

Warszawa, 3 sierpnia 2023 r.

**dr hab. inż. Ryszard Chmielewski, prof. WAT**  
Zakład Inżynierii i Infrastruktury Wojskowej  
Instytut Inżynierii Lądowej  
Wojskowa Akademia Techniczna

## RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Justyny Dziecioł

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

opracowanej pod kierunkiem: Promotor - dr hab. inż. Wojciech Sas, prof. SGGW  
Promotor pomocniczy - dr inż. Andrzej Głuchowski

### 1. Podstawa opracowania recenzji

Podstawą opracowania recenzji jest uchwała Rady Dyscypliny Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport, Szkoły Głównej Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie, zlecenie podpisane przez Przewodniczącego Rady, prof. dr hab. inż. Eugeniusza Kodę.

### 2. Charakterystyka rozprawy

Przedmiotem recenzji jest rozprawa doktorska mgr inż. Justyny Dziecioł pt. „*Analiza możliwości wykorzystania algorytmów uczenia maszynowego w predykcji współczynnika filtracji dla wybranych kruszyw pochodzenia antropogenicznego*”. Praca ma charakter teoretyczno-badawczy, składa się ze streszczenia w języku polskim i angielskim, 6-ciu rozdziałów merytorycznych, załączników oraz spisów literatury, rysunków i tabel. Wykaz pozycji bibliograficznych obejmuje 294 pozycje, tekst rozprawy liczy 242 strony, zawiera 85 rysunków, 27 tabel oraz 23 wzory.

W rozdziale pierwszym (Wstęp), jako wprowadzenie do problemu badawczego, wskazano na rosnącą w budownictwie potrzebę minimalizacji zużycia surowców oraz wykorzystania surowców o niskim wpływie na środowisko naturalne. Właśnie materiały z recyklingu podaje jako alternatywę dla kruszyw naturalnych, wskazuje przy tym znaczny udział analizowanych materiałów, tj. gruzu betonowego i żużla, w ogólnej puli odpadów na świecie i w Europie. Jako podstawowe uzasadnienia podjętego w rozprawie tematu określa koszt wyznaczania wymaganych cech fizycznych i mechanicznych kruszyw antropogenicznych przed ich zastosowaniem w budowlach ziemnych. Proponuje zastosowanie uczenia maszynowego jako narzędzia umożliwiającego określenie współczynnika filtracji kruszyw antropogenicznych na podstawie różnych, dostępnych ich cech.

Drugi rozdział stanowi przegląd literatury przedmiotu, obejmujący: ogólny opis zastosowania materiałów antropogenicznych w budownictwie, opis żużla i kruszywa betonowego pod kątem genezy powstawania i podstawowych właściwości, opis współczynnika filtracji pod kątem jego definicji oraz sposobów określania jego wartości (laboratoryjnie i na podstawie równań empirycznych) oraz opis idei i zasad uczenia maszynowego. Rozdział kończy podsumowanie, które w dziesięciu punktach przedstawia ogólne wnioski z przeglądu literatury.

Trzeci rozdział stanowi określenie celu pracy, przedstawienie zakresu badań oraz postawienie głównej hipotezy badawczej i dwóch hipotez pomocniczych. Zasadnicza hipoteza zakłada, że **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, natomiast hipotezy pomocnicze zakładają, że możliwe jest wyznaczenie konkretnego algorytmu uczenia maszynowego najdokładniej dopasowanego do wartości obserwowanych, który ściślej prognozuje wartość współczynnika filtracji niż dotychczas stosowane metody empiryczne oraz że zastosowanie parametrów charakteryzujących uziarnienie i stosunki objętościowe gruntu (gęstość objętościowa, wskaźnik porowatości i stopień zagęszczenia) umożliwia prognozowanie wartości współczynnika filtracji zarówno dla kruszyw antropogenicznych jak i gruntów naturalnych.*

W czwartym rozdziale Doktorantka przedstawia właściwości badanych materiałów, jak również metodykę wykorzystaną do zrealizowania założonego programu badań. Opis wykorzystanych kruszyw ogranicza się do kruszyw antropogenicznych, dla których przedstawione zostały właściwości chemiczne (skład i kwasowość) jak i właściwości fizyczne (gęstość, porowatość wskaźniki uziarnienie oraz współczynnik filtracji. W metodyce badań opisano przygotowanie próbek i samo badanie współczynnika filtracji oraz przedstawiono osiem wybranych algorytmów uczenia maszynowego z których do zastosowania przy prognozowaniu współczynnika filtracji wybrano sześć.

Rozdział piąty to badania i analizy własne Doktorantki dotyczące określenia, który z wybranych algorytmów pozwala na uzyskanie współczynnika filtracji zarówno dla gruntów naturalnych jak i antropogenicznych. W pierwszej kolejności przedstawiono wyniki analizy dla gruntów naturalnych, które stanowiły trzy piaski o różnym uziarnieniu. W tym miejscu nasuwa się pytanie: dlaczego dane gruntów naturalnych nie zostały przedstawione w rozdziale czwartym, w którym przedstawiane są badane materiały. Po scharakteryzowaniu gruntów naturalnych Doktorantka przedstawiła zależności pomiędzy przyjętymi parametrami a współczynnikiem filtracji oraz opracowała modele z wykorzystaniem sześciu algorytmów uczenia maszynowego. Z puli wyników przyjętych do analizy 70 % wykorzystano w modelu uczącym, natomiast pozostałe 30 % modelu testowym. Uzyskane wyniki dla wszystkich modeli zostały ocenione metodą walidacji krzyżowej, która pozwoliła na określenie modeli pozwalających najlepiej określić wartość współczynnika filtracji. Analogiczny tok postępowania dotyczył kruszyw antropogenicznych. Całość rozdziału została podsumowana znaczenia poszczególnych cech dla algorytmów uczenia maszynowego. Dodatkowym elementem podsumowującym szukanie wartości współczynnika filtracji jest zestawienie wyników z wartościami uzyskiwanymi za pomocą opisanych wcześniej wzorów empirycznych.

Rozdział szósty stanowi zestawienie wniosków jakie nasunęły się Autorce po realizacji pracy. Pierwszych czternaście wniosków dotyczy możliwości określenia współczynnika filtracji przy zastosowaniu algorytmów uczenia maszynowego, kolejne cztery wnioski odnoszą się do wykorzystania wyników analiz w procesie budowlanym. Doktorantka po przedstawieniu tych wniosków wskazała możliwe kierunki dalszych badań w zakresie wykorzystania algorytmów uczenia maszynowego w określaniu współczynnika filtracji różnych materiałów antropogenicznych.

### **3. Wartość naukowa rozprawy**

Metody szeroko rozumianej inteligencji obliczeniowej są obecnie w świecie szeroko rozwijane, a ich zastosowanie w inżynierii lądowej ma coraz bardziej użyteczny charakter i wymiar praktyczny. Podjęte przez Doktorantkę zagadnienie wykorzystania algorytmów uczenia maszynowego do określenia cech materiałów antropogenicznych wpisuje się w ogólnoswiatowe trendy wykorzystania materiałów określanych jako odpadowe w budownictwie, w szczególności jako materiały mogące zastąpić topniejące zasoby kruszyw naturalnych. Aby takie rozwiązania było możliwe należy właściwie określić

cechy mechaniczne i fizyczne materiałów antropogenicznych, jak również sprawdzić, czy nie są one niebezpieczne dla środowiska.

Stosowane dotychczas do określania współczynnika filtracji wzory empiryczne mają szereg ograniczeń, a wartości uzyskiwane za ich pomocą nie zawsze odpowiadają rzeczywistości. Autorka rozprawy przeanalizowała szereg algorytmów uczenia maszynowego i wskazała algorytm najlepiej sprawdzający się jako narzędzie do określania współczynnika filtracji. Ocena algorytmów nie ograniczyła się tylko do oceny uzyskiwanych wartości współczynnika filtracji, ale również obejmuje testy i analizy diagnostyczne modeli. Obejmują one analizę rozkładu normalności, analizę oczekiwanego skumulowanego prawdopodobieństwa reszt, analizę danych zaobserwowanych względem predykcji, analizę wartości wpływowych oraz analizę hetroskedestyczności. Zastosowanie tak szerokiego wachlarza narzędzi pozwala na właściwą ocenę poszczególnych algorytmów do określania współczynnika filtracji materiałów naturalnych i antropogenicznych.

Biorąc powyższe pod uwagę stwierdzam, że podjęty przez Doktorantkę temat rozprawy jest oryginalny i aktualny, a cel rozprawy zasadny i ważny tak z naukowego, jak i z praktycznego punktu widzenia.

#### **4. Uwagi recenzenta do przedstawionej dysertacji**

##### **4.1. Uwagi merytoryczne**

Praca stanowi niewątpliwie ciekawy i cenny wkład we wdrażaniu metod uczenia maszynowego do inżynierii lądowej. Jakkolwiek w ocenie recenzenta Autorka nie ustrzegła się kilku nieprawidłowości.

W mojej ocenie brak jest jednoznacznie przedstawionego programu badań, badane były zarówno grunty naturalne jak i materiały antropogeniczne. Gruntów naturalnych były trzy rodzaje, natomiast antropogenicznych cztery, stąd niezrozumiałym jest ponad dwukrotna różnica w ilości wyników (odpowiednio  $n = 1369$  oraz  $n = 2889$ ). Rozdział czwarty *Material i metodyka badań* nie zawiera opisu gruntów naturalnych (znajduje się on w rozdziale piątym), dodatkowo nie podaje jakie cechy fizyczne i w jaki sposób były określane (odczytywane), praktycznie w zakresie badań laboratoryjnych ogranicza się do opisu sposobu badania współczynnika filtracji.

Sposób przedstawienia wyników badań i obliczeń w wielu miejscach jest mało czytelny. Wykresy radarowe nie przedstawiają dokładnie wyników analizy wydajności modeli, wykresy do oceny modeli dla próby w przedziale 70/30 oraz dla próby dzielonej metodą *Cross Validation* mogłyby być powiększone i przeniesione do załączników. Poprawiłoby to przejrzystość pracy. Całość pracy jest bardziej nastawiona na wykorzystanie narzędzia, jakim niewątpliwie jest uczenie maszynowe, a nie praktyczne wykorzystanie wyników w geotechnice.

W mojej ocenie brak jest analizy możliwości zastosowania wzorów empirycznych dla kruszyw naturalnych jak i antropogenicznych w rozbiciu na poszczególne badane materiały. Pozwoliłoby to na określenie możliwości zastosowania tych wzorów dla poszczególnych materiałów oraz na stwierdzenie, co powoduje rozbieżności w wynikach.

W przedstawieniu wyników i podsumowania pracy byłoby warto przedstawić wyznaczone współczynniki filtracji dla poszczególnych materiałów i metod wyznaczania tego współczynnika.

#### 4.2. Uwagi odnośnie układu pracy i strony edytorskiej

Układ recenzowanej pracy jest ogólnie poprawny, zgodny z ogólnie przyjętymi wymogami dla tego rodzaju opracowań naukowych. Doktorantka zachowała balans pomiędzy opisami wiedzy dostępnej i opisem badań własnych. Prezentowany styl i język jest na dobrym poziomie, prezentowane wyniki są dość klarownie i wyczerpująco opisane.

Pierwszą nasuwającą się uwagę jest stosowanie w liczbach w większości pracy kropek zamiast przecinków. Pod większością rysunków brakuje źródła, zrozumiałe jest, że rysunki z wynikami analiz są opracowane przez Autorkę rozprawy, natomiast rysunki przedstawiające ogólne wiadomości mogą być zaczerpnięte. Brakuje również wykazu stosowanych oznaczeń i symboli, szczególnie, że nie zawsze są wyjaśniane w przytoczonych opisach i wzorach.

Uwagi szczegółowe:

- str. 19, 12 wiersz od dołu, stosowane są określenia cech fizycznych: masa nasypowa, masa objętościowa ziaren oraz ciężar właściwy z tymi samymi jednostkami  $\text{kg/m}^3$ ,
- str. 20, 7 wiersz od dołu: „...w zastosowaniach niekonstrukcyjnych, takich jak materiał wypełniający, fundamenty i podbudowy...” – fundament jest elementem konstrukcyjnym,
- str. 27, 28, brak opisu użytych we wzorach symboli,
- str. 42, rysunek 7, nie jest określone co przedstawia wartość  $n$  (domyślnie ilość danych),
- str. 47, rysunek 10, brakuje informacji dlaczego krzywa uziarnienie dla gruntu luźno usypanego ( $E_z=0$ ) przebiega wyżej niż krzywe dla  $E_z=0,09$  oraz  $E_z=0,17$ ,
- str. 49, w opisie nad tabelą 3 gęstość właściwa wynosi  $2,4 \text{ g/cm}^3$ , w tabeli  $2,346 \text{ g/cm}^3$ ,
- str. 49, w tabeli 3 gęstość objętościową przedstawiono jako  $\rho_d$ , z obliczeń porowatości i wskaźnika porowatości powinna być to gęstość objętościowa szkieletu gruntowego, analogicznie ten sam błąd występuje w tabeli 5 na str. 54, tabeli 7 na str. 60, tabeli 8 na str. 61,
- str. 70, ostatnia wiersz: „...analizie podlega ponad 2500 wyników badań...” - na rysunku 7 opisane jest  $n = 2889$  wyników, w mojej ocenie jest to zbyt duża rozbieżność,
- str. 86, rysunek 34, wynika że dla piasku III wykonywane były tylko badania dla energii zagęszczenia  $E_z=0$ , brak jest wyjaśnienia dlaczego, z rysunku nie wynika liczba wyników badań (na rysunku 7 jest określone dla gruntów naturalnych  $n = 1369$ ),
- str. 88, tabela 10, dlaczego w limitach parametrów dotyczących wielkości cząsteczek  $d_x$  wartość maksymalna przekracza 2 mm, skoro krzywe uziarnienia na rysunku 35 kończą się na tej wartości, z czego wynika przyjęty limit gęstości właściwej kruszyw naturalnych, w mojej ocenie powinno to oscylować około wartości  $2,65 \text{ g/cm}^3$ ,
- str. 89, na rysunku 37 widoczne są współczynniki korelacji większe dla niektórych analizowanych parametrów niż wymienionych nad rysunkiem,
- str. 121, opis nad tabelą 13 nie pokrywa się z danymi w tej tabeli,
- str. 124, w opisie nad tabelą 15 współczynnik dopasowania dla algorytmu *AdaBoost* wynosi  $R^2 = 0,988$ , w tabeli ten współczynnik wynosi  $0,994$ ,
- str. 146, w opisie wskazana jest istotność porowatości, a nie wykazano wskaźnika porowatości, który na rysunku 58 ma większy współczynnik korelacji,
- str. 148, 149, rysunek 59 jest mało czytelny,
- str. 152, opis przedstawia wyniki estymacji jako **zakres** (dla MSE, RMSE oraz MAE), tymczasem w tabeli są to wartości dla zestawu uczącego i osobno dla zestawu testowego, analogicznie jest to opisane dla współczynnika determinacji dla *Linear Regression* na str. 153,
- str. 172, w opisie dla modelu *Gradient Boosting* przedstawiono wyniki modelu  $k$ -NN z tabeli 23, natomiast na rysunku 70 interpretacja na wykresach nie pokrywa się z danymi z tabeli,

- str. 174, opis przedstawia wyniki estymacji jako **zakres** (dla MSE, RMSE oraz MAE), tymczasem w tabeli 24 są to wartości dla zestawu uczącego i osobno dla zestawu testowego, analogicznie jest to opisane dla współczynnika determinacji dla *Linear Regression*,
- str. 175, opis wyniku  $R^2$  dla algorytmu *Adaboost* jest umieszczony na str. 174 (powtórzenie),
- podpisy pod rysunkami w zakresie 63÷69 są identyczne z opisami pod rysunkami w zakresie 71÷77, w opisie powinno być odniesienie do czego się odnoszą,
- str. 194, interpretacja danych na rysunku 78 nie pokrywa się z danymi z tabeli 27 (dotyczy to modeli *Gradient Boosting* oraz *k-NN*),
- str. 209, wzory empiryczne opracowane były zasadniczo dla kruszyw naturalnych, z pewnymi ograniczeniami w ich stosowalności, celowym byłoby przedstawienie wyników obliczeń na tych wzorach empirycznych nie tylko dla gruntów antropogenicznych, ale i dla naturalnych,
- str. 209, nie zestawiono wyników obliczeń empirycznych dla poszczególnych badanych kruszyw antropogenicznych, celowym byłoby sprawdzenie jak poszczególne wzory empiryczne sprawdzają się dla poszczególnych materiałów antropogenicznych,
- str. 209, brak jest opisu sposobu obliczenia danych do wykresu na rysunku 83,
- str. 210, w jaki sposób wyznaczono % wartości rozbieżności wyników na rysunku 84,
- str. 213, we wniosku 8 powinno być zaznaczone, że odnosi się on do badanych kruszyw antropogenicznych,
- str. 214, wniosek 10 podaje możliwość uwzględnienia w analizie współczynnika filtracji warunków środowiskowych, wskazane jest przedstawienie o jakie warunkach chodzi,
- pozycje literatury 75 i 76 oraz 80 i 85 są takie same (powtórzenia).

## 5. Wnioski i ocena końcowa

Niniejsza dysertacja przedstawia możliwości wykorzystania metod uczenia maszynowego w inżynierii lądowej w zakresie określania cech materiałów budowlanych. Umożliwia to szybsze określanie parametrów niezbędnych do właściwego projektowania obiektów. W recenzowanej pracy doktorskiej mgr inż., Justyna Dziecioł rozwiązała oryginalne zadanie naukowe, polegające na ustaleniu optymalnej metody uczenia maszynowego przy określaniu współczynnika filtracji materiałów antropogenicznych.

Stwierdzam, że główna hipoteza rozprawy doktorskiej, jak również hipotezy pomocnicze, zostały udowodnione a cel pracy osiągnięty. Doktorantka wykazała się dobrą znajomością aktualnego stanu wiedzy w zakresie objętym tematem oraz umiejętnościami rozwiązywania problemów teoretycznych. Zaproponowała metodę wyznaczania współczynnika filtracji przy wykorzystaniu metody inteligencji obliczeniowej i przeprowadziła jej walidację. Uzyskała oryginalne wyniki i wykazała, że potrafi analizować i krytycznie oceniać uzyskane rezultaty oraz formułować poprawne wnioski poznawcze. Widzi również kierunki dalszych badań, świadczy to o Jej odpowiednim przygotowaniu i predyspozycjach do samodzielnego prowadzenia prac naukowo-badawczych.

Uwagi krytyczne wymienione w punkcie 4 nie obniżają w mojej ocenie bardzo dobrego poziomu merytorycznego i ogólnej wysokiej oceny dysertacji. Uwagi mają charakter porządkowy lub dyskusyjny i mam nadzieję, że przynajmniej w części będą pomocne Autorce podczas dalszej pracy naukowej i przygotowywania artykułów do czasopism naukowych.

Oceniam, że rozprawa stanowi rozwiązanie oryginalnego zagadnienia naukowego oraz potwierdzam, że Doktorant dysponuje bardzo dobrze rozwiniętym warształem obliczeniowym w zakresie prowadzonych analiz, posiada ogólną wiedzę teoretyczną

i umiejętności samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Rozprawa jest opracowana na bardzo dobrym poziomie naukowym i dobrym redakcyjnym oraz wnosi wkład w rozwój wiedzy w dyscyplinie inżynieria lądowa, geodezja i transport.

Biorąc powyższe pod uwagę stwierdzam, że recenzowana rozprawa doktorska autorstwa mgr inż. Justyny Dziecioł 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 14.03.2003 roku "O stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki" (Dz. U. z 2003 r., Nr 65, poz. 595, z późniejszymi zmianami) oraz w Ustawie z dnia 20 lipca 2018 r. „Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce" (Dz. U. z 2018 r. poz. 1668, z późniejszymi zmianami). W związku z tym stawiam wniosek o **przyjęcie rozprawy** i dopuszczenie jej do publicznej obrony.

Chmielewski