

RECENZJA

ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

mgr inż. Magdaleny Moskal

„Wpływ czynników geotechniczno-konstrukcyjnych
na stateczność wybranych osuwisk na terenie fliszu karpackiego”

dr hab. inż. Lucyna Florkowska prof. IMG PAN

Kraków, sierpień 2023

D Z I E K A N A T	
Wydziału Inżynierii Lądowej	
Wpłynęło dnia	7.08.2023
L. dz.	10.510.27.5.2018
podpis	

Charakterystyka rozprawy

Rozprawa doktorska mgr inż. Magdaleny Moskal pt. „Wpływ czynników geotechniczno-konstrukcyjnych na stateczność wybranych osuwisk na terenie fliszu karpackiego” przedstawia problematykę stateczności zboczy osuwiskowych, przeznaczonych pod lokalizację infrastruktury drogowej. Tematyka Dysertacji pozostaje zatem w dziedzinie nauk inżynieryjno – technicznych, w obrębie dyscypliny inżynieria lądowa, geodezja i transport.

Problemem naukowym, który podjęła Autorka jest określenie warunków geotechnicznych i konstrukcyjnych, które zapewnią stateczność budowli drogi wraz z jej otoczeniem na obszarze osuwiska. Rozwiązanie zagadnienia uzyskane zostało na drodze modelowania matematycznego z wykorzystaniem metod i narzędzi obliczeniowych MES (Metody Elementów Skończonych) i ANN (sztucznych sieci neuronowych). Do opracowania metodyki wykorzystane zostały informacje badawcze opracowane w postaci bazy danych na podstawie dokumentacji i wyników badań zrealizowanych dla projektowanego przebiegu drogi ekspresowej S19 na obszarze województwa podkarpackiego.

Przedłożona Praca zawiera odpowiednią część teoretyczną, opis zrealizowanych przez Autorkę prac i badań, analizę wyników wybranych zadań oraz podsumowanie i wnioski, sformułowane na podstawie uzyskanych rezultatów.

Zawarta w Pracy **część teoretyczna** obejmuje omówienie: zagadnień osuwisk występujących w Polsce południowej, zagadnień badań podłoża i projektowania wykopów związanych z realizacją inwestycji drogowych oraz krótkie informacje o: podstawach obliczeń metodą elementów skończonych oraz przetwarzania informacji za pomocą sztucznych sieci neuronowych. W części obejmującej **przedstawienie zrealizowanych prac** znajdują się opisy: opracowania bazy danych, modelowania numerycznego MES oraz modelowania ANN. W części prezentującej **wyniki modelowania** zawarte zostały przykłady obliczeniowe oraz dyskusje rezultatów. Praca zakończona jest podsumowaniem i sporządzeniem wniosków.

Do zastanego stanu wiedzy na temat przygotowania i projektowania infrastruktury drogowej na obszarach objętych osuwiskami Autorka dodała wyniki własnych badań, które zastosowała do rozwiązania realnych problemów geotechnicznych. Zrealizowane prace badawcze objęły: opracowanie bazy danych, modelowanie i obliczenia numeryczne MES oraz modelowanie i obliczenia ANN.

Baza danych o obszarach osuwiskowych z projektowaną infrastrukturą drogową w polskich Karpatach opracowana została na podstawie 134 opracowań dokumentacyjnych (nie wskazano źródeł materiałów). Zawartość bazy stanowią dane charakteryzujące każde z osuwisk wraz z parametrami umożliwiającymi przeprowadzenie obliczeniowych analiz stateczności. Z tego zbioru 64 obszary poddane zostały dalszym badaniom. Z Rozprawy wynika, że dla każdego z wytypowanych osuwisk zbudowano kilka płaskich **modeli obliczeniowych**: Dla różnych przekrojów zbocza przeprowadzono analizy stateczności, metodą redukcji wytrzymałości na ścinanie, porównując uzyskane wartości współczynnika stateczności, obliczonego dla poziomu zwierciadła wód gruntowych wyznaczonego badaniami piezometrycznymi. Modele obliczeniowe **MES** oparto na założeniach **mechaniki ośrodków ciągłych**, przyjmując płaski stan odkształcenia z kinematycznymi warunkami brzegowymi. Obliczenia wykonane zostały przy użyciu programu MES Midas GTS NX, z wykorzystaniem dostępnych w jego

bibliotece modeli materiałowych Coulomba-Mohra, Hoeka-Browna oraz Hooke'a. W analizach stosowano wartości obliczeniowe parametrów mechanicznych i obciążeń, przyjmując współczynniki częściowe według kombinacji przygotowanych w bibliotece programu zgodnie z EC7¹. Wykonano kilka serii analiz, poddając najpierw rozważaniom stateczność zboczy w naturalnych warunkach geometrii i zawodnienia oraz w warunkach maksymalnego poziomu zwierciadła wód gruntowych a następnie symulowano realizację drogi poprowadzonej w wykopie z odpowiednimi warunkami obciążenia ruchem, wprowadzając różne warianty nachylenia skarp wykopu. W przypadkach braku stateczności, do modelu wprowadzane było dodatkowo zabezpieczenie konstrukcyjne zbocza w postaci gwoździ gruntowych, kotew gruntowych, pali fundamentowych lub ich kombinacji. W rezultacie dla każdego zadania wyznaczono wartości parametrów konstrukcyjnych, które zapewniały bezpieczeństwo budowli i podłoża. Ze zbioru możliwych rozwiązań wytypowane zostały następnie te, które spełniały warunki optymalizacji technologicznej w postaci minimum objętości urobionych mas ziemnych.

Dalszy etap przedstawionych badań stanowi rozwiązywanie zagadnienia z wykorzystaniem modelu matematycznego w postaci **sztucznej sieci neuronowej**. W tym celu jako narzędzie obliczeniowe zastosowany został program Matlab. Z treści Pracy wynika, że dla znalezienia optymalnego modelu zagadnienia tworzone były sieci jednokierunkowe oraz kaskadowe o różnej architekturze, z funkcjami aktywacji: liniową, sigmoidalną unipolarną oraz sigmoidalną bipolarną. Na podstawie analizy dwóch parametrów wydajności: wartości błędu średniokwadratowego MSE i współczynnika determinacji R^2 (z podziałem na dane ze zbiorów: uczącego, walidującego i testującego oraz sumarycznego - wszystkich próbek) wyłoniła została sieć najlepiej rozwiązująca postawione zadanie. W rezultacie powstała sztuczna sieć neuronowa, która dla założonych wejściowych parametrów geotechnicznych charakteryzujących osuwisko wyznacza poprawnie współczynnik bezpieczeństwa zbocza i parametry konstrukcyjne wykopu drogowego oraz współczynnik efektywności projektowej, który określa, czy analizowany teren osuwiskowy przeznaczony pod projektowaną infrastrukturę drogową wymaga zabezpieczenia konstrukcyjnego.

Syntetycznie można zatem stwierdzić, że wykorzystując dane z badań wykonanych dla wybranego zbioru polskich osuwisk karpackich oraz wiedzę teoretyczną i narzędzia obliczeniowe Autorka dokonała analiz stateczności dla wykopów drogowych na odcinkach przebiegających przez osuwiska. W rezultacie uzyskała zbiór rozwiązań w postaci optymalnych parametrów konstrukcyjnych zapewniających stateczność drogi wraz z wykopem. Uogólniając wyniki przeprowadzonych badań Autorka sformułowała metodykę rozwiązywania problemu stateczności drogi posadowionej w wykopie skarpy osuwiskowej.

Ocena ogólnej wiedzy zaprezentowanej w rozprawie w dyscyplinie *inżynieria lądowa, geodezja i transport*

Tematyka przedstawionej rozprawy doktorskiej zawiera się w dyscyplinie *inżynieria lądowa, geodezja i transport*. Poddane rozważaniom zagadnienie stateczności infrastruktury drogowej, prowadzonej przez obszary osuwisk, wymaga zaangażowania szerokiej wiedzy z zakresu geologii i geotechniki,

¹ Eurokod 7 (EC 7, EN 1997): *Projektowanie geotechniczne*

mechaniki ciała stałego, w szczególności ośrodków skalnych i gruntowych, projektowania i realizacji dróg a także matematycznego modelowania i technik obliczeniowych.

Zaprezentowana w Pracy wiedza teoretyczna w najszerszym zakresie obejmuje tematykę zagrożeń osuwiskowych w Polsce południowej (której poświęcono rozdział drugi) oraz tematykę badań podłoża, projektowania wykopów drogowych i wytycznych oceny stateczności skarp nasypów i wykopów drogowych (które stanowią treść rozdziału trzeciego). W zakresie wiedzy na temat osuwisk w polskich Karpatach Autorka w sposób właściwy przedstawiła funkcjonujące w literaturze klasyfikacje ruchów osuwiskowych. Charakterystyka osuwisk we fliszu karpackim zaprezentowana została w sposób skonsolidowany, ograniczający się do najbardziej podstawowych informacji, chociaż wywołany w rozdziale 2.2 temat jest bardzo rozległy i stanowi treść wielu obszernych opracowań. Trudnym zadaniem jest jednak przedstawienie jednej charakterystyki „osuwisk we fliszu karpackim”, ponieważ wielość i różnorodność tych form i procesów jest bardzo duża, a każde z nich posiada unikalną charakterystykę. Zrozumiałą jest tu próba podania skróconego/uproszczonego ujęcia zagadnienia, zmierzającego ku opracowaniu jednolitego modelu, jednak właśnie w kontekście dalszych badań modelowych, istotnym jest poddanie analizie rzeczywistych procesów, które mają zostać odwzorowane. Dlatego odczuwalny jest w treści Pracy brak głębszego przybliżenia mechanizmów kierujących uaktywnianiem się i rozwojem osuwisk, z wyprowadzeniem analogii fizycznych i matematycznych. Nieco więcej uwagi poświęcone zostało wpływowi zawodnienia gruntu na proces osuwiskowy, lecz w kontekście modelowania uwzględnienie obecności wody w ośrodku gruntowym ograniczono do zastosowania parametrów efektywnych w modelu Coulomba-Mohra.

Wiedza o wpływie czynników geotechnicznych i konstrukcyjnych na stateczność infrastruktury drogowej posadowionej na osuwisku przedstawiona została syntetycznie. W sposób optymalny zaprezentowane zostały przykłady infrastruktury drogowej przebiegającej przez uaktywnione osuwiska. Bardzo skrótowo przedstawiono wiedzę na temat metod konstrukcyjnego zabezpieczania osuwisk drogowych.

Wiedza na temat projektowania dróg na terenach osuwiskowych przedstawiona została głównie w zakresie badań podłoża gruntowego w ujęciu norm/eurokodów oraz w zakresie wytycznych projektowania wykopów drogowych i oceny stateczności skarp. Również w tym przypadku Autorka przedstawiła zagadnienie w ujęciu normatywnym, projektowym wykazując się znajomością stosownych opracowań a także praktycznego podejścia projektowego.

Mgr inż. M. Moskał zaprezentowała także w Pracy aktualną wiedzę w zakresie bieżących zagadnień planowania i realizacji rozwoju polskiej infrastruktury drogowej. Naświetliła istotne problemy związane z prowadzeniem dróg przez obszary występowania fliszu karpackiego.

Ponieważ w zakresie merytorycznym sedno Pracy stanowiły analizy obliczeniowe zagadnień stateczności, do ich prawidłowego przeprowadzenia konieczne było dysponowanie wiedzą teoretyczną w zakresie mechaniki ciała stałego, zwłaszcza mechaniki górotworu oraz mechaniki skał/gruntów. Wiedza teoretyczna zaprezentowana w Rozprawie skupiona jest w tym zakresie na modelach materiałowych Coulomba -Mohra i Hoeka-Browna, których zastosowanie wyniknęło z użycia narzędzia obliczeniowego w postaci programu Midas GTS NX, dedykowanego do analiz geotechnicznych. Rzeczywiście, modele te, zwłaszcza w postaciach rozszerzonych, uznaje się

za dobrze przybliżające zachowania ośrodka gruntowego/skalnego. Odczuwalny jest natomiast w zakresie teoretycznym brak opisu matematycznego sposobu uwzględnienia obecności wody w ośrodku gruntowym, mimo, że, jak wynika z treści Pracy, w analizach uwzględniano poziom zwierciadła wód gruntowych. Zważywszy, że obecność wody w gruncie związana jest z występowaniem wielu różnorodnych zjawisk i procesów, woda istotnie wpływa na stan naprężenia i deformacji przypowierzchniowych warstw górotworu w przestrzeni i w czasie. Zatem analiza wpływu wody może obejmować zjawiska i procesy takie jak zmiany naprężeń spowodowane przez ciśnienie, zmniejszenie tarcia wewnętrznego, zmiana ciężaru właściwego, skurcz i pęcznienie gruntu etc. Czynniki związane z występowaniem wody w gruncie mogą zostać uwzględnione w modelu matematycznym w postaci warunków początkowo-brzegowych, równań konstytutywnych, równań przepływu etc. Niestety nie zostało w Pracy sprecyzowane, jaki model przyjęto w analizach.

W zakresie mechaniki teoretycznej poczynione zostały założenia upraszczające zadania obliczeniowe do zagadnienia płaskiego stanu odkształcenia. O ile uproszczenie tego rodzaju jest uzasadnione w ogólności dla zadania z przekrojem poprzecznym drogi, to w kontekście występowania w podłożu formy osuwiskowej o przestrzennej geometrii oraz nieoczywistym stanie naprężenia i deformacji, przyjęcie założenia płaskiego stanu odkształcenia wymagałoby zamieszczenia w treści Dysertacji szerszej dyskusji, która musiała towarzyszyć budowie modeli. Co istotne, zapis tensora odkształcenia (4.8) nie odpowiada założeniu PSO (płaskiego stanu odkształcenia).

Od strony teoretycznej zauważalny jest również brak opisu modelu elementów konstrukcyjnych wzmacniających / zabezpieczających osuwisko. Zrozumiałym jest, że w wykonanych obliczeniach wykorzystano przygotowane modele z biblioteki programu Midas, jednak w zakresie przedstawionych podstaw teoretycznych należałoby zawrzeć również opis matematyczny tych składowych modelowanego zagadnienia.

Zaprezentowana w Pracy wiedza ogólna na temat sztucznych sieci neuronowych, wykorzystanych również do modelowania przedmiotowego zagadnienia, obejmuje podstawy biologiczne i model sztucznego neuronu z wyszczególnieniem stosowanych funkcji aktywacji, opis budowy sztucznych sieci neuronowych oraz syntetyczne przedstawienie procesów uczenia, testowania i weryfikacji sieci neuronowych.

Podsumowując: podjęte w Pracy zagadnienie wymaga dysponowania szeroką wiedzą, obejmującą wiele zagadnień naukowych oraz inżynierskich. Ze względu na przyjętą metodykę oraz podejście do sformułowania i rozwiązania zagadnienia, szczególne znaczenie ma wiedza w zakresie modelowania matematycznego w ujęciu mechaniki ośrodków ciągłych oraz sztucznych sieci neuronowych. Zawarta w pracy wiedza ogólna, poza kilkoma, wskazanymi wyżej zastrzeżeniami, przedstawia właściwy poziom. Stwierdzić należy, że **przedmiotowa rozprawa doktorska prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną Autorki w dyscyplinie inżynieria lądowa, geodezja i transport na poziomie adekwatnym dla uzyskania stopnia doktora nauk technicznych w tej dyscyplinie.**

Ocena umiejętności samodzielnego prowadzenia pracy naukowej

W przedstawionej Pracy podjęte zostało trudne i złożone zagadnienie analizy stateczności infrastruktury drogowej na obszarach osuwiskowych. Autorka opisała w Dysertacji przeprowadzony przez siebie proces, który objął: precyzyjne sformułowanie pytań badawczych, realizację eksperymentów i analiz danych oraz wyciąganie wniosków na podstawie zebranych dowodów. Proces ten jest tożsamy z prowadzeniem pracy naukowej.

Z Dysertacji wynika, że Autorka zgromadziła obszerny materiał badawczy w postaci zbioru opracowań geologicznych, geotechnicznych i projektowych, dotyczących lokalizowania dróg na obszarach osuwisk w Polsce południowej. W wyniku kwerendy i systematyzacji istniejących materiałów źródłowych powstała baza danych o drogach zlokalizowanych na osuwiskach polskiego fliszu karpackiego. Angażując wiedzę teoretyczną na temat procesów osuwiskowych, projektowania i realizacji obiektów drogowych, badań podłoża, oraz modelowania matematycznego zagadnień geotechnicznych Autorka sformułowała problem badawczy w dwóch postaciach: jako płaskie zadanie teorii sprężysto-plastyczności oraz jako sztuczną sieć neuronową. Posiłkując się narzędziami obliczeniowymi w postaci programów Midas GTS NX i Matlab wykonała następnie szereg eksperymentów numerycznych i analiz danych uzyskując zbiory rozwiązań. W Pracy wykazano, że Autorka biegle posługuje się zaawansowanymi narzędziami obliczeniowymi, potrafi prawidłowo modelować złożone zagadnienia geotechniczne i dobierać optymalne rozwiązania konstrukcyjne dla zagrożonych w zakresie stateczności zboczy skarp wykopów drogowych. Autorka wypracowała własną metodykę badawczą rozwiązywania zagadnień stateczności związanych z prowadzeniem dróg kołowych przez obszary objęte zagrożeniami osuwiskowymi. W prawidłowy sposób prowadzi analizy danych i rezultatów oraz przeprowadza wnioskowania i dyskusje wyników.

W przedstawionej dysertacji wykazano, że Autorka samodzielnie posługuje się metodami prowadzenia badań naukowych; potrafi:

- prowadzić badania krytyczne wyników uzyskiwanych przez innych badaczy, publikowanych w pracach naukowych, o czym świadczą liczne odniesienia, powołania, przypisy;
- analizować dokumentację badań i dokumentację techniczną, literaturę przedmiotu oraz bazy danych w celu zbierania informacji i oceny istniejącej wiedzy na dany temat, co potwierdza przytaczana w Pracy kwerenda dokumentacji projektowej, badawczej, literatury, bazy SOPO;
- czytać i interpretować wyniki obserwacji i badań terenowych oraz laboratoryjnych, z których czerpane były dane do modelowania,
- prowadzić eksperymenty obliczeniowe i symulacje, co wykazała przedstawiając ogólny przebieg oraz wyniki wybranych eksperymentów numerycznych,
- uogólniać otrzymywane rezultaty i syntetyzować wnioski, dzięki czemu opracowała oryginalną metodykę rozwiązywania złożonego zagadnienia geotechnicznego.

Podsumowując powyższe uzasadnienie, **przedstawiona rozprawa doktorska wykazuje, że Autorka posiada umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej.**

Ocena oryginalności rozwiązania problemu naukowego

Sformułowany w Pracy problem naukowy obejmuje zagadnienie stateczności drogi poprowadzonej w wykopie skarpy osuwiska. Autorka wybrała metodę poszukiwania rozwiązania tego problemu za pomocą modelowania matematycznego. W tym celu zastosowała dwa różne podejścia: Po pierwsze sformułowała problem, jako płaskie zagadnienie teorii izotropowej sprężysto-plastyczności, które analizowała następnie metodą redukcji wytrzymałości naścinanie, stosując MES. W podejściu drugim poszukiwała sztucznej sieci neuronowej, która dla zadanych parametrów geotechnicznych poda wartości parametrów konstrukcyjnych zapewniających stateczność drogi w wykopie skarpy osuwiska. W obu podejściach przewidziano konieczność wprowadzenia konstrukcyjnego zabezpieczenia podłoża. Do budowy modeli i realizacji obliczeń Autorka wykorzystwała istniejące oprogramowanie/narzędzia symulacji obliczeniowych. Konstrukcja modeli oparta została na parametrach rzeczywistych, wyznaczonych dla odcinków projektowanej drogi S-19 na obszarze województwa podkarpackiego.

Jak wiadomo, modelowanie numeryczne, czy to MES, MRS², czy MEO/DEM³, jest powszechnie wykorzystywane do rozwiązywania zagadnień geotechnicznych, w tym również do symulacji procesów osuwiskowych. Również ANN stosowane są do modelowania zagadnień stateczności osuwisk. Publikowane w tym zakresie rezultaty przytoczone zostały w Dysertacji. Oryginalność Pracy polega natomiast przede wszystkim na synergicznym podejściu do postawionego problemu. Dzięki takiemu podejściu Autorka uzyskała wzrost efektywności metodyki, stworzenie określonej wartości dodanej oraz zwiększenie skuteczności. Wartość dodaną tworzy tu zbiór wyjściowy parametrów, zoptymalizowanych w zakresie stateczności zbocza wykopu, oraz istotnych warunków realizacji budowli (uwzględnionych m.in. poprzez ujęcie w analizie objętości mas ziemnych wykopu).

W aktualnej literaturze przedmiotu nie opublikowano podobnego rozwiązania problemu. Przedstawione przez Autorkę rozwiązanie wnosi zatem do istniejącego stanu wiedzy nową metodykę, opartą na znanych i sprawdzonych metodach obliczeniowych. Przedstawione w Dysertacji podejście do zagadnienia posiada solidne podstawy teoretyczne, Autorka zastosowała również właściwe metody naukowe. Zawarte w Pracy wyniki są nowe i stanowią rezultat samodzielnych badań. Zrealizowane eksperymenty numeryczne zostały właściwie zaprojektowane a ich wyniki zaprezentowane zostały w sposób rzetelny. Prawidłowo przeprowadzono analizę wyników, interpretację i formułowanie wniosków. Niedoskonałością rozwiązania jest brak weryfikacji doświadczalnej wyniku, który jest jednakże zrozumiały, w kontekście rozmiaru niezbędnego w tym celu przedsięwzięcia. Przedstawione rozwiązanie cechuje się również replikowalnością, zatem możliwe jest jego powtórzenie w celu otrzymania podobnych wyników dla uzyskania weryfikacji.

Zauważyć należy dodatkowo, że metodyka opracowana przez Autorkę bazuje na łatwych do zdefiniowania i interpretacji wskaźnikach geotechnicznych i konstrukcyjnych, co czyni ją przystępną i możliwą do zastosowania w praktyce projektowej. Uzyskane wyniki badań mają potencjał do zastosowania w rozwiązywaniu zagadnień istotnych w sferze gospodarczej, w zakresie budownictwa komunikacyjnego. W świetle planowanego i realizowanego obecnie rozwoju krajowej infrastruktury

² Metoda Różnic Skończonych

³ Metoda Elementów Odrębnych, inaczej Metoda Elementów Dyskretnych (*Discrete* lub *Distinct Element Method*)

drogowej problem prowadzenia dróg przez obszary objęte ruchami masowymi jest aktualny i ważny. Prawidłowe rozwiązanie kwestii posadowienia obiektów drogowych na podłożu podlegającym procesom osuwiskowym bez wątpienia posiada wartość nie tylko naukową, ale także aplikacyjną.

Reasumując, w świetle powyższego wyводу stwierdzić należy, że przedłożona **praca stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego.**

Konkluzja

Ocena przedłożonej Dysertacji jest jednoznacznie pozytywna. Przedstawiona przez mgr inż. Magdalenę Moskal rozprawa doktorska jest pracą stanowiącą dowód cechowania się przez Autorkę wiedzą, sumiennością, starannością, pracowitością oraz umiejętnościami naukowymi.

Przytoczona powyżej ocena wykazała, że **przedłożona Dysertacja spełnia wymogi stawiane jej przez art. 13.1 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki, to znaczy:**

- **prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną Kandydatki w dyscyplinie inżynieria lądowa i transport,**
- **wykazuje umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej,**
- **jej przedmiotem jest oryginalne rozwiązanie problemu naukowego.**

W związku z powyższym wnoszę o dalsze procedowanie postępowania o nadanie mgr inż. Magdalenie Moskal stopnia doktora nauk technicznych w dyscyplinie *inżynieria lądowa, geodezja i transport.*



Podpisany elektronicznie przez
Lucyna Florkowska
07.08.2023
13:39:09 +02'00'