

Prof. dr hab. inż. Zbigniew Wójcicki  
Katedra Mechaniki Budowli i Inżynierii Miejskiej  
Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego  
Politechnika Wrocławska  
Tel. +4871 3230 23 37  
e-mail: zbigniew.wojcicki@pwr.edu.pl

Wrocław, 12 października 2023r.

## **RECENZJA**

Rozprawy doktorskiej mgr inż. Mykoli Nagirniaka  
pt. „Modyfikacja modelu podłoża Vlasova”

### **1. Podstawa formalna**

Recenzja opracowana została na prośbę Dyrektora Instytutu Inżynierii Lądowej Szkoły Głównej Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie. Pismo nr IIL 32/2023 w tej sprawie, wraz z pracą w wersji papierowej i elektronicznej oraz stosownymi dokumentami, wpłynęło do Sekretariatu Wydziału Budownictwa Lądowego i Wodnego Politechniki Wrocławskiej dnia 24.07.2023 roku. Przesyłkę z pismem przewodnim zlecającym mi wykonanie recenzji pracy oraz pracą w wersji papierowej i elektronicznej odebrałem z Sekretariatu dopiero po urlopie dnia 21.09.2023 roku.

Recenzja, zgodnie z Ustawą z dnia 20 lipca 2018 r. „Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce” Dz. U. 2018 poz. 1668 ze zm. Art. 187, powinna określić czy:

„1. Rozprawa doktorska prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną kandydata w dyscyplinie albo dyscyplinach oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej lub artystycznej.

2. Przedmiotem rozprawy doktorskiej jest oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, oryginalne rozwiązanie w zakresie zastosowania wyników własnych badań naukowych w sferze gospodarczej lub społecznej albo oryginalne dokonanie artystyczne.”

### **2. Ocena celowości podjętej tematyki**

Przedmiotem recenzji jest w zasadzie praca teoretyczna dotycząca porównania rozwiązań analitycznych i numerycznych zagadnień półprzestrzeni i warstwy sprężystej, uzyskanych na podstawie modelu podłoża sprężystego Vlasova, z rozwiązaniem ścisłym teorii sprężystości, a także modyfikacje modelu Vlasova, polegające na bardziej ogólnych założeniach kinematycznych oraz uwzględnieniu niejednorodności i poprzecznej izotropii ośrodka gruntowego. Użyłem sformułowania „w zasadzie”, ponieważ praca zawiera także pewną walidację proponowanych modeli numerycznych przeprowadzoną w oparciu o wyniki badań doświadczalnych, ale pozyskanych z literatury.

Problem modelowania podłoża gruntowego dotyczy wszystkich obiektów budowlanych stosowanych w praktyce inżynierskiej. Jest to jednocześnie, na ogół, najmniej precyzyjnie określony obszar z tych, które pojawiają się w procesie projektowania i realizacji procesu budowlanego. Jak wspomina autor pracy, „zachowanie gruntów pod obciążeniem

jest zagadnieniem bardzo skomplikowanym, w dużym stopniu różniącym się od zachowania materiałów konstrukcyjnych. Grunt jest materiałem o mniejszej wytrzymałości, charakteryzujący się nieliniowymi właściwościami fizycznymi, co prowadzi z kolei do potrzeby opracowania specjalnych metod badania własności mechanicznych oraz ich matematycznemu opisaniu.”

Podstawowym narzędziem pozwalającym na poprawne i bezpiecznie zaprojektowanie sposobu posadowienia budowli staje się więc modelowanie matematyczne. Pozwala ono na uniknięcie bardzo kosztownych i często niewykonalnych w pełnej skali eksperymentów oraz na rozwiązanie rozmaitych problemów technicznych jeszcze na etapie projektowania. Nowe, dokładniejsze modele, po ich walidacji, mogą poprawnie uwzględniać nie tylko sprężyste właściwości podłoża, ale też lepkość, plastyczność, niejednorodność, anizotropowość, zmianę wilgotności itp. Problemem zasadniczym jest jednak nie tyle stworzenie nowego matematycznego modelu podłoża gruntowego, co stworzenie modelu, który po walidacji np. eksperymentalnej, dobrze opisuje mechaniczne właściwości rozmaitych gruntów. Taką właśnie ideę realizuje oceniana przeze mnie rozprawa doktorska mgr inż. Mykoli Nagirniaka.

Jak widać, tematyka pracy jest niesłychanie istotna tak z teoretycznego jak i praktycznego punktu widzenia.

W świetle powyższych uwag stwierdzam, że tematyka recenzowanej rozprawy doktorskiej została trafnie dobrana, rozpatrywany problem naukowy jest interesujący od strony poznawczej, a jednocześnie merytorycznie trudny i jego rozwiązanie ma bezpośrednie znaczenia praktyczne.

Tytuł pracy jest zgodny z merytoryczną zawartością rozprawy.

### **3. Cel pracy**

W pracy sformułowano 3 cele:

1. Weryfikacja modelu podłoża Vlasova dla wybranych przypadków obciążenia warstwy sprężystej na podstawie rozwiązań ścisłych teorii sprężystości.
2. Modyfikacja modelu podłoża Vlasova, polegającą na:
  - a) uwzględnieniu przemieszczeń stycznych do powierzchni ograniczającej podłoże,
  - b) założeniu, że ośrodek gruntowy jest poprzecznie izotropowy,
  - c) założeniu, że charakterystyki materiałowe, takie jak  $E$ ,  $\nu$  i  $G$ , są zmienne po głębokości warstwy.
3. Dobór parametrów sprężystości w zakresie małych i średnich odkształceń.

**Uważam, że cel został określony jasno i prawidłowo.**

### **4. Zakres i krótkie omówienie treści rozprawy**

Opiniowana praca doktorska została przedstawiona w formie zwartej i obejmuje 192 strony rękopisu, składa się z dziewięciu rozdziałów oraz dwóch załączników. Na początku pracy zamieszczono streszczenie rozprawy w języku polskim i angielskim. Pierwszy rozdział stanowi WSTĘP, a ostatni – PODSUMOWANIE I WNIOSKI, po którym zamieszczono dwa załączniki. Pracę kończy zestawienie PRAC CYTOWANYCH W TEKŚCIE zawierające 114 pozycji. W tekście rozprawy zamieszczono 281 rysunków oraz 7 tablic.

#### **Rozdział 1. WSTĘP**

We wstępie przedstawiono podstawowe wiadomości o modelowaniu podłoża gruntowych, zaprezentowano i krótko omówiono typy modeli mechanicznych podłoża oraz metody i problemy w modelowaniu matematycznym podłoża. Uzasadniono wybór tematu pracy oraz określono cel i zakres pracy, a także przedstawiono oznaczenia stosowane w pracy. Omówiono także zastosowanie ścisłych i przybliżonych metod analitycznych rozwiązywania układu równań przemieszczeniowych teorii sprężystości oraz nieliniowych właściwościach parametrów charakteryzujących sztywność gruntu.

## **Rozdział 2. STATYKA WARSTWY GRUNTU WEDŁUG TEORII VLASOVA**

W rozdziale, krótko przedstawiono przestrzenny oraz płaski model podłoża Vlasova. Opisano także główne założenia kinematyczne modelu Vlasova oraz metodę ortogonalizacji Galerkina równań przemieszczeniowych teorii sprężystości.

## **Rozdział 3. PRZESTRZENNE ZAGADNIENIA TEORII SPRĘŻYSTOŚCI**

W rozdziale opisano rozwiązanie ściśle równań przemieszczeniowych teorii sprężystości wybranych przypadków obciążenia półprzestrzeni, warstwy, warstwy na półprzestrzeni oraz układu dwu warstw sprężystych, takich jak: obciążenia w kształcie koła i prostokąta. Omówiono rozwiązanie zagadnienia Boussinesq'a, mającego charakter rozwiązania fundamentalnego. Przedstawiono wykresy przemieszczeń półprzestrzeni, warstwy, warstwy na półprzestrzeni oraz układu dwóch warstw obciążanych na powierzchni. W szczególności wykazano, że w przypadku półprzestrzeni obciążonej w kształcie prostokąta istnieje zależność pomiędzy maksymalnym przemieszczeniem a przemieszczeniami na środku boku oraz w narożu tego prostokąta.

## **Rozdział 4. ROZWIĄZANIA PRZYBLIŻONE WYBRANYCH PRZYPADKÓW OBCIĄŻENIA WARSTWY SPRĘŻYSTEJ**

W rozdziale przedstawiono przybliżone wzory pozwalające na wyznaczenie maksymalnych przemieszczeń pionowych warstwy o dowolnej miąższości, obciążonej na powierzchni w kształcie koła lub prostokąta. Przybliżone wzory uzyskano korzystając z rozwiązań ścisłych dla półprzestrzeni i warstwy sprężystej. Przedstawiono propozycję przyjęcia funkcji zanikania przemieszczeń wraz z głębokością. Zaproponowano zmodyfikowane funkcje zanikania przemieszczeń Vlasova, a także funkcje zanikania, bazujące na rozwiązaniu ścisłym teorii sprężystości dla półprzestrzeni sprężystej.

## **Rozdział 5. WERYFIKACJA MODELU PODŁOŻA VLASOVA**

W rozdziale przedstawiono weryfikację modelu podłoża Vlasova, polegającą na porównaniu rozwiązań ścisłych teorii sprężystości z rozwiązaniami, uzyskanymi według modelu Vlasova dla wybranych przypadków obciążenia warstwy sprężystej, takich jak: obciążenie w kształcie koła oraz prostokąta.

## **Rozdział 6. ZMODYFIKOWANY MODEL PODŁOŻA**

W rozdziale przedstawiono zmodyfikowany model podłoża, uwzględniający poprzeczną izotropię i niejednorodność na głębokości rozpatrywanego ośrodka, a także uwzględniający trzy niezerowe składowe wektora przemieszczenia. Zaproponowano opis niejednorodnego, poprzecznie izotropowego ośrodka poprzez wielkości stałe i funkcje zmienne na głębokości warstwy. Przedstawiono także modele zmodyfikowanego podłoża gruntowego, otrzymywane dzięki wprowadzeniu różnych założeń kinematycznych lub

fizycznych. Zmodyfikowane modele podłoża zostały wyprowadzone w kartezjańskim oraz w walcowym układzie współrzędnych. Przedstawiono zmodyfikowany dwuparametrowy model podłoża Vlasova, uwzględniający poprzeczną izotropię ośrodka oraz zmienność charakterystyk materiałowych wraz ze zmianą głębokości warstwy.

## **Rozdział 7. WERYFIKACJA ZMODYFIKOWANEGO MODELU PODŁOŻA**

W rozdziale przedstawiono weryfikację zmodyfikowanego modelu podłoża na podstawie teorii sprężystości dla poprzecznie izotropowej warstwy, obciążonej na powierzchni w kształcie prostokąta oraz koła, a także porównanie zmodyfikowanego modelu podłoża z modelem Vlasova. Rozpatrzono zagadnienie obciążenia warstwy sprężystej, w której charakterystyki materiałowe są stałe na głębokości oraz zmienne w sposób liniowy (podłoże gradientowe), a także skokowy. Porównano przypadek obciążenia w kształcie koła, działającego na warstwę sprężystą i układ dwu warstw o sztywności zmiennej na głębokości.

## **Rozdział 8. DOBÓR PARAMETRÓW SZTYWNOŚCI**

W rozdziale rozpatrzono dobór parametrów sprężystości w celu wyznaczenia wartości przemieszczeń uwzględniając nieliniowość rozkładu modułu odkształcenia w zakresie małych i średnich odkształceń. Przedstawiono czynniki określające zależność naprężenie-odkształcenie w gruncie, sztywność początkową, wyznaczaną na podstawie pomiaru prędkości fali poprzecznej lub za pomocą kolumny rezonansowej, nieliniowy rozkład sztywności gruntu, możliwości aparaturowe określania sztywności ze względu na zakres odkształcenia, charakterystyki progowych stref odkształcenia, a także uwarunkowania rozkładu sztywności w zakresie małych i średnich odkształceń. Zaproponowano dobór reprezentatywnej wartości sztywności gruntu dla rozpatrywanego zakresu odkształceń.

## **Rozdział 9. PODSUMOWANIE I WNIOSKI**

W rozdziale przedstawiono podsumowanie oraz ogólne wnioski dotyczące rozwiązań ścisłych teorii sprężystości dla wybranych przypadków obciążenia warstwy sprężystej, weryfikacji i modyfikacji modelu podłoża Vlasova podłoża.

## **Załącznik 1. Modele matematyczne podłoża sprężystego**

W załączniku zaprezentowano i omówiono krótko 16 różnych i najistotniejszych znanych modeli matematycznych podłoża sprężystego, począwszy od modeli podłoża Winklera oraz modelu Kelvina-Voighta, przez model Maxwella i modele standardowe oraz dwu-, trzy- i wieloparametrowe modele podłoża, kończąc ostatecznie na modelu podłoża ziarnistego i bryłowego.

## **Załącznik 2. Rozwiązanie zagadnień teorii sprężystości**

W ostatnim załączniku przedstawiono szereg podstawowych rozwiązań teorii sprężystości w tym: zagadnienie Boussines'a, przypadek obciążenie na obszarze prostokąta i zagadnienia obrotowo-symetrycznego, półprzestrzeni sprężystej i warstwy sprężystej obciążonej równomiernie na powierzchni koła oraz ciała poprzecznie izotropowego.

Rozprawę kończy zestawienie nazwane:

**PRACE CYTOWANE W TEKŚCIE**, które zawiera 114 pozycji literaturowych.

## **5. Merytoryczna ocena rozprawy i uwagi ogólne**

## 5.1. Uwagi pozytywne

Recenzowaną pracę doktorską oceniam bardzo wysoko. **Sformułowane w pracy cele zostały moim zdaniem osiągnięte.**

Na wartość merytoryczną oceny mają wpływ następujące elementy:

- a) Tematyka rozprawy została trafnie dobrana – jest ciekawa z poznawczego punktu widzenia, a metody rozwiązywane zagadnienia naukowego są w dużym stopniu oryginalne.
- b) Przyjęty układ pracy jest logiczny oraz w sposób konsekwentny i jednoznaczny dokumentuje realizację założonego celu rozprawy. Rysunki i tabele są generalnie dobrze wyjaśniane w treści rozprawy.
- c) Przedstawiony w rozprawie przegląd literatury wyczerpuje istotne osiągnięcia dotyczące tematyki rozprawy.
- d) Przedstawione w rozprawie wnioski – szczegółowe w treści poszczególnych rozdziałów i ogólne sformułowane w jej podsumowaniu – dobrze potwierdzają realizację przyjętych celów i jednocześnie wskazują na pewien krytycyzm i dojrzałość badawczą Doktoranta, co świadczy o jego dobrym przygotowaniu do pracy naukowej i zrozumieniu trudnych i złożonych zagadnień mechaniki budowli.
- e) Doktorant zaprezentowała dobre rozeznanie stanu wiedzy w obszarze stanowiącym przedmiot rozprawy, wykazał się dużą biegłością w zakresie formułowania matematycznego opisu modeli podłoża oraz umiejętnością ich rozwiązywania.
- f) Doktorant wykazał także duże umiejętności i dużą sprawność w interpretacji, analizie i ocenie uzyskanych wyników badań.
- g) Na szczególne podkreślenie zasługuje duża biegłość Doktoranta w zakresie opanowania nowoczesnego narzędzia analizy matematycznej jakim jest system *Wolfram Mathematica*. Sam korzystałem z tego narzędzia w swojej pracy naukowo-badawczej i jestem pełen podziwu dla sprawności Doktoranta w operowaniu tym narzędziem badawczym w celu otrzymywaniu matematycznych formuł przedstawiających ściśle rozwiązania teoretycznie trudnych problemów formułowanych w rozprawie. Mogę zatem z całą stanowczością potwierdzić, że Doktorat w **rozprawa doktorskiej prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną w dyscyplinie oraz ma umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej**, co wyczerpuje pierwszy punkt Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. „Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce” Dz. U. 2018 poz. 1668 ze zm. Art. 187.
- h) Za najważniejsze oryginalne elementy rozprawy doktorskiej uważam realizację sformułowanych celów, którymi są:
  - Weryfikacja modelu podłoża Vlasova dla wybranych przypadków obciążenia warstwy sprężystej na podstawie rozwiązań ścisłych teorii sprężystości.
  - Modyfikacja modelu podłoża Vlasova, polegająca na:
    - a) uwzględnieniu przemieszczeń stycznych do powierzchni ograniczającej podłoże,
    - b) założeniu, że ośrodek gruntowy jest poprzecznie izotropowy,
    - c) założeniu, że charakterystyki materiałowe, są zmienne na głębokości warstwy.
  - Dobór parametrów sprężystości w zakresie małych i średnich odkształceń.
- i) **Stwierdzam więc, że przedmiotem rozprawy doktorskiej jest oryginalne rozwiązanie problemu naukowego**, co wyczerpuje drugi punkt Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. „Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce” Dz. U. 2018 poz. 1668 ze zm. Art. 187.

## 5.2. Uwagi krytyczne i dyskusyjne

Praca napisana jest generalnie bardzo dobrą polszczyzną w sposób precyzyjny i jeśli można tak powiedzieć o pracy naukowej, czyta się ją z dużą lekkością, a ja przeczytałem ją ponadto z dużym zainteresowaniem. Praca jest także starannie opracowana pod względem edytorskim.

Tym niemniej Autor nie ustrzegła się, z mojego punktu widzenia, pewnych drobnych usterek typu np.

- sformułowanie „zmiennie po głębokości warstwy” (str. 156.). Taki „żargon” nieco mnie razi i lepiej moim zdaniem napisać „na grubości warstwy”.
- We wzorze (2.3) występuje symbol  $\delta_{ij}$ , który nie jest opisany, itp.

Uwagi tego typu, jako nieistotne dla merytorycznej oceny rozprawy, zaznaczyłem w tekście otrzymanego przeze mnie egzemplarza i mogę ewentualnie przekazać je Autorowi dysertacji.

Ponadto, w ramach problemu dyskusyjnego, proszę Doktoranta o ustosunkowanie się do następującej uwagi:

Praca poświęcona jest w całości, mówiąc ogólnie, problematyce teoretycznego (matematycznego) modelowania podłoża gruntowego, ale zgodnie z przyjętym zakresem badań, dotyczy jedynie statycznych rozwiązań problemu. W tym zakresie praca doktorska przedstawia wszechstronnie przeanalizowane i przetestowane procedury ścisłych i przybliżonych metod rozwiązywania określonych w pracy problemów. Rozwiązania te zostały także w miarę możliwości poddane procedurze walidacji doświadczalnej z wykorzystaniem badań eksperymentalnych innych badaczy, których wyniki badań były dostępne w literaturze.

W rzeczywistości zarówno podłoża gruntowe jak i obiekty na nim posadowione posiadają masę oraz wykazują (w szczególności grunt) właściwości tłumiące. A co w przypadku obciążeń dynamicznych np. kinematycznego wzbudzania podłoża? Przecież trzęsienia ziemi, jako szczególny przypadek wymuszeń typu sejsmicznego, to w pewnych rejonach świata jedne z najistotniejszych problemów, które należy rozwiązać projektując posadowienie obiektów inżynierskich i budowlanych.

Moje pytania są następujące:

1. W jakim stopniu, zdaniem Doktoranta, przedstawiona w pracy metodologia może być w przyszłości kontynuowana w celu poszerzenia rozwiązań uzyskanych w rozprawie doktorskiej o analizy dynamiczne?
2. Co to jest tłumienie geometryczne i jak pod jego wpływem szacunkowo zmniejszają się amplitudy drgań wymuszonych harmonicznym wraz ze wzrostem odległości od źródła drgań w półprzestrzeni sprężystej, a jak na półpłaszczyźnie sprężystej?

## 6. Ocena końcowa

Rozprawa doktorska poświęcona jest aktualnej i istotnej z teoretycznego i praktycznego punktu widzenia problematyce analizy zmodyfikowanego modelu podłoża Vlasova. Doktorant jasno sformułował cele rozprawy. Przeprowadzone analizy stanowiły podstawę sformułowania oryginalnych wniosków szczegółowych i ogólnych. Przytoczone drobne krytyczne uwagi nie podważają istotnych, oryginalnych osiągnięć Doktoranta.

Uważam, że mgr inż. Mykola Nagirniak w przedstawionej rozprawie doktorskiej pt. „Modyfikacja modelu podłoża Vlasova” rozwiązał problem naukowy, co jest jego oryginalnym osiągnięciem oraz wykazał się ogólną wiedzę teoretyczną w dyscyplinie inżynieria lądowa, geodezja i transport oraz zaprezentował umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej.

W konkluzji stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr inż. Mikoli Nagirniaka spełnia prawne wymagania Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. „Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce” Dz. U. 2018 poz. 1668 ze zm. Art. 187.

Podsumowując:

1. Wnioskuje o przyjęcie rozprawy doktorskiej mgr inż. Mykoli Nagirniaka pt. „Modyfikacja modelu podłoża Vlasova” i o dopuszczenie do jej publicznej obrony.
2. Ponadto wnioskuję o wyróżnienie rozprawy doktorskiej mgr inż. Mykoli Nagirniaka pt. „Modyfikacja modelu podłoża Vlasova” ze względu na jej walory poznawcze jak i możliwości zastosowania w praktyce inżynierskiej

