

dr hab. inż. Paweł Popielski, prof. PW  
Politechnika Warszawska  
Wydział Instalacji Budowlanych,  
Hydrotechniki i Inżynierii Środowiska  
Zakład Budownictwa Wodnego i Hydrauliki

## **Recenzja**

**rozprawy doktorskiej mgr inż. Marcina Krasieńskiego**

**pt.: „Kalibracja modelu numerycznego wspomagającego projektowanie geotechniczne.”**

### **1 Podstawy formalne**

#### **1.1 Uchwała Rady Wydziału**

Rada Wydziału Budownictwa, Architektury i Inżynierii Środowiska Politechniki Łódzkiej w Łodzi w dniu 26.09.2019 r. podjęła uchwałę nr 3.2/761/2019 powołującą mnie na recenzenta podanej w tytule rozprawy doktorskiej. Promotorem przedstawionej mi do recenzji pracy doktorskiej jest: prof. dr hab. inż. Marek Lefik.

#### **1.2 Tryb postępowania**

W piśmie z dnia 03.04.2024 r z Wydziału Budownictwa, Architektury i Inżynierii Środowiska Politechniki Łódzkiej w Łodzi otrzymałem informację, że postępowanie o nadanie stopnia doktora Kandydatowi Panu mgr inż. Marcinowi Krasieńskiemu toczy się na podstawie przepisów Ustawy z dnia 14 marca 2003 r. *o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki*, (Dz. U. Nr 65, poz. 595 z późn. zm.) zwane dalej Ustawą oraz *Rozporządzeniem Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 19 stycznia 2018 r. w sprawie szczegółowego trybu i warunków przeprowadzania czynności w przewodzie doktorskim, w postępowaniu habilitacyjnym oraz w postępowaniu o nadanie tytułu profesora* (Dz. U. z 19 stycznia 2018, poz.261) zwanym dalej Rozporządzeniem.

#### **1.3 Wymogi formalne**

Zgodnie z art. 13 Ustawy rozprawa doktorska powinna stanowić oryginalne rozwiązanie problemu naukowego oraz wykazywać ogólną wiedzę teoretyczną kandydata w danej dyscyplinie naukowej, a także umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej.

Zgodnie z § 4 ust 1 Rozporządzenia recenzja rozprawy doktorskiej zawiera szczegółowo uzasadnioną ocenę, czy rozprawa ta spełnia warunki określone w art. 13 Ustawy.

## **2 Treść recenzji**

### **2.1 Ogólny opis rozprawy**

Rozprawa obejmuje 182 strony (które również obejmują bibliografię i załączniki), składa się z trzech części podzielonych na rozdziały. Praca wraz z załącznikami zawiera 106 rysunków oraz 22 tabele.

Główne części pracy są to:

Część I. Wstęp, ze sformułowaniem tezy, zakresu pracy oraz weryfikacją aktualności tematyki pracy na podstawie przeglądu literatury.

Część II zatytułowana „Kalibracja parametrów geotechnicznych na podstawie obserwacji zachowania konstrukcji - wspomaganie komputerowe projektowania Metodą Obserwacyjną” podzielonej na 9 Rozdziałów, będących treścią zasadniczą pracy, w której podjęto próbę udowodnienia postawionej Tezy i zrealizowania celów zdefiniowanych w pracy.

Część III. Podsumowania.

W części II pracy w rozdziale 2. przytoczono zapisy Eurokod 7 w odniesieniu do geotechnicznych zagadnień projektowych. Opisano kategorie geotechniczne, stany graniczne nośności oraz użyteczności jako wyjściowa podbudowa formalna do przedstawianej w dalszej części pracy metodologii. W rozdziale 3, scharakteryzowano zagadnienie projektowania ścian oporowych. Wyszczególniono i opisano typowe metody obliczeniowe (Metody klasyczne, Metody uwzględniające interakcję grunt-konstrukcja) oraz sposoby określania wartości parć gruntu i dokonano ich porównania. Opisano aspekty podparcia i kolejności wykonywania konstrukcji, sztywności ściany, podpór. Przedstawiono aspekt projektowania w ujęciu Eurokod w odniesieniu do ścian oporowych, w tym częściowe współczynniki bezpieczeństwa i kombinacje obciążeń.

W rozdziale 4 omówiono narzędzie numeryczne – w postaci programu komputerowego autora o nazwie SheePile. Opisano algorytm bazujący na Metodzie Różnic Skończonych (MRS), przytoczono odpowiednie wzory oraz zamieszczono opis algorytmu obliczeń. Opisano weryfikację modelu obliczeniowego która odbyła się na podstawie porównania wyników obliczeń (przemieszczeń ścianki, sił tnących i momentów) za pomocą zastosowanego przez Autora programu z wynikami obliczeń za pomocą dwóch programów komercyjnych (GeoStudio 2012 i Plaxis 2D). Obliczenia wykonano dla ścianki pograżonej w gruncie niespoistym i spoistym. W dalszej części opisano rozszerzenie autorskiego programu o nakładkę SheetPile OM jako bazowego narzędzia, umożliwiające realizację postawionych celów badawczych oraz udowodnienia postawionej tezy pracy.

Zaimplementowany w programie model gruntu w postaci związku konstytutywnego odwzorowującego zachowanie sprężysto-plastyczne oraz algorytm obliczeniowy oparty na metodzie metody parć zależnych i metodzie różnic skończonych. Przyjęty jako bazowy program SheePile umożliwił implementację rozbudowy o moduły związane z oceną jakości wyników analizy, względem pomiarów

przemieszczeń realizowanej konstrukcji, na poszczególnych etapach. Skutecznie wprowadzono mechanizm analizy wstecznej, opartej na metodzie symulacji Monte-Carlo, identyfikujący zestaw geotechnicznych parametrów wejściowych gruntu, który odpowiada pomiarom przemieszczeń ściany oporowej.

W rozdziale 5 przytoczono opis monitoringu konstrukcji, jego celów, składowych, sposobów ciągłych pomiarów przemieszczeń i obrotów konstrukcji, wychylenia budynków, osiadania gruntów i budynków, poziomów wody gruntowej.

Następnie w rozdziale 6 przybliżono Metodę Obserwacyjną (OM ang. Observational Method), jej zastosowanie jako procedury projektowania oraz porównanie procedur projektowania klasycznego i przy użyciu OM.

W rozdziale 7 przedstawiono implementacje Metody Symulacji Monte-Carlo (MC) w zastosowaniu do zagadnienia ściany oporowej, gdzie symulowano dane wejściowe w postaci zestawów podstawowych parametrów geotechnicznych podłoża (ciężar, kąt tarcia wewnętrznego, spójność), a następnie dokonywano seryjnych obliczeń (wprost) i badano wpływ istotności zmienności tych parametrów na zachowanie się ścianki. Zakres przemieszczeń dopuszczalnych ściany oscylował w granicach 15-30mm. Zauważono, iż dla ściany pracującej w schemacie wspornikowym wpływ warstw głównie obciążających ścianę tj. leżących do poziomu wykopu jest dominujący, co pozwala na przeprowadzenie kalibracji ich parametrów geotechnicznych, przy użyciu pomiarów inklinometrycznych czy geodezyjnych. W przypadku ściany kotwionej u góry, z przeprowadzonej analizy wynika, że wpływ warstw na samej górze oraz warstw, gdzie pograżony jest koniec ściany jest relatywnie niewielki, a największe znaczenie mają parametry warstw w poziomie dna wykopu.

W rozdziale 8 podjęto próbę identyfikacji parametrów geotechnicznych za pomocą Sztucznych Sieci Neuronowych (SSN). W rozdziale 9 przedstawiono praktyczny aspekt utworzonego i zaimplementowanego algorytmu. Ilustracją jego działania są dwa przypadki projektu obudowy w układzie wspornikowym oraz kotwionym, gdzie potencjalnie istnieje możliwość wykorzystania zalet monitoringu do optymalizacji podczas wykonywania „pojedynczej” ściany. Trzecim przykładem jest weryfikacja potencjału metody dla rzeczywistego przypadku zaczerpniętego z prac (Mitew-Czajewska 2016; 2018). W podsumowaniu stwierdzono, że przeprowadzone analizy potwierdziły obserwacje z poprzednich rozdziałów związane z niejednoznacznością rozwiązań zagadnienia odwrotnego przy większej ilości zmiennych parametrów oraz sformułowano wniosek możliwości stosowania metody w ograniczonym zakresie oraz konieczności pojęcia dalszych badań, aby ten zakres poszerzyć.

## **2.2 Szczegółowe uzasadnienie spełnienia warunków 13 art. Ustawy**

### **2.2.1 Oryginalność rozwiązania problemu naukowego**

Kandydat w swojej dysertacji doktorskiej przeprowadził analizę podejścia projektowego określonego Metodą Obserwacyjną które należy do grupy metod tzw. projektowania aktywnego. Metoda polega m.in. na wstępnym przyjęciu do obliczeń warunków bardziej korzystnych, ustaleniu możliwego zachowania konstrukcji, jej monitoringu w trakcie realizacji i wykorzystaniu wyników obserwacji do ewentualnego wprowadzania zmian do projektu. Dopuszcza się także, wybór alternatywnych rozwiązań dostosowanych do obserwowanego zachowania konstrukcji. W pracy wykorzystano autorski program SheetPile oraz Metodę Symulacji Monte-Carlo do identyfikacji parametrów geotechnicznych z uwzględnieniem pomiarów inklinometrycznych i lub geodezyjnych w trakcie realizacji konstrukcji. Metody Symulacji Monte-Carlo (MC) wykorzystano między innymi w zastosowaniu do zagadnienia ściany oporowej, gdzie symulowano dane wejściowe w postaci zestawów podstawowych parametrów geotechnicznych podłoża (ciężar, kąt tarcia wewnętrznego, spójność), a następnie dokonywano seryjnych obliczeń (wprost) i badano wpływ istotności zmienności tych parametrów na zachowanie się ścianki. Przyjęte możliwe odchylenia za (Przewłocki 2006), dla poszczególnych podstawowych parametrów takich jak kąt tarcia (+- 22%), ciężar objętościowy (+-12%), spójność (+- 82%), w rozpatrywanych przykładach przełożyły się na relatywnie duży rozrzut wyników.

Podjęto również próbę zastosowania w tym zadaniu Sztucznych Sieci Neuronowych, od których oczekiwane było rozwiązywanie zagadnienia odwrotnego.

W pracy dokonano krytycznego przeglądu podstawowych założeń metody i założeń upraszczających. Praca zawiera oryginalne wyniki empirycznie, uzyskane w trakcie badań.

Stwierdzam, że omówione rozwiązanie jest oryginalne i spełnia wymogi badań naukowych przemysłowych zdefiniowanych w art. 2 pkt 3 lit. c *Ustawy z dnia 30 kwietnia 2010 o zasadach finansowania nauki* Dz. U. 2010.95.615 (z późniejszymi zmianami).

### **2.2.2 Wykazanie ogólnej wiedzy Kandydata**

W pracy w sposób kompleksowy przedstawiono zakres stosowania, projektowania oraz zastosowania Metody Obserwacyjnej która należy do grupy metod tzw. projektowania aktywnego. W pracy wykorzystano autorskie modyfikacje i algorytmy opracowane przez Kandydata. Dodatkowo wykorzystane zostały komercyjne pakiety obliczeniowe, którego obsługa przy przygotowaniu danych, jak i analizie wyników, wymaga specjalistycznej wiedzy i umiejętności.

Z przywołanych w spisie literatury 71 pozycji, 34 pochodzi z ostatnich dziesięciu lat, co świadczy, że Kandydat na bieżąco śledzi najnowsze osiągnięcia tej dziedziny. 7 pozycji literatury stanowią normy i wytyczne. Całość pracy jest bogato ilustrowana przykładami oraz rysunkami i tabelami.

Stwierdzam, że Kandydat wykazał się ogólną wiedzą z zakresu stosowania zakres stosowania, projektowania oraz zastosowania Metody Obserwacyjnej która stanowi ważny dział nauki w obszarze nauk technicznych.

### **2.2.3 Wykazanie umiejętności samodzielnego prowadzenia pracy naukowej przez**

#### **Kandydata**

Tematyka pracy koncentruje się na analizie i metodzie projektowania obudów głębokich wykopów. Zaproponowana w pracy procedura, odpowiadająca na postawioną tezę oraz jej implementacja uzasadniająca realizację postawionego celu, opiera się na rozwiązaniu zagadnienia odwrotnego. Przedstawiony algorytm wpisuje się we wskazany w Eurokodzie 7 sposób projektowania określony mianem Metody Obserwacyjnej. Skuteczne wdrożenie algorytmu obejmowało cztery elementy: a) model obliczeniowy, b) pomiary reakcji w terenie, c) metodologię interpretacji danych oraz d) technikę optymalizacji. Autor rozbudował metodykę oraz funkcjonalności swojego autorskiego programu do obliczeń inżynierskich obudowy głębokiego wykopu bazujący na sprężysto-plastycznym modelu gruntu. Program został uzupełniony o implementacje mechanizmów analizy wstecz, m.in. metodę Symulacji Monte Carlo oraz możliwość kalibracji wstępnie wprowadzonych parametrów geotechnicznych, na podstawie dodatkowych danych napływających w trakcie procesu budowlanego. Zastosowane zarówno metody klasyczne jak i autorsko zmodyfikowane, a także analizy z wykorzystaniem symulacji numerycznych oraz porównane wyników z rezultatami badań terenowych wskazują na ważną umiejętność: naukową dociekliwość i skrupulatność Kandydata.

Powołując się w rozprawie na 71 różnorodnych pozycji piśmiennictwa, Kandydat wykazał, że posiada umiejętność wyszukiwania właściwej literatury naukowej.

Klarowność i zwięzłość rozdziałów pracy świadczy, że Kandydat potrafi przekazać swoją wiedzę.

Uważam, że Kandydat swoją rozprawą dowiódł umiejętności samodzielnego prowadzenia pracy naukowej.

## 2.2.4 Pytania i uwagi krytyczne

Niezależnie od pozytywnie ocenionych przeze mnie wielu walorów merytorycznych rozprawy, Kandydat nie ustrzegł się różnego typu niedociągnięć. Mam do Doktoranta szereg pytań, na które oczekuję odpowiedzi podczas publicznej obrony niniejszej pracy.

W pracy znajduje się kilka drobnych błędów, niektóre są proste do poprawnej interpretacji i nie mają wpływu na możliwość analizy dysertacji, ale poszczególne wymagają wytłumaczenia i komentarza.

Jako brak formalny uważam sposób prezentacji i cytowania literatury np. dostępu do źródeł internetowych – w pracy nie podano czasu (daty) dostępu. Niektóre rysunki nie mają podanego źródła rys 12 oraz rys 27-30. W bibliografii brakuje cytowanych w pracy źródeł: Kraśnicki 2007, Wanik 2012, Chen and Chen 1995; Hertz, Krogh, and Palmer 2018. Brakuje również informacji w bibliografii o cytowanych pracy i wykorzystanych programach: GeoStudio, Plaxis.

Podstawowym pytaniem merytorycznym jest, dlaczego mimo stwierdzenia w wstępie i we wnioskach (rozdział 7.4) oraz podsumowaniu, że do badania wpływu istotności zmienności parametrów geotechnicznych na zachowanie się ścianki zostaną przyjęte możliwe odchylenia za (Przewłócki 2006) (kąta tarcia (+- 22%), ciężar objętościowy (+-12%), spójność (+- 82%) zmieniono bez komentarza zakres odchylenia dla ciężaru objętościowego na (+- 9%). Dla przyjętej zmienionej wartości przeprowadzono udokumentowane rysunkami i rozkładami analizy opisanie w rozdziałach 7.2 -7.3 i błędne (z wartością +- 12%) skomentowano we wnioskach – rozdział 7.4. Proszę o prezentację wyników przy deklarowanych w założeniach i podsumowaniu wartości odchyleń oraz różnic w stosunku do prezentowanych w pracy wyników.

Dlaczego w przykładzie 3 (rozdział 9.1.3) wykonano kalibrację parametrów gruntu wynikami pomiarów tylko przemieszczeń korony (oczepu) ściany. Wykonanie kalibracji dla tylko jednego punktu pomiarowego na koronie ściany i to dla ściany kilkakrotnie kotwionej jest niezrozumiałe i odbiega od prezentowanych w pracy analiz. W literaturze są dostępne publikacje, gdzie są prezentowane przemieszczenia na całej wysokości ściany np. Report CGG\_IR006\_2002, Institute for Soil Mechanics and Foundation Engineering, Graz University of Technology Austria, Marzec 2002, zawierający np. przykład kotwionej ściany w piasku berlińskim wykorzystany w porównawczych analizach numerycznych wielu zespołów geotechników w Europie.

Kolejną wątpliwością wymagającą wyjaśnienia jest testowanie poprawności działania autorskiego oprogramowania poprzez porównanie jego wyników **od średniego wyniku z dwóch komercyjnych programów MES**. Jeżeli profesjonalne programy prezentują dla prostego zadania różne wyniki należy zgodnie z podsumowaniem 4.4.3 poszukiwać przyczyn rozbieżności i poprawić obliczenia a nie liczyć średnią. Proszę o informacje czy analizowano to zadanie zgodnie z podsumowaniem 4.4.3. i jakie działania podjęto w celu uzyskania lepszej zgodności wyników

wykorzystanych programów MES.

W wnioskach (4.6) do rozdziału 4 napisano:

„Obliczenia porównawcze przedstawione w niniejszym rozdziale pokazały, że prezentowany program pozwala uzyskiwać rozwiązania, jakościowo i ilościowo zgodne z komercyjnymi programami MES na **wymaganym dla prototypu poziomie dokładności**. Jednocześnie można doszukiwać się przyczyn braku całkowitej zgodności m.in. **w jakościowych różnicach pomiędzy opisem konstytutywnym oddziaływania gruntu na ściankę**. Należy zauważyć, że w konstrukcji modelu, który jest przedmiotem rozważań, **nie były wymagane żadne warunki zgodności z innymi modelami**. Jak wiadomo, dla różnych modeli gruntu, nawet w tym samym programie obliczeniowym (na przykład Coulomb-Mohr i Hardening Soil w programie PLAXIS) uzyskuje się zwykle różniące się rozwiązania.”

Bardzo proszę o zdefiniowanie i wyjaśnienie pojęcia „dokładności wymaganej dla prototypu” oraz „jakościowych różnic pomiędzy opisem konstytutywnym oddziaływania gruntu na ściankę” w przykładzie wykorzystanym do porównania. Jeśli „od modelu nie były wymagane warunki zgodności z innymi modelami” to dlaczego wykonywano obliczenia porównawcze. Jeśli nie obliczenia porównawcze to w jaki sposób można stwierdzić poprawność obliczeń autorskiego oprogramowania?

Ostatnie zdanie z cytatu dotyczące modeli gruntu Coulomb-Mohr i Hardening Soil wskazuje na niezrozumienie lub brak wiedzy Kandydata w jakich przypadkach należy stosować poszczególne modele gruntu. Od kilkunastu lat wiadomo (np. od publikacji prof. A. Truty; 2008; Sztywność gruntów w zakresie małych odkształceń. Aspekty modelowania numerycznego), że w praktycznych zagadnieniach geotechniki w których interesuje nas stan graniczny użyteczności stosowanie uproszczonego M-C może prowadzić do zdecydowanie błędnych oszacowań. Proszę o podanie podstawowych różnic pomiędzy wymienionymi w pracy modelami gruntu Coulomb-Mohr i Hardening Soil.

Elementem wynikającym z przeprowadzonych w pracy doświadczeń jest niejednoznaczność wyników analizy odwrotnej tj. dla różnych zestawów parametrów wejściowych otrzymuje się te same rezultaty. Nie ma możliwości wykluczenia tej niejednoznaczności. Czy w takim przypadku możliwe i zalecane jest stosowanie uczenia maszynowego i sieci neuronowych? Jakie inne rozwiązania można zastosować?

### 2.2.5 Pozostałe uwagi

Uwagi niemające wpływu na końcową ocenę rozprawy doktorskiej zostaną Kandydatowi przekazane ustnie.

### 2.3 Wniosek

Stwierdzam, że rozprawa Pana mgr inż. Marcina Krasieńskiego pt.: „Kalibracja modelu numerycznego wspomagającego projektowanie geotechniczne.” spełnia wymogi art nr 13 Ustawy z dnia 14 marca 2003 r. *O stopniach naukowych i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki*, (Dz. U. Nr 65, poz. 595 z późn. zm.).

Praca doktorska Pana mgr inż. Marcina Krasieńskiego w spełnia warunki, jakie są stawiane osobom ubiegającym się o nadanie stopnia doktora nauk technicznych w dyscyplinie Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport i wnoszę o jej dopuszczenie do publicznej obrony.

