

Warszawa, 22 września 2023 r.

Prof. dr hab. inż. Leszek Rafalski
Instytut Kolejnictwa
04-275 Warszawa
Ul. Chłopickiego 50

Recenzja
pracy doktorskiej mgr inż. Justyny Dzięcioł
pt. „Analiza możliwości wykorzystania algorytmów uczenia maszynowego
w predykcji współczynnika filtracji dla wybranych kruszyw
po pochodzenia antropogenicznego”

1. Podstawa recenzji

Podstawą recenzji jest pismo prof. dr hab. inż. Eugeniusza Kody, Dyrektora Instytutu Inżynierii Lądowej Szkoły Głównej Gospodarstwa Wiejskiego, powiadamiające o powołaniu mnie przez Radę Dyscypliny Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport Szkoły Głównej Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie na posiedzeniu w dniu 12 lipca 2023 roku, na recenzenta w postępowaniu w sprawie nadania stopnia doktora mgr inż. Justynie Dzięcioł w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie inżynieria lądowa, geodezja i transport.

Podstawą prawną recenzji jest ustawa z dnia 20 lipca 2018 roku - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2018 r. poz. 1668 ze zm.).

Promotorem pracy jest dr hab. inż. Wojciech Sas, prof. SGGW z Centrum Wodnego SGGW, a promotorem pomocniczym dr inż. Andrzej Głuchowski z Centrum Wodnego SGGW.

2. Tematyka pracy, jej cel oraz zakres

Tematyka pracy dotyczy predykcji współczynnika filtracji przy wykorzystaniu algorytmów uczenia maszynowego, na podstawie właściwości fizycznych kruszyw. Celem pracy było udowodnienie, na przykładzie wyznaczenia współczynnika filtracji k , że algorytmy uczenia maszynowego znajdują zastosowanie użytkowe w wyznaczaniu parametrów geotechnicznych kruszyw. Uczenie maszynowe jest stale rozwijającą się dziedziną, a algorytmy rozwiązują

coraz skuteczniej złożone problemy regresji i klasyfikacji. Dlatego rozwiązywanie problemów predykcyjnych z wykorzystaniem algorytmów uczenia maszynowego zyskuje coraz większe zainteresowanie, na przykład w procesie projektowania.

W swej pracy Doktorantka skoncentrowała się na doborze właściwego algorytmu uczenia maszynowego, pozwalającego jak najdokładniej oszacować współczynnik filtracji. Zostały przeanalizowane różne algorytmy do wyznaczenia współczynnika filtracji w gruntach. Szczegółowa analiza eliminacyjna wyników pracy z algorytmami uczenia maszynowego pozwoliła na ich preselekcję, a późniejsza analiza statystyczna wyników umożliwiła wybór algorytmu o najlepszej odporności modelu na obserwacje odstające od ogólnej tendencji wyników.

Doktorantka zdefiniowała następujące szczegółowe cele pracy:

- Zweryfikowanie użyteczności algorytmów uczenia maszynowego w wyznaczeniu 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.

Zakres pracy obejmował badania laboratoryjne i analizy komputerowe. Wykonano badania laboratoryjne kruszyw naturalnych i antropogenicznych w zakresie cech fizycznych, chemicznych oraz badania współczynnika filtracji. Na tej podstawie została utworzona baza danych właściwości kruszyw naturalnych i antropogenicznych objętych badaniami w pracy doktorskiej. Po przetworzeniu zgromadzonych danych dokonano wyboru algorytmów spełniających ogólne kryteria do zastosowania do posiadanych zbiorów danych. Następnie tworzono, rozwijano i zatwierdzono wybór modelu powstałego na bazie konkretnego

algorytmu oraz przeprowadzono ocenę modeli wspartą analizą statystyczną. W ramach interpretacji modeli przeanalizowano, jakie cechy miały wpływ na predykcję danego modelu, objaśniono predykcję i model oraz zwizualizowano funkcjonowanie cech z wykorzystaniem drzew decyzyjnych.

Doktorantka postawiła następujące hipotezy:

Hipoteza główna:

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:

- 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) umożliwia prognozowanie wartości współczynnika filtracji zarówno dla kruszyw antropogenicznych jak i gruntów naturalnych.

3. Uwagi i pytania do poszczególnych części pracy

Tytuł pracy

Brzmienie tytułu pracy, tj. „*Analiza możliwości wykorzystania algorytmów uczenia maszynowego w predykcji współczynnika filtracji dla wybranych kruszyw pochodzenia antropogenicznego*” wskazuje, że praca powinna dotyczyć tylko kruszyw pochodzenia antropogenicznego. Natomiast w podrozdziale **3.2. Zakres pracy** podano, że „*W pierwszej kolejności wykonano badania laboratoryjne kruszyw naturalnych i antropogenicznych, które dotyczyły badania cech fizycznych i chemicznych, badania współczynnika filtracji.*” Z rys. 7 wynika, że oprócz kruszyw antropogenicznych w pracy badano i analizowano także kruszywa naturalne: Piasek I, Piasek II i Piasek III. Oznacza to, że przedmiotem pracy doktorskiej były nie tylko kruszywa antropogeniczne, a także kruszywa naturalne i w związku z tym tytuł pracy nie jest spójny z jej zawartością.

1. Wstęp

We **Wstępie** przedstawiona jest głównie problematyka gospodarki odpadami i pozyskiwania materiałów antropogenicznych przeznaczonych do zastosowania w budownictwie w kontekście zrównoważonego projektowania i wykonywania budowli. Na rys. 1 pokazano schemat podziału kruszyw antropogenicznych (alternatywnych). W zakresie kruszyw postindustrialnych wymienione są m.in. kruszywa „z surowców hutniczych metali nieżelaznych (poflotacyjne)”. Natomiast trzeba pamiętać, że oprócz drobnoziarnistych odpadów poflotacyjnych, które są trudne do wykorzystania w budownictwie, w przemyśle metali nieżelaznych wytwarzane są kruszywa gruboziarniste, z powodzeniem wykorzystywane do budowy dróg. Przykładem tego są kruszywa pomiedziowe wytwarzane przez KGHM wykorzystane jako grysy do konstrukcji nawierzchni drogowych. Dlatego kruszywa postindustrialne z surowców hutniczych metali nieżelaznych powinny uwzględniać zarówno kruszywa gruboziarniste jak i poflotacyjne (drobnoziarniste). Na tym samym rysunku w zakresie kruszyw recyklingowych zdefiniowany jest niepoprawnie „frez asfaltowy”, ponieważ frez jest wielostrzowym narzędziem skrawającym. Poprawne określenie tego materiału to „destrukt asfaltowy” (definicja ta jest powszechnie stosowana w drogownictwie, a także podana w dwóch rozporządzeniach Ministra Klimatu i Środowiska z listopada i grudnia 2021 r. w sprawie określenia szczegółowych kryteriów stosowania warunków utraty statusu odpadów dla odpadów destruktu asfaltowego).

2. Przegląd literatury

W rozdziale 2 opisane są zagadnienia materiałów antropogenicznych jako alternatywy w budownictwie, geneza i właściwości materiałów antropogenicznych: żużła wielkopieczowego, żużła paleniskowego i kruszywa betonowego, metody badania i wzory na obliczenie współczynnika filtracji oraz problematyka uczenia maszynowego jako narzędzie predykcyjne wspomagające proces zarządzania. Rozdział ten jest zakończony podsumowaniem przeglądu literatury.

Na str. 22 powinno być poprawnie: „*Kruszywo betonowe (RCA) stosowane w konstrukcjach ziemnych jest zazwyczaj tańsze niż kruszywa naturalne*”.

Na str. 28-29 przedstawione są wzory empiryczne do oszacowania współczynnika filtracji: Hazena, Kozeny-Karmana, Terzagiego, Chapuis, Slichtera, Alyamani i Sen. Natomiast brakuje opisu niektórych symboli stosowanych w tych wzorach, np. g , v , d_{10} , d_{50} , I_0 .

W tej części mam pytanie o kryterium wyboru prezentowanych wzorów, są także inne, np. USBSC, Seelheima. Czy jest możliwe wykorzystanie do oszacowania współczynnika filtracji

średnicy miarodajnej de według J. Krügera (Z. Pazdro Hydrologia ogólna, Wydawnictwo Geologiczne, 1977 r.)?

W **Podsumowaniu przeglądu literatury** (str. 38) poprawnie powinno być: „*Analiza cyklu życia materiałów uwzględniająca etapy takie, jak wydobywanie, transport, przetwarzanie surowców, użytkowanie i konserwacja wyrobu a także eliminacja lub recykling, jest kluczowym działaniem w ocenie materiałów pod kątem ich zastosowania w warunkach zrównoważonego rozwoju*”.

3. Cel, zakres pracy oraz hipotezy

W tym rozdziale przedstawiono cel i zakres pracy oraz hipotezę główną i dwie hipotezy pomocnicze. Należy zwrócić uwagę że 2 hipoteza pomocnicza brzmi następująco:

„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”.

Hipoteza ta odnosi się do kruszyw antropogenicznych i naturalnych, co jest niespójne w kontekście tytułu pracy, obejmującym tylko kruszywa antropogeniczne.

4. Materiał i metodyka badań

W rozdziale wyszczególniono materiały wykorzystane do badań współczynnika filtracji, a mianowicie: kruszywa naturalne, tj. piasek I, piasek II i piasek III, kruszywa antropogeniczne, tj. żużel wielkopiecowy, żużel paleniskowy, kruszywo betonowe I i kruszywo betonowe II. W części rozdziału dotyczącej badań materiałowych przedstawiono właściwości chemiczne i właściwości fizyczne żużla wielkopiecowego i paleniskowego, a następnie właściwości chemiczne i właściwości fizyczne kruszyw betonowych (destruktów betonowych). W części rozdziału dotyczącej metodyki badań omówiono metodykę przygotowania materiału do badań i wykonania badań współczynnika filtracji. Następnie została opisana metodyka predykcji z wykorzystaniem uczenia maszynowego, a w tym: wybór algorytmów i wprowadzenie do ich zastosowania, regresja liniowa, sztuczne sieci neuronowe, algorytm k-NN, drzewa decyzyjne, algorytmy bootstrapowe oraz adaptive boosting. Ta część rozdziału została zakończona opisem hiperparametrów – metody strojenia parametrów algorytmów.

W omawianym rozdziale zostały przedstawione materiały antropogeniczne oraz podano właściwości tych materiałów. W związku z tym tytuł tego rozdziału powinien być, np.: *Właściwości materiałów użytych do badań oraz metodyka analiz.*

Ponieważ przedmiotem badań były także kruszywa naturalne (piasek I, piasek II i piasek III), to w tym rozdziale powinny być także podane właściwości tych kruszyw, które zostały przytoczone w podrozdziale 5.2.1.

W pracy przeprowadzono badania właściwości chemicznych żużla wielkopieczowego (wyniki podane na rys. 9 i w tabeli 2), żużla paleniskowego (wyniki podane na rys. 14 i w tabeli 4) oraz kruszyw betonowych (wyniki podane na rys. 19 i w tabeli 6). Jaki był cel tych badań i czy wyniki tych badań były wykorzystane w dalszych analizach związanych z predykcją współczynnika filtracji?

5. Omówienie i dyskusja wyników

Rozdział został podzielony na trzy części. W pierwszej części omówiono predykcje współczynnika filtracji kruszyw naturalnych, a w drugiej części predykcja współczynnika filtracji kruszyw antropogenicznych. Trzecia część zawiera dyskusję i interpretację wyników.

W pracy przedstawiono niektóre wyniki badań dotyczących właściwości kruszyw naturalnych i kruszyw antropogenicznych. W rozdziale 4 podano właściwości chemiczne i właściwości fizyczne żużla wielkopieczowego i paleniskowego, a następnie właściwości chemiczne i właściwości fizyczne kruszyw betonowych. W rozdziale 5 pokazano krzywe uziarnienia piasków I, II i III (rys. 35). Natomiast nie przedstawiono innych właściwości kruszyw naturalnych takich, jak: gęstość objętościowa, gęstość właściwa, porowatość, wskaźnik porowatości, średnice zastępcze, wskaźnik jednorodności, wskaźnik krzywizny uziarnienia. Dane te, podobnie jak w przypadku kruszyw antropogenicznych, powinny być uwzględniane w analizie wyników badań.

W podrozdziale 4.2.1. podano, że wykonano szereg serii badań współczynnika filtracji próbek kruszyw naturalnych i antropogenicznych stosując różne gradienty hydrauliczne i przy różnej energii zagęszczenia. Wyniki poszczególnych badań powinny być przedstawione w pracy. Zgodnie z zasadami prac naukowych szczegółowe wyniki badań muszą być dostępne dla innych badaczy w celu weryfikacji danej pracy i umożliwienia innych analiz w celu rozwoju badań naukowych. W pracy nie przedstawiono tych wyników. Co prawda w tabeli 10 podano limity zastosowanych do modelowania parametrów kruszyw naturalnych, a w tabeli 19 limity zastosowanych do modelowania parametrów kruszyw antropogenicznych, ale z obu tabel można wnioskować tylko o granicznych wartościach właściwości zbadanych materiałów (minimalnych i maksymalnych), a nie o poszczególnych wynikach badań. W przypadku dużej liczby wyników badań mogą być one zarchiwizowane w danej jednostce naukowej i udostępniane na wniosek zainteresowanych podmiotów lub osób w celu weryfikacji

przeprowadzonych analiz lub w celu innych analiz służących rozwojowi badań naukowych. Brak tych szczegółowych danych w pracy wymaga wyjaśnienia.

W podrozdziałach 5.1.1 i 5.2.1 opisano proces gromadzenia danych dotyczących zbadanych kruszyw naturalnych i antropogenicznych. Czy proces czyszczenia danych miał istotny wpływ na wyniki przeprowadzonych analiz predykcji współczynnika filtracji? Z przeprowadzonych analiz wynikało, że w przypadku algorytmu *AdaBoost* uzyskano wysokie wartości dopasowania współczynnika filtracji obu rodzajów kruszyw. Jak można to wyjaśnić?

6. Wnioski

We wniosku 4 (str. 212) stwierdzono, że *„Zastosowanie parametrów charakteryzujących uziarnienie i stosunki objętościowe gruntów - gęstość objętościowa szkieletu gruntowego, wskaźnik porowatości i stopień zagęszczenia umożliwia, prognozowanie wartości współczynnika filtracji zarówno dla kruszyw antropogenicznych i gruntów naturalnych”*. Należy zwrócić uwagę, że badane kruszywa miały gęstość właściwą powyżej 2 g/cm³. Niektóre materiały antropogeniczne mogą mieć mniejszą gęstość właściwą. Ponieważ gęstość objętościowa jest powiązana z gęstością właściwą, powstaje pytanie: czy można ten wniosek uogólnić na inne materiały antropogeniczne o małej gęstości właściwej i objętościowej?

We wniosku 10 (str. 214) podano, że *„Istnieje możliwość dalszego rozwinięcia analizy poprzez uwzględnienie dodatkowych czynników, takich jak skład chemiczny materiałów czy warunki środowiskowe”*. W jakim stopniu skład chemiczny może wpływać na wartość współczynnika filtracji kruszyw naturalnych i antropogenicznych?

We wniosku 11 (str. 214) podano, że *„Wyniki przeprowadzonych badań są oparte na dostępnych danych oraz zebranych metodach i algorytmach uczenia maszynowego.”* Jak wspomniałem w p.3 recenzji (str. 6) należy podać w pracy gdzie są dostępne wyniki przeprowadzonych badań.

Rozdziały 7-10

W rozdziałach 7-10 przedstawiono słownik pojęć, wybrane biblioteki języków programowania zastosowane w pracy (język programowania *R* i język programowania *Python*), spis 294 pozycji literatury, spis rysunków oraz spis tabel.

4. Ocena pracy

Zgodnie z ustawą z dnia 20 lipca 2018 roku - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2018 r. poz. 1668 ze zm.) opinia dotycząca danej rozprawy doktorskiej powinna zawierać następujące elementy:

- 1) ocenę wraz z uzasadnieniem, czy rozprawa doktorska prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną osoby ubiegającej się o nadanie stopnia doktora w określonej dyscyplinie albo dyscyplinach;
- 2) ocenę wraz z uzasadnieniem, czy rozprawa doktorska wykazuje umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej lub artystycznej przez osobę ubiegającą się o nadanie stopnia doktora;
- 3) ocenę wraz z uzasadnieniem, czy rozprawa doktorska stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, oryginalne rozwiązanie w zakresie zastosowania wyników własnych badań naukowych w sferze gospodarczej lub społecznej albo oryginalne dokonanie artystyczne.

Ocena, czy rozprawa doktorska prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną Doktorantki

Pozytywnie oceniam teoretyczną wiedzę Doktorantki przedstawioną w recenzowanej rozprawie doktorskiej. Doktorantka wykazała się wiedzą w zakresie geotechniki, a w szczególności znajomością właściwości chemicznych i fizycznych gruntów i kruszyw, a w tym metod określania i obliczania współczynnika filtracji tych materiałów. Z rozprawy doktorskiej wynika także, że Doktorantka ma znaczącą wiedzę teoretyczną obejmującą metody analizowania i predykcji z wykorzystaniem algorytmów uczenia maszynowego oraz metody analiz statystycznych.

Ocena, czy rozprawa doktorska wykazuje umiejętność Doktorantki do samodzielnego prowadzenia pracy naukowej

Tak, rozprawa doktorska wykazała, że Doktorantka ma umiejętności do samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Po przeprowadzeniu przeglądu literatury Doktorantka postawiła hipotezę główną i dwie hipotezy pomocnicze. W celu sprawdzenia tych hipotez opracowała program badań i przeprowadziła badania laboratoryjne kruszyw naturalnych i antropogenicznych. Następnie przeanalizowała uzyskane wyniki z wykorzystaniem algorytmów uczenia maszynowego oraz metody analiz statystycznych i udowodniła hipotezę główną i hipotezy pomocnicze.

Ocena, czy rozprawa doktorska stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego

Tak, rozprawa doktorska stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego. Oryginalność polega na opracowaniu metody predykcji współczynnika filtracji kruszyw naturalnych i antropogenicznych przy zastosowaniu algorytmów uczenia maszynowego, wyznaczenia konkretnego algorytmu uczenia maszynowego najdokładniej dopasowanego do wartości obserwowanych przy zastosowaniu parametrów charakteryzujących uziarnienie, gęstość

objętościową, wskaźnik porowatości i stopień zagęszczenia kruszyw naturalnych oraz antropogenicznych. Opracowana metoda dokładniej prognozuje wartości współczynnika filtracji kruszyw naturalnych i antropogenicznych niż dotychczas stosowane metody empiryczne.

5. Wniosek

Opiniowaną rozprawę doktorską oceniam pozytywnie, mimo moich uwag, które częściowo mają charakter dyskusyjny.

Podsumowując stwierdzam, że opiniowana praca doktorska mgr inż. Justyny Dziecioł pt. *„Analiza możliwości wykorzystania algorytmów uczenia maszynowego w predykcji współczynnika filtracji dla wybranych kruszyw pochodzenia antropogenicznego”*, której promotorem jest dr hab. inż. Wojciech Sas, prof. SGGW z Centrum Wodnego SGGW, a promotorem pomocniczym dr inż. Andrzej Głuchowski z Centrum Wodnego SGGW, spełnia wymogi stawiane pracom doktorskim, które podane są w ustawie z dnia 20 lipca 2018 roku - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2018 r. poz. 1668 ze zm.).

Rozprawa prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną Doktorantki oraz Jej umiejętność do samodzielnego prowadzenia pracy naukowej, a także stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego.

Wnoszę o dopuszczenie mgr inż. Justyny Dziecioł do dalszych etapów postępowania w sprawie nadania stopnia doktora.



