

dr hab. inż. Bartosz Miller
profesor uczelni
Politechnika Rzeszowska im. Ignacego Łukasiewicza
Wydział Budownictwa, Inżynierii Środowiska i Architektury
tel. 178651623
e-mail: bartosz.miller@prz.edu.pl

Rzeszów, 6 grudnia 2023 r.

Recenzja pracy doktorskiej mgr. inż. Artura Górala
DIRECT AND INVERSE ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS AS AUXILIARY
TOOLS IN NUMERICAL SOLUTIONS OF SELECTED PROBLEMS
OF SOIL-STRUCTURE INTERACTION IN GEOTECHNICAL ENGINEERING

1. Podstawa formalna i przedmiot recenzji

Podstawę formalną opracowania recenzji stanowi pismo prof. dr. hab. inż. Dariusza Gawina, Dziekana Wydziału Budownictwa, Architektury i Inżynierii Środowiska Politechniki Łódzkiej, z informacją o powołaniu mnie uchwałą Rady ds. Stopni Naukowych Politechniki Łódzkiej w dyscyplinie inżynieria lądowa, geodezja i transport na recenzenta pracy doktorskiej mgr. inż. Artura Górala, oraz towarzysząca pismu Dziekana umowa o dzieło.

Przedmiotem recenzji jest napisana w języku angielskim rozprawa doktorska mgr. inż. Artura Górala zatytułowana *Direct and Inverse Artificial Neural Networks as Auxiliary Tools in Numerical Solutions of Selected Problems of Soil-Structure Interaction in Geotechnical Engineering*. Promotorem pracy doktorskiej jest prof. dr hab. inż. Marek Lefik, promotorem pomocniczym jest dr inż. Marek Wojciechowski.

2. Ogólna charakterystyka rozprawy doktorskiej

2.1. Ocena doboru tematu

Tematem pracy jest zastosowanie sztucznych sieci neuronowych (ang. Artificial Neural Networks, ANN) w zagadnieniach wprost oraz zagadnieniach odwrotnych w trzech wybranych problemach geotechniki: szacowanie nośności pali fundamentowych na podstawie danych otrzymanych ze statycznej próby obciążania pali fundamentowych (ang. Static pile Load Test, SLT), identyfikacja parametrów nawierzchni warstwowej na podstawie wyników otrzymanych z testu wykonanego z zastosowaniem ugięciomierza dynamicznego (ang. Falling Weight Deflectometer, FWD) oraz identyfikacja wartości parametrów wybranych modeli zredukowanych stosowanych w geotechnice. W rozprawie przedstawione są analizy numeryczne, dane doświadczalne są wykorzystywane wyłącznie w Załączniku A.

Zagadnienia poruszane w rozprawie doktorskiej są aktualne i ważne, omawiane w rozprawie przykłady są przedmiotem badań w wielu ośrodkach badawczych w kraju i za granicą, prezentowane przez Doktoranta podejście jest jednak oryginalne i w dalszej perspektywie ma

potencjał do wykorzystania w praktyce inżynierskiej. Tematyka pracy niewątpliwie jest związana z dyscypliną inżyniera lądowa, geodezja i transport

Tytuł pracy dobrze opisuje zakres przedstawionych w rozprawie badań i eksperymentów numerycznych. Zdaniem recenzenta tytuł mógł być skrócony bez utraty precyzji i szczegółowości opisu zawartości pracy (np. *Direct and Inverse Artificial Neural Networks in Selected Problems of Soil-Structure Interaction*), w obecnej wersji tytuł jest jednak prawidłowy i choć zdaniem recenzenta nieco zbyt rozbudowany to dobrze opisuje badania przedstawione w pracy.

2.2. Charakterystyka rozprawy

Recenzowana praca doktorska jest napisana w języku angielskim. Język pracy jest w zdecydowanej większości czytelny i zrozumiały a zauważone usterki – poza kilkoma zupełnie wyjątkowymi przypadkami – można zaliczyć raczej do literówek niż poważnych błędów.

Rozprawa rozpoczyna się od krótkich, trzy- i czterostronicowych streszczeń w językach polskim i angielskim a jej zasadnicza część podzielona jest na osiem numerowanych rozdziałów (jednym z nich jest spis piśmiennictwa) oraz dwa załączniki. Praca liczy 186 stron, z czego 30 pierwszych to strona tytułowa, podziękowania, spis treści, streszczenia, lista skrótów i symboli oraz spisy tabel i rysunków. Część zasadnicza pracy ma długość 107 stron, 9 stron zajmuje spis literatury obejmujący 166 pozycji, pracę zamykają dwa załączniki o łącznej długości 40 stron.

W spisie literatury nie ma ani jednej pozycji, której autorem lub współautorem były Autor rozprawy. Na początku rozdziału 6. rozprawy znajduje się jednak informacja o zgłoszeniu do publikacji artykułu napisanego na podstawie tej części rozprawy, w momencie pisania recenzji wspomniany przez Autora artykuł jest już opublikowany w czasopiśmie *Studia Geotechnica et Mechanica* i widoczny w bazach WebOfScience oraz Scopus.

Rozdział 1: Introduction to sześciostronicowy rozdział opisujący podstawowe założenia i pojęcia wykorzystywane w rozprawie, wprowadza m.in. pojęcie problemu odwrotnego oraz sztucznej sieci neuronowej. Zawiera także motywację Autora do zajęcia się analizowanym w rozprawie problemem badawczym, podaje także tezę pracy:

It is possible to effectively use Artificial Neural Networks (ANN) in the field of Geotechnical Engineering for numerical solutions of direct and inverse soil-structure interaction problems.

W rozdziale tym wskazane są także trzy problemy badawcze analizowane przez Autora w dalszej części rozprawy: szacowanie nośności pali fundamentowych na podstawie wyników statycznej próby obciążeniowej, identyfikacja parametrów nawierzchni i podłoży (np. posadzek przemysłowych, nawierzchni lotniskowych czy drogowych) oraz wspomaganie budowy modeli zredukowanych stosowanych w geotechnice.

Rozdział jest napisany dobrze, krótko i precyzyjnie przedstawia najważniejsze elementy pracy, podkreśla także najważniejsze – zdaniem Autora – wyniki opisane w rozprawie.

Rozdział 2: Artificial Neural Networks (21 stron) przedstawia zarys historii sztucznych sieci neuronowych i innych metod zaliczanych do grupy tzw. sztucznej inteligencji. W rozdziale Autor przedstawił także budowę i zasadę działania sieci neuronowych oraz zamieścił szkic dowodu

twierdzenia mówiącego, że spełniająca określone warunki sztuczna sieć neuronowa może aproksymować z dowolną dokładnością dowolną funkcję ciągłą.

Rozdział 3: Direct and inverse problems (7 stron) zawiera ogólny opis zagadnień „wprost” oraz „odwrotnych”, możliwości oraz potencjalne korzyści z zastosowania ANN w tych zagadnieniach. W rozdziale opisano także zastosowane w opisanych w rozprawie badaniach sposoby zaimplementowania ANN (przygotowanie wzorców, uczenie sieci, schematy zaimplementowania ANN w rozwiązywaniu zagadnień „wprost” oraz „odwrotnych”).

Rozdział 4: Interpretation of the static pile load test (SLT) using artificial neural networks (29 stron) to pierwszy z trzech rozdziałów przedstawiających własne badania Autora rozprawy. W rozdziale tym omówiono zastosowanie sieci w zagadnieniach związanych z szacowaniem nośności pala fundamentowego na podstawie wyników testu statycznego obciążenia pala. Jako pierwsze opisano zagadnienie wprost, w którym zadaniem ANN było prognozowanie przemieszczenia pala przy znanej wartości obciążenia statycznego przyłożonego do pala oraz zidentyfikowanych wcześniej parametrach modelu Meyera-Kowalowa (model MK), w dalszej części rozdziału skupiono się jednak na znacznie bardziej złożonym i ciekawszym problemie rozwiązania zagadnienia odwrotnego. W zagadnieniu odwrotnym jako wartości znane potraktowano wyniki testu statycznego obciążenia pala, wartościami szukanymi były parametry modelu MK. Jednym z tych szukaných parametrów jest N_{gr} czyli nośność pala.

Doktorant szczegółowo opisał zagadnienie, do rozwiązania którego zastosował ANN, opisał i uzasadnił także kolejne kroki niezbędne z punktu widzenia zastosowania ANN (przygotowanie wzorców, podział na zbiory uczący i testujący, budowa sieci, jej uczenie i testowanie). Opis zastosowania ANN do zagadnienia identyfikacji parametrów modelu MK zakończono szczegółowym opisem otrzymanych wyników.

W drugiej części tego rozdziału Doktorant przedstawił jeden z ciekawszych elementów recenzowanej rozprawy, czyli identyfikację wartości cząstkowych składających się na nośność pala, mianowicie nośność głowicy pala i jego poboczniczy. Również ta część zawiera szczegółowy opis przygotowania danych do uczenia i testowania sieci, proces budowy i uczenia sieci oraz otrzymane wyniki.

Rozdział kończy krótkie podsumowanie zawierające opis otrzymanych wyników oraz szacunek ich dokładności.

Rozdział 5: Identification of parameters of layered pavements using ANN (14 stron) opisuje drugie zagadnienie badawcze analizowane w rozprawie. Doktorant opisuje zagadnienie zastosowania ANN w identyfikacji parametrów podłoża gruntowego z zastosowaniem ugięciomierza dynamicznego. Jak dane wejściowe do ANN wykorzystano parametry wywołanej działaniem FWD czaszy ugięć badanej nawierzchni (opisanej dziewięcioma punktami, odpowiadającymi położeniu dziewięciu geofonów urządzenia FWD), wyjściami sieci i jednocześnie zidentyfikowanymi parametrami były parametry czterech warstw podłoża o znanej grubości.

Doktorant opisał, podobnie jak w poprzednim rozdziale, kolejne etapy pozwalające na przygotowanie wzorców uczących i testujących do uczenia ANN, właściwą procedurę uczenia oraz otrzymane z zadania odwrotnego wspomaganego ANN wyniki w postaci zidentyfikowanych parametrów badanego podłoża.

Otrzymane wyniki oraz dodatkowe analizy zamieszczone pod koniec rozdziału pozwoliły na sformułowanie ciekawego wniosku końcowego o niejednoznaczności rozwiązania otrzymywanego na podstawie danych z badania przeprowadzonego z zastosowaniem FWD. Jednocześnie Doktorant słusznie zauważył, że taka hipoteza wymaga szczegółowej weryfikacji przede wszystkim z wykorzystaniem danych z badań *in situ*.

Rozdział 6: Reduced problems in geotechnical engineering (26 stron) to ostatni z rozdziałów przedstawiających wyniki badań własnych Autora. Rozdział ten przedstawia identyfikację parametrów dwóch uproszczonych modeli podłoża gruntowego (wg terminologii stosowanej przez Autora są to modele „zredukowane”). Modele uproszczone to doskonale znane w literaturze przedmiotu klasyczne modele Winklera oraz Pasternaka, zadaniem badawczym opisanym w rozdziale jest identyfikacja parametrów tych modeli. Daje to możliwość zastąpienia złożonego modelu geotechnicznego, zawierającego obszar struktury budowlanej w interakcji z obszarem ośrodka gruntowego, modelem Winklera lub Pasternaka, w których oddziaływanie gruntu zastępuje się układem więzów o reakcjach zależnych od przemieszczenia konstrukcji.

Podobnie jak w dwóch wcześniejszych rozdziałach Autor opisuje w pierwszym etapie sieciowy model wprost oraz docelowy, wykonujący opisane powyżej zadanie identyfikacji parametrów modeli uproszczonych, sieciowy model odwrotny. W celu identyfikacji parametrów modeli uproszczonych Autor buduje dwuetapową (dwuelementową) sieć neuronową, w której wyjścia z sieci pierwszej są jednocześnie wejściami sieci drugiego poziomu. Pozwala to na zautomatyzowanie i uproszczenie procedury identyfikacyjnej, otrzymana w ten sposób sieć neuronowa pozwala na bezpośrednie określenie parametrów modeli zastępczych na podstawie danych opisujących rzeczywiste podłoże gruntowe.

Rozdział 7: Conclusions and directions of future developments (4 strony) zawiera podsumowanie zagadnień badawczych opisanych i przeanalizowanych w pracy oraz otrzymane wyniki i wynikające z nich wnioski. Rozdział ten wprowadza także pomocnicze zagadnienie budowy modeli uproszczonych w odniesieniu do projektowania nośności pali fundamentowych i odsyła do Załącznika A pracy (Appendix A), w którym to zagadnienie jest szerzej opisane.

Rozdział 7 zawiera także podsumowanie elementów, które zdaniem Autora rozprawy stanowią o oryginalności opisanych badań i wnoszą element nowości do analizowanych zagadnień:

- propozycja podejścia pozwalającego określić nie tylko końcową nośność pala fundamentowego ale także rozdzielić ją na elementy związane z pracą głowicy pala oraz jego pobocznicy (Rozdział 4),
- propozycja zastosowania ANN do interpretacji wyników badania przeprowadzonego z zastosowaniem FWD (Rozdział 5),
- zastosowanie dwuelementowej, złożonej sieci neuronowej do identyfikacji parametrów uproszczonych modeli współpracy struktury budowlanej z podłożem gruntowym (Rozdział 6).

Rozdział 6: References (9 stron) zawiera zestawienie pozycji literaturowych wykorzystanych w rozprawie. Autor powołuje się w pracy na 166 pozycji, z czego 115 pierwszych jest cytowanych w zasadniczej części pracy a pozycje od numeru 116 wzwyż w Załączniku A.

Appendix A: Problems during formulation model of reference of pile foundation using Plaxis FEM program (23 strony) opisuje zagadnienie budowy modelu fundamentu palowego w wykorzystywanym przez Doktoranta oprogramowaniu Plaxis2D. W rozdziale tym wykorzystano rzeczywiste dane z badania SLT udostępnione Doktorantowi przez prof. K. Gwizdałę, na podstawie tych danych przeprowadzono kalibrację budowanego modelu numerycznego.

Doktorant opisał szereg zagadnień analizowanych podczas budowy modelu numerycznego, w tym model geometryczny, wybór elementu skończonego, budowę siatki elementów skończonych, tworzenie strefy kontaktu pal-ośrodek gruntowy oraz tworzenie modeli uproszczonych.

Appendix B: Source codes of the solvers created for the doctoral dissertation (16 stron) to rozdział ostatni rozprawy, zawiera kody części programów zbudowanych przez Autora podczas pracy nad rozprawą.

3. Merytoryczna ocena rozprawy

Układ pracy jest typowy dla prac doktorskich. Rozprawę rozpoczyna (rozdziały 2. i 3.) przegląd aktualnego stanu wiedzy w zakresie głównego narzędzia zastosowanego w badaniach opisanych w rozprawie (sztuczne sieci neuronowe) oraz sformułowania zagadnień „wprost” i „odwrotnego”, będących głównymi problemami analizowanymi w rozprawie.

Ze względu na przyjęte podczas pisania pracy założenia i wynikające z tego skoncentrowanie się na narzędziu (ANN), część opisu teoretycznego i analiza stanu wiedzy znajduje się także w rozdziałach kolejnych (od 4. do 6.), w których Doktorant analizuje konkretne przypadki i propozycje wykorzystania ANN w wybranych zagadnieniach geotechnicznych. W tak skonstruowanej rozprawie jest to zdaniem recenzenta uzasadnione.

W drugiej części pracy (rozdziały 4., 5. oraz 6.) Doktorant przedstawia propozycje zastosowania ANN w wybranych zagadnieniach geotechniki:

- szacowanie nośności pala fundamentowego na podstawie wyników próby statycznego obciążenia,
- identyfikacja parametrów podłoża gruntowego (lub warstw nawierzchni) na podstawie wyników badania prowadzonego maszyną FWD,
- identyfikacja parametrów modeli uproszczonych, opisujących interakcję struktury budowlanej z ośrodkiem gruntowym.

Przykłady zastosowania sieci neuronowych są dobrze dobrane, obrazują rzeczywiste i ważne zagadnienia badane i analizowane w geotechnice inżynierskiej w wielu ośrodkach naukowych. Podejście zaproponowane przez Doktoranta jest ciekawe i oryginalne, zadaniem recenzenta na podkreślenie zasługuje przede wszystkim zaproponowane w rozdziale 6. zastosowanie sieci złożonej, zbudowanej z dwóch odrębnych sieci neuronowych osobno uczonych i trenowanych i połączonych po nauczaniu w jedną strukturę. Ciekawa i warta podkreślenia jest także propozycja identyfikacji obu elementów wpływających na nośność pala fundamentowego, mianowicie osobno identyfikacja części nośności całkowitej przypadającej na głowicę lub na pobocznice pala. Zastosowanie takiego podejścia w praktyce mogłoby dać inżynierowi dodatkową informację pozwalającą na ograniczenie niepewności i ryzyka nieosiągnięcia zakładanej nośności przez inne pale w sąsiedztwie badanego i analizowanego przy wykorzystaniu ANN. Kompletna wiedza

dotycząca części całkowitej nośności przypadającej na głowicę lub nośność pozwoliłaby więc minimalizować ryzyko w sytuacji zmiennych warunków gruntowych i wodnych.

Teza pracy, ogólna i bezpiecznie sformułowana, została zdaniem recenzenta udowodniona. Recenzent nie ma także wątpliwości, że Doktorant udowodnił właściwe przygotowanie teoretyczne, wykazał również, że dysponuje niezbędną wiedzą i umiejętnościami pozwalającymi na oryginalne rozwiązanie problemów naukowych sformułowanych w tytule i w tezie pracy a szczegółowo omówionych w kolejnych rozdziałach rozprawy.

Należy także zauważyć, że tematyka pracy niewątpliwie mieści się w całości w zakresie dyscypliny naukowej inżyniera lądowa, geodezja i transport.

Recenzowana praca nie jest pozbawiona usterek i wad, szczególnie zostały one opisane w kolejnym rozdziale wraz z pytaniami i uwagami merytorycznymi. Uwagi i wątpliwości nie zmieniają jednak jednoznacznie pozytywnej opinii recenzenta.

4. Uwagi szczegółowe

4.1. Uwagi merytoryczne

Uwagi i pytania są uszeregowane według ich wagi, najważniejsze znajdują się na początku listy.

- (1) W przedstawionych w pracy zadaniach oparto się (zgodnie z tytułem pracy) wyłącznie na danych otrzymanych z symulacji numerycznych. Nie weryfikowano zaproponowanego podejścia ani na danych otrzymanych z badań *in situ* (co w przypadku zadań bezpośrednio związanych z podłożem gruntowym ma duże znaczenie) ani nie próbowano wprowadzić sztucznych błędów poprzez zaszumienie danych numerycznych. Na dane otrzymane z doświadczenia Doktorant powołuje się jedynie w Załączniku A, nie ma to jednak bezpośredniego związku z przedstawionymi w zasadniczej części rozprawy zagadnieniami zastosowania ANN w zadaniach geotechniki. Czy Doktorant nie obawia się, że w przypadku aplikacji do praktycznych zagadnień niezbędne będzie znacznie rozbudowanie zaproponowanych procedur?
- (2) W rozdziale 6. Doktorant m.in. buduje złożoną sieć, której elementy są uczone i testowane oddzielnie. Czy badano podejście bezpośrednio, mianowicie pojedynczą sieć z wejściami takimi jak w sieci pierwszej w podejściu złożonym i wyjściami odpowiadającymi parametrom wyjściowym sieci drugiego poziomu w podejściu złożonym? Koncepcja sieci złożonej jest bardzo ciekawa, bez porównania z siecią klasyczną trudno jednak obiektywnie ocenić jej zalety.
- (3) Zastrzeżenia recenzenta budzi opis kryteriów stopu procedury uczenia sieci zastosowanych w zadaniu opisanym na str. 88 (rozdział 6.3.2): *The criterion for stopping the training is always in this paper the minimum of the Root Mean Square Error (RMSE) for the testing set.* Jeżeli jednym w warunków zakończenia procesu uczenia sieci jest wzrastający błąd testowania to wykorzystany do tego zbiór wzorców nie jest zbiorem testowym a walidującym. Właściwe testowanie powinno być w takim przypadku przeprowadzone na trzecim zbiorze, prezentowanym sieci neuronowej po raz pierwszy i jedyny już po zakończeniu procesu uczenia. W innych zadaniach Doktorant nie opisuje szczegółowo warunków stopu, w cytowanym zdaniu stwierdza jednak, że w każdym zadaniu to kwestionowane tutaj podejście było zastosowane. Być może wyjaśnieniem jest konflikt

oznaczeń, Doktorant we wstępie opisuje trzy zbiory: trainig, testing, evaluation. Czyżby nazwa 'testing' w kontekście tej pracy określała proces zwyczajowo w odniesieniu do sieci nazywany walidacją ('validation set') a 'evaluation' odpowiadał faktycznemu testowaniu? Proszę o komentarz i precyzyjne opisanie zadań przypisanych zbiorom wzorców, nazywanym w pracy odpowiednio 'trainig', 'testing' oraz 'evaluation subsets'.

- (4) Przedstawianie wyników otrzymanych z ANN dla poszczególnych wzorców, w postaci wykresów takich jak Fig. 4.2, nie jest czytelne – wykresy tego typu są trudne do czytania i analizy, małe błędy są na nich w ogóle niewidoczne; podobnie prezentacja wszystkich wyjść (często o różnej naturze fizycznej) na jednym wykresie (np. Fig. 4.19, str. 59, prezentuje N_{gr} , k oraz C) uniemożliwia oddzielną analizę dokładności identyfikacji poszczególnych parametrów.
- (5) Uporządkowania i uzupełnienia wymaga spis literatury. Przykładowo Doktorant przywołuje autorów cytowanych prac pełnym imieniem i nazwiskiem lub tylko inicjałem imienia i nazwiskiem, w jednym przypadku w ogóle pomija informację o autorze (pozycja [74], praca doktorska Kamila Stacheckiego). W dwóch przypadkach opis cytowanych pozycji jest skrajnie ubogi ([77] oraz [160]).
- (6) Specyficzne oznaczanie argumentów funkcji za pomocą symbolu @ (np. wzór (3.8) na str. 33) nie jest przyjazne dla czytelnika.
- (7) Opis tekstowy znajdujący się na części rysunków jest zbyt mały a przez to nieczytelny, np. Fig. 4.2 (str. 45).
- (8) Prezentacja danych opisujących architekturę i inne parametry ANN w postaci zrzutów ekranowych (np. Fig. 4.23, str. 61) nie jest dobrym rozwiązaniem, znacznie czytelniejsza byłaby tabela z danymi.

4.2. Uwagi redakcyjne

Recenzowana praca nie jest pozbawiona wad i usterek redakcyjnych. Poniżej zostały zebrane najważniejsze uwagi recenzenta:

- (a) nieprawidłowe lub niekonsekwentne odwołania do tabel (np. Tabela 1 zamiast Tabela 1.1), rysunków (np. skrótem Fig. 2.7. lub pełnym wyrażeniem Figure 2.4 czy też seryjne błędy w odwołaniach do rysunków na str. 43 i kolejnych), wzorów (np. odwołanie do nieistniejącego wzoru 1 na str. 25) a nawet rozdziałów pracy (np. odwołanie do nieistniejących rozdziałów 6.5.3.3 na str. 129⁴, czy też 6.5.4.2 na str. 133⁷ – w pracy w ogóle nie ma rozdziału 6.5),
- (b) łamanie strony pomiędzy rysunkiem a jego numerem i podpisem (po raz pierwszy na str. 17) lub łamanie wiersza nawet wewnątrz opisu jednostek w tabelach (głównie w Załączniku A, np. na str. 131-132 w Tabeli A.2),
- (c) brak konsekwencji w nazewnictwie (np. małe/wielkie litery, wymiana liter na inne, zmiana kolejności),
- (d) wielokrotne wprowadzanie tych samych skrótów i ich niekonsekwentne stosowanie,
- (e) brak omówienia części oznaczeń lub ich opis znacznie później niż były wprowadzone i wielokrotnie wykorzystywane (przede wszystkim N_{gr2} , stosowane zamiennie z N_{gr} choćby w opisie wzoru 4.2, znaczenie dolnego indeksu $(\cdot)_2$ wyjaśnione dopiero przy okazji opisu wzoru 4.16, trzynastej stron później),
- (f) w rozdziale 2.6.1 kilkukrotne powtarzanie „function, function and operator” w miejsce prawidłowego „function, functional and operator”,

- (g) odwoływanie się do treści rozprawy jako do „artykułu” (‘paper’ na str. 21₂ lub 66₇ czy ‘article’ na str. 65₃),
- (h) stosowanie różnych oznaczeń na te same pojęcia (np. aproksymacja sieciowa jest oznaczana w części pracy jako ANN_1, w części jako N)
- (i) opisy rysunków w niektórych przypadkach nie odpowiadają ich treści (Fig. 6.23 przedstawia prawdopodobnie wyniki identyfikacji parametrów h , k_w oraz G , na wykresach wszystkie są opisane jako E).

5. Wniosek końcowy

Doktorant wykazał się znajomością wiedzy teoretycznej oraz umiejętnością planowania, przygotowania i prowadzenia symulacji numerycznych. Udowodnił także, że potrafi samodzielnie i oryginalnie rozwiązać problem badawczy sformułowany jako zadanie wprost lub zadanie odwrotne geotechniki.

Mając to na uwadze i uwzględniając również uwagi krytyczne sformułowane w niniejszej recenzji stwierdzam, że praca doktorska Pana mgr. inż. Artura Górala spełnia warunki określone w Ustawie z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. 2018 poz. 1668 z późniejszymi zmianami) w Art. 186.

Wnioskuje o przyjęcie pracy doktorskiej *Direct and Inverse Artificial Neural Networks as Auxiliary Tools in Numerical Solutions of Selected Problems of Soil-Structure Interaction in Geotechnical Engineering* oraz o dopuszczenie Pana mgr. inż. Artura Górala do publicznej obrony.



Bartosz Miller