

dr hab. inż. Waław Kuś

Gliwice, 6.01.2024

Katedra Mechaniki i Inżynierii Obliczeniowej

Wydział Mechaniczny Technologiczny Politechniki Śląskiej

ul. Konarskiego 18A, 44-100 Gliwice

## **Recenzja**

**praca doktorska mgr inż. Paulina Stempin**

**pt. „, Structural models in the framework of space-Fractional Continuum Mechanics”**

Podstawę opracowania oceny stanowi pismo z dnia 8.11.2023 Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport Politechniki Poznańskiej prof. dr. hab. Jacka Pielecha, nr RD/d/31/01/2023 wraz z załączonymi dokumentami.

### **1. Uwagi ogólne**

Opiniowana praca została wykonana w Politechnice Poznańskiej pod kierunkiem prof. dr hab. inż. Wojciecha Sumelki. Rozprawa doktorska dotyczy zastosowania mechaniki ośrodków ciągłych niecałkowitego rzędu do modelowania materiałów i struktur uwzględniających efekty nielocalne. Rozważano problemy w których widoczny jest efekt skali związany z długością charakterystyczną struktury wewnętrznej. Praca składa się z cyklu publikacji oraz ich omówienia. Publikacje jak również ich opis przedstawiają aktualny stan wiedzy oraz badania własne Autorki związane z opracowaniem sformułowań niecałkowitego rzędu dla wybranych typów elementów strukturalnych jak również weryfikacje wybranych modeli.

### **2. Przegląd treści rozprawy**

Praca doktorska składa się dokumentu (124 strony) zawierającego dodatek A: kopię pięciu publikacji, dodatek B: potwierdzenia współautorów udziału w przygotowania poszczególnych publikacji, streszczenia w języku polskim i angielskim oraz 23 stronicowego omówienia zakresu badań przedstawionych w publikacjach (w języku angielskim). Układ pracy jest

poprawny, rysunki zawarte w omówieniu jak i publikacjach są czytelne i ich liczba jest odpowiednia.

Omówienie publikacji podzielono na cztery rozdziały oraz bibliografię zawierającą 40 pozycji. W pierwszym rozdziale wprowadzono czytelnika w zagadnienia związane z ograniczeniami modelowania ciał odkształcalnych z użyciem klasycznej mechaniki ośrodków ciągłych, przedstawiono istotne ograniczenia metody związane z niejednorodnością rzeczywistych ciał oraz problemami związanymi z modelowaniem w skalach wielkości mikro i nanometrycznych. Autorka przedstawiła wybrane sformułowania nielokalne oraz uzasadniła konieczność prowadzenia badań związanych z ich rozwojem. W podrozdziale 1.2 Autorka przedstawiła problem badawczy poruszany w cyklu publikacji oraz sformułowała tezę: "The use of the fractional derivative introduces the non-locality into structural mechanical models, allowing to capture the scale effect", „Wykorzystanie pochodnej niecałkowitego rzędu wprowadza nielokalność do strukturalnych modeli mechanicznych, pozwalając na opis efektu skali". Podrozdział 1.3 listuje publikacje wchodzące w skład cyklu:

A.1 P. Stempin and W. Sumelka. Space-fractional Euler-Bernoulli beam model - Theory and identification for silver nanobeam bending. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2020, 186, 105902.

A.2 P. Stempin and W. Sumelka. Formulation and experimental validation of space-fractional Timoshenko beam model with functionally graded materials effects. *Computational Mechanics*, 2021, 68, 697-708.

A.3 P. Stempin and W. Sumelka. Dynamics of Space-Fractional Euler–Bernoulli and Timoshenko Beams. *Materials*, 2021, 14, 1817.

A.4 P. Stempin and W. Sumelka. Space-fractional small-strain plasticity model for microbeams including grain size effect. *International Journal of Engineering Science*, 2022, 175, 103672.

A.5 P. Stempin, T. P. Pawlak and W. Sumelka. Formulation of non-local space-fractional plate model and validation for composite micro-plates. *International Journal of Engineering Science*, 2023, 192, 103932.

Należy zwrócić uwagę, że wszystkie publikacje zostały opublikowane w czasopismach o wysokim i bardzo wysokim współczynniku cytowalności, w latach 2020-2023.

W podrozdziale 1.4 przedstawiono przegląd zawartości poszczególnych rozdziałów omawiających publikacje oraz przedstawiono bardzo pomocny graf (Rys. 1.4) wskazujący

na powiązania pomiędzy poszczególnymi metodami stosowanymi w pracy, obszarami ich stosowania oraz publikacjami wchodzącymi w skład cyklu.

W rozdziale drugim Autorka omówiła możliwość stosowania równań różniczkowych niecałkowitego rzędu jak również możliwość ich stosowania w zagadnieniach mechaniki ośrodków ciągłych. Zdefiniowano odkształcenia w opisie równań różniczkowych niecałkowitego rzędu oraz przedstawiono sformułowania dla belek oraz płyt stosowanych w wybranych zagadnieniach mechaniki.

W rozdziale trzecim przedstawiono wybrane wyniki związane z analizą wpływu parametrów równań mechaniki niecałkowitego rzędu na wyniki uzyskiwane podczas modelowania. Przedstawiono również porównanie wyników eksperymentalnych oraz uzyskanych z zastosowaniem opracowanego opisu.

W rozdziale czwartym podsumowano opracowane i stosowane przez Autorkę metody oraz obszary ich stosowań jak również stwierdzono, że postawiona teza została udowodniona.

W opisie publikacji wielokrotnie odwołano się do poszczególnych publikacji tworzących cykl. Opis jest zwarty i jest bardzo dobrym przewodnikiem po badaniach zrealizowanych przez Autorkę, których wyniki opublikowano w pracach A.1-A.5.

W pracy A.1, Autorka rozważała możliwość modelowania nanobelek z użyciem przestrzennego sformułowania niecałkowitego rzędu zmodyfikowanego sformułowania Eulera-Bernoulliego (s-FEBB). Analizowała wpływ parametrów na uzyskiwane rozwiązania oraz porównano wyniki z eksperymentem.

Praca A.2 rozszerza zagadnienia rozpatrywane w ramach A.1 poprzez dodanie sformułowania Timoszenki (s-FTB). Analizowano różnice otrzymywane w obu sformułowaniach oraz przedstawiono przykład numeryczny dla mikrobeleki wykonanej z polimeru SU-8.

Zagadnienia dynamiczne rozważano w pracy A.3 dla sformułowań s-FEBB oraz s-FTB oraz przedstawiono kolejne przykłady analiz nanobelek wykonanych z azotku galu (GaN).

W pracy A.4 rozszerzono sformułowania przedstawione w pracach A.1 i A.2 o materiały sprężysto-plastyczne.

Zagadnienia związane z modelowaniem płyt wraz z analizą parametrów równań niecałkowitego rzędu przedstawiono w pracy A.5.

Należy podkreślić, że publikacje powstały w ramach projektów finansowanych ze środków zewnętrznych.

### 3. Ocena merytoryczna

Rozprawa doktorska dotyczy problematyki badawczej z zakresu mechaniki ośrodków ciągłych w nowoczesnym sformułowaniu wykorzystującym nielokalne sformułowanie z wykorzystaniem równań różniczkowych niecałkowitego rzędu. Zasadniczym celem pracy było opracowanie nowych sformułowań dla zagadnień statyki i dynamiki belek oraz płyt. W pracach prowadzono analizy wpływu parametrów rozpatrywanych równań oraz dobór tych parametrów w celu odzwierciedlenia wyników eksperymentalnych. Podjęcie się realizacji tak postawionego zadania wymagało od Doktorantki zapoznania się zarówno z zagadnieniami mechaniki ośrodków ciągłych jak również z zaawansowanymi zagadnieniami matematyki. Doktorantka wykazała się umiejętnością prowadzenia interdyscyplinarnych badań.

Stwierdzam, że do istotnych i oryginalnych elementów pracy należy zaliczyć:

- opracowanie sformułowań przestrzennych niecałkowitego rzędu dla belek,
- opracowanie sformułowań przestrzennych niecałkowitego rzędu dla zagadnień dynamicznych,
- opracowanie sformułowań przestrzennych niecałkowitego rzędu dla materiałów sprężysto-plastycznych,
- opracowanie sformułowań przestrzennych niecałkowitego rzędu dla płyt,
- przeprowadzenie szerokiej analizy wpływu parametrów modeli na uzyskiwane wyniki,
- porównanie uzyskiwanych rezultatów z wynikami eksperymentalnymi pochodzącymi z literatury.

W trakcie lektury rozprawy nasunęły mi się następujące pytania, które mają charakter dyskusji i nie podważają wartości pracy doktorskiej:

- na ile dobrane parametry modeli są uniwersalne, jak zmiana geometrii np. nanobelki wpłynie na konieczność ponownego określenia parametrów modelu, czy istnieje jakaś graniczna zmiana wymiarów dla której parametry modelu będą dawały błędne wyniki (np. o rząd, dwa rzędy długości nanobelki) ?
- czy przedstawiony opis mógłby być zastosowany do opisu ciał wykonanych z materiałów porowatych czy też zawierających skomplikowanych kształtów mikrostruktury, tak, aby możliwe było określenie zachowania ciała w okolicach

pojedynczego poru lub fragmentu mikrostruktury, jeśli tak, to jak należałoby rozbudować przedstawione modele ?

- ponieważ w kierunkach dalszy badań została wspomniana metoda elementów skończonych, interesujące jest na ile zaprezentowane podejście wpłynęłoby na sformułowanie problemu, czy np. jeśli w siatce elementów skończonych byłyby elementy o geometrii znacznie różniących się długościami, czy konieczny byłoby dobór parametrów modeli dla każdego z takich zbiorów elementów ?

#### **4. Wniosek końcowy**

Pragnę stwierdzić, że mgr inż. Paulina Stempin wykazała umiejętność samodzielnego prowadzenia badań naukowych, a recenzowana praca doktorska spełnia warunki stawiane rozprawom doktorskim przez ustawę Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. 2023 poz. 742) z późniejszymi zmianami i wnoszę o dopuszczenie jej do publicznej obrony przed Radą Dyscypliny Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport Politechniki Poznańskiej.

#### **5. Wniosek o wyróżnienie pracy**

Wnoszę o wyróżnienie pracy ze względu na jej interdyscyplinarny charakter oraz bardzo duży zasięg wyników badań przedstawionych w renomowanych czasopismach, jak również opracowanie sformułowań, które mogą być podstawą dalszych szerokich badań w inżynierii lądowej, inżynierii mechanicznej oraz mikroelektronice.