam, że **przedłożona przez Panią mgr inż. Justynę Dziecioł rozprawa pt. „Analiza możliwości wykorzystania algorytmów uczenia maszynowego w predykcji współczynnika filtracji dla wybranych kruszyw pochodzenia antropogenicznego” spełnia wymogi stawiane pracom doktorskim** określone w Ustawie z dnia 20 lipca 2018 r. - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce, i **stawiam wniosek o przyjęcie rozprawy doktorskiej i dopuszczenie jej do publicznej obrony.**



Agnieszka Leśniak