

Łódź, dnia 29.09.2023r.

.....Artur Góral.....

(imię i nazwisko)

Summary in Polish (Streszczenie w języku polskim)

Rozprawa doktorska zatytułowana „Direct and inverse artificial neural networks as auxiliary tools in numerical solutions of selected problem of soil-structure interaction in geotechnical engineering” (pol. "Sztuczne sieci neuronowe „wprost” i sieci odwrotne jako narzędzia pomocnicze w numerycznych rozwiązaniach wybranych problemów interakcji grunt-struktura w geoinżynierii”) skupia się na zagadnieniach związanych z zastosowaniem sztucznych sieci neuronowych do rozwiązania zagadnienia odwrotnego w geotechnice i w mechanice gruntów. Zagadnienie „wprost” i zagadnienie odwrotne analizowane jest również w kontekście budowy uproszczonego modelu numerycznego zagadnień geotechnicznych.

W projektowaniu geotechnicznym podstawowym modelem matematycznym jest zagadnienie brzegowe obejmujące jednocześnie strukturę budowlaną oraz podłoże gruntowe we wzajemnej interakcji. Jego rozwiązanie jest zwykle uzyskiwane w formie przybliżonej, jako rezultat zastosowania Metody Elementów Skończonych do sformułowanego zagadnienia brzegowego. Podczas gdy konstytutywne zachowanie materiałów budowlanych stosowanych w obszarze struktury budowlanej jest dość dobrze znane, w zagadnieniach geotechnicznych ośrodek gruntowy ma właściwości mechaniczne, które są często trudne do rozpoznania. Źródłem trudności jest tu potrzeba przeprowadzenia badań laboratoryjnych oraz badań in situ właściwości mechanicznych gruntu, naturalne niejednorodności gruntu i jego nieliniowe zachowanie, dlatego takie badania są zwykle kosztowne, a ich liczba jest ograniczona. Ponadto w badaniach geotechnicznych parametry mechaniczne gruntu określane są pośrednio, poprzez pomiar wartości z nimi skorelowanych. Dokładne dane dotyczące właściwości gruntu i zachowania interfejsu grunt-konstrukcja mają zatem kluczowe znaczenie dla jakości modelu numerycznego i jakości projektu. Zagadnienie brzegowe, które jest podstawą matematyczną projektowania inżynierskiego wymaga podania właściwości materiałów struktury budowlanej i ośrodka gruntowego. Dane definiujące związki konstytutywne są danymi wejściowymi, ich rzetelność jest warunkiem stosowalności przyjętego modelu matematycznego i wiarygodności rozwiązania inżynierskiego. W rozprawie zagadnienie brzegowe o którym mowa powyżej będzie nazywane zagadnieniem „wprost” zaś zagadnienie identyfikacji parametrów materiałowych występujących w równaniach konstytutywnych będzie określane jako „zagadnienie odwrotne”. Określenia „zagadnienie odwrotne” jest naturalne, jeśli przyjąć, że modelem matematycznym eksperymentu fizycznego (laboratoryjnego lub in situ) jest podobne zagadnienie brzegowe, o odpowiednio zdefiniowanej geometrii i obciążeniach, w którym nieznane są parametry materiału zaś znane – typowe elementy rozwiązania, czyli obciążenia na brzegu i odpowiadające im, pomierzone w doświadczeniu przemieszczenia.

O ile metody rozwiązania inżynierskiego zagadnień brzegowych, kiedy dane są właściwości materiałów są dobrze znane, o tyle problem odwrotny prowadzący do określenia wartości parametrów charakteryzujących materiały prowadzi (w ogólności) do problemów

minimalizacji z więzami różniczkowymi, które nie są typowymi problemami inżynierskimi. Podstawowa teza tej pracy jest wykazanie, że sztuczne sieci neuronowe są szczególnie skutecznym narzędziem rozwiązania zagadnienia odwrotnego. Tezę pracy, sformułowaną w rozdziale pierwszym, uzasadniono przedstawiając sposób rozwiązania zagadnienia odwrotnego za pomocą sztucznych sieci neuronowych oraz stosując tę metodę w kilku przekonujących przykładach z dziedziny geotechniki. Przedstawiono również sposób formułowania zagadnienia uproszczonego opierający się na narzędziach numerycznych do rozwiązania zagadnienia odwrotnego.

Część merytoryczna rozprawy składa się z 7 rozdziałów.

W rozdziale 1 autor przedstawia podjętą tematykę, motywację do napisania pracy oraz problematykę i główne cele pracy. Formułuje jej tezę i zasadnicze przesłanie, tak jak to napisano powyżej.

Rozdział 2 pracy doktorskiej zawiera studium literaturowe obejmujące rys historyczny rozwoju sztucznych sieci neuronowych oraz prezentację teoretycznych i koncepcyjnych podstaw ich działania. Jest to opis szczegółowy algorytmu działania sztucznej sieci neuronowej oraz jej elementów. Szczególny nacisk położono na przedstawienie właściwości sztucznej sieci neuronowej jako uniwersalnego aproksymatora funkcji, funkcjonau lub operatora. W tej roli, sztuczne sieci neuronowe stosowane są we wszystkich przykładach przedstawionych w tej rozprawie. W większości zagadnień opisywanych w tej rozprawie sztuczna sieć neuronowa używana jest jako substytut rozwiązania uzyskanego metoda elementów skończonych. Dla wybranych elementów takiego rozwiązania (przemieszczenia w niewielkiej liczbie punktów obszaru) sieć nauczona rozwiązaniami uzyskanymi przy pomocy MES może te rozwiązania skutecznie symulować dla różnych parametrów materiałowych.

Rozdział 3 niniejszej rozprawy poświęcony jest sformułowaniu zagadnienia „wprost” i zagadnienia odwrotnego oraz związanych z tymi problemami – rozwiązania „wprost” i rozwiązania odwrotnego. Podczas gdy problem „wprost” jest zawsze interpretowany jako problem projektowania konstrukcji, problem odwrotny może być interpretowany jako model (teoretyczny i numeryczny) eksperymentu. W procedurze eksperymentalnej zwykle mierzymy przemieszczenia dla znanych naprężeń dla określonej geometrii próbki i narzuconych ograniczeń. Informacja o właściwościach mechanicznych materiału próbki jest nieznana i ma być uzyskana z tych danych. Znaczenie problemu odwrotnego do niedawna było niedoceniane w rozwiązywaniu praktycznych i teoretycznych problemów inżynierii lądowej. Problem odwrotny rozwiązuje podstawowy problem w zastosowaniach praktycznych, a mianowicie: jak określić parametry mechaniczne materiału, dla których uzyskano dane eksperymentalne odpowiedzi konstrukcji. W inżynierii geotechnicznej zwykle niemożliwe jest zaprojektowanie eksperymentu w taki sposób, aby wartości parametrów mechanicznych gruntu można było trywialnie określić. Obecnie, w dobie rozwoju metod numerycznych, określenie danych materiałowych adekwatnych do modelu obliczeniowego powinno być ważnym ogniwem w procesie obliczeń geotechnicznych. Przedstawiono metodę rozwiązania problemu odwrotnego, która opiera się na wykorzystaniu sztucznych sieci neuronowych jako narzędzia pomocniczego. Rozwiązanie odwrotne może być aproksymowane przez

trenowanie sztucznej sieci odwrotnej (SSN⁻¹), przy użyciu tego samego zestawu rozwiązań testowych jak dla problemu bezpośredniego, ale w tym przypadku pierwszy element pary trenującej jest używany jako cel dla neuronów wyjściowych, a drugi - jest prezentowany na warstwie wejściowej SNN. Ze względu na fakt, że sztuczne sieci neuronowe są uniwersalnymi aproksymatorami, dobrze wytrenowane sieci są doskonałym przybliżeniem zarówno rozwiązań bezpośrednich, jak i odwrotnych, również dla wartości wejściowych nigdy nie używanych w treningu. Choć może to brzmieć paradoksalnie, dzięki zastosowaniu sieci neuronowych, problem odwrotny może być łatwo rozwiązany, nawet bez potrzeby formułowania go, bazując na dobrze znanych klasycznych rozwiązaniach problemu „wprost”.

W rozdziale 4 przedstawiono przykład ilustrujący zastosowania wprowadzonej konwencji terminologicznej oraz efektywność zaproponowanego rozwiązania odwrotnego wspomaganego sztuczną siecią neuronową. W przykładzie tym rozważa się problem oszacowania nośności pala na podstawie doświadczenia *in situ*, mianowicie – testu statycznego obciążenia pala. W przykładzie założono, że dane przemieszczenia głowicy pala, uzyskane podczas testu statycznego obciążenia, mogą być aproksymowane krzywą Meyera-Kowalowa. Trzy parametry tej krzywej (rozumianej jako prosty związek konstytutywny – przemieszczenie w funkcji obciążenia) są nieznanymi parametrami tego związku, ustalonymi jako rozwiązanie zagadnienia odwrotnego. W rozdziale tym pokazano jak wytrenować sieć „wprost” aproksymującą krzywą doświadczalną uzyskaną w wyniku testu oraz jak wytrenować sieć odwrotną, na której wyjściu można uzyskać nieznane parametry krzywej Meyera-Kowalowa. Jeden z tych parametrów jest interpretowany jako nośność pala. Istotnym elementem nowości zaproponowanym w tym rozdziale jest przedstawienie możliwości rozdzielenia nośności całkowitej na nośność poboczniczy i nośność stopy pala bazując jedynie na danych zawartych w wykresie nośności pala uzyskanym podczas próby statycznej. Taka możliwość pojawia się dzięki zastosowaniu sztucznych sieci neuronowych do analizy krzywej nośności rozumianej jako przedmiot zagadnienia odwrotnego.

W rozdziale 5 przedstawiono możliwość zastosowania sztucznych sieci neuronowych do interpretacji czaszy dynamicznego ugięcia powierzchni pod działaniem spadającej masy w teście FWD, stosowanym do oceny właściwości mechanicznych warstw nawierzchni i podbudowy dróg, posadzek oraz lotnisk. Model numeryczny podłoża gruntowego uwarstwionego sformułowano i rozwiązano przy pomocy metody elementów skończonych. Dla przemieszczeń w typowych punktach obserwacyjnych testu FWD wytrenowano sieć neuronową „wprost” oraz sieć odwrotną. Używając sieci odwrotnej w trybie „przypomnienia”, dla danych pomierzonych skierowanych na wejście sieci, sieć odpowiada przypisaniem wartości modułów Younga kolejnych warstw, neuronom wyjściowym sieci. W ten sposób odpowiednio wytrenowana sieć odwrotna dostarcza rozwiązania problemu odwrotnego, uzyskiwanego tradycyjnie drogą kosztownych numerycznie rozwiązań zagadnienia minimalizacji funkcjonału z więzami. W podejściu klasycznym identyfikowane warstwy podłoża są reprezentowane przez model sprężysty półprzestrzeni uwarstwionej. W prezentowanej metodzie model podłoża ograniczony jest jedynie możliwościami użytego programu metody elementów skończonych do modelowania zagadnienia „wprost”.

W rozdziale 6 przedstawiono koncepcję redukcji złożonego modelu geotechnicznego zawierającego obszar struktury budowlanej w interakcji z obszarem ośrodka gruntowego. Ograniczono się do klasycznych modeli Winklera oraz Pasternaka, w których oddziaływanie gruntu zastępuje się układem więzów, których reakcje zależą od przemieszczenia konstrukcji. W tych modelach (oraz w innych podobnych) podstawowym problemem jest oszacowanie parametrów wprowadzonych więzów w zależności od właściwości gruntu, który został w ten sposób zastąpiony. Koncepcja polega na zbudowaniu złożonej sieci neuronowej, której pierwszy element (pierwsze warstwy ukryte) jest fragmentem sieci „wprost” wytrenowanej modelem „odniesienia” (modelem, który ma być uproszczony) zaś drugi fragment (kolejne warstwy ukryte) pochodzą z sieci odwrotnej wytrenowanej przykładami rozwiązań modelu zredukowanego. Przedstawiono sposób konstrukcji takiej sieci złożonej dla dwóch prostych przykładów. Na wyjściu tej sieci otrzymuje się parametry więzów modelu zredukowanego w funkcji parametrów gruntu, które zastępują te więzy w modelu odniesienia. Zaproponowana procedura jest automatyczna i może być w przyszłości zastosowana do modelowania bardziej złożonych zagadnień geotechnicznych.

W rozdziale 7 podsumowano wyniki rozprawy doktorskiej i przedstawiono perspektywy przyszłych badań. Autor zwraca uwagę, że wyniki w łatwy sposób można zweryfikować lub uaktualnić dodatkowymi badaniami. Przedstawione są tu również ograniczenia metody. W szczególności przedstawiono przypadek, w którym trudno jest zbudować wiarygodny model zredukowany dla pała przy pomocy programu „Plaxis” oraz perspektywy kalibracji takiego modelu, które pojawiają się dzięki zaproponowanym algorytmom rozwiązania zadania odwrotnego. Rozprawę doktorską zakończono wskazaniem potencjalnych kierunków dalszych prac badawczych oraz opisem wniosków dotyczących narzędzi i metod wykorzystywanych jako narzędzie pomocnicze w dziedzinie inżynierii geotechnicznej do numerycznego rozwiązywania bezpośrednich i odwrotnych problemów interakcji gruntu z konstrukcją.

Streszczenie dotyczące rozprawy doktorskiej pt. „Direct and inverse artificial neural networks as auxiliary tools in numerical solutions of selected problems of soil-structure interaction in geotechnical engineering”.

Artur Góral

(podpis osoby ubiegającej się o nadanie stopnia doktora)