

Katedra Mechaniki Budowli  
Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska  
Politechnika Gdańska  
ul. G. Narutowicza 11/12  
80-233 Gdańsk

## RECENZJA

**rozprawy doktorskiej mgr inż. Joanny NOWAK**

**pt. „Dwufazowe modelowanie i badania eksperymentalne tkanki ludzkiej z obrzękiem limfatycznym w zakresie diagnostyki właściwości hydromechanicznych”**

### 1. Podstawa opracowania recenzji

Niniejszą recenzję rozprawy doktorskiej mgr inż. Joanny Nowak pt. „Dwufazowe modelowanie i badania eksperymentalne tkanki ludzkiej z obrzękiem limfatycznym w zakresie diagnostyki właściwości hydromechanicznych”, wykonanej pod kierunkiem prof. dra hab. inż. Mariusza Kaczmarka, opracowano na podstawie uchwały Rady Dziedziny Nauk Inżynieryjno-Technicznych Uniwersytetu Kazimierza Wielkiego w Bydgoszczy z dnia 5.07.2023 oraz na zlecenie Przewodniczącego Rady Dziedziny dra hab. inż. Mieczysława Cieszko, prof. uczelni w piśmie z tego samego dnia.

### 2. Ogólna charakterystyka i struktura pracy

Przedstawiona do recenzji praca składa się z sześciu rozdziałów, części wstępnej zatytułowanej „Cel i motywacja pracy”, bibliografii oraz streszczeń w języku polskim i angielskim i liczy łącznie 133 strony.

Praca dotyczy istotnego problemu modelowania matematycznego tkanki biologicznej z obrzękiem limfatycznym w różnych stadiach choroby. Autorka przedstawia w niej rozważania teoretyczne oraz badania doświadczalne i numeryczne.

Na początku pracy znajduje się streszczenie w języku polskim i angielskim. Dalej Autorka przedstawia cel pracy i uzasadnia podjęcie tematu oraz formułuje hipotezy badawcze. Tutaj także przedstawia zakres dysertacji. W tej części dowiadujemy się jak dużym problemem medycznym jest obrzęk limfatyczny i jak ważne jest zrozumienie związanych z tym złożonych procesów hydromechanicznych zachodzących w tkankach biologicznych. Jednocześnie Doktorantka wskazuje jak trudną do modelowania ze względu na swoją

strukturę jest żywa tkanka. Stanowi to wprowadzenie do dalszych części pracy zawierających modele matematyczne, charakterystykę metod diagnostycznych stosowanych w leczeniu obrzęku limfatycznego, badań doświadczalnych oraz symulacji numerycznych zachowania mechanicznego tkanki z obrzękiem. Jednocześnie Autorka podkreśla znaczenie podjętych badań w inżynierii i medycynie.

Doktorantka do analizy wybiera dwie zewnętrzne warstwy tkanki ludzkiej – skórę i tkankę podskórną z obrzękiem limfatycznym. Do opisu tkanki podskórnej z obrzękiem proponuje wykorzystanie dwufazowego modelu ośrodka porowatego, nasyconego cieczą. W zakresie małych odkształceń tkanka opisana jest liniowym modelem porosprężystym Biot'a a w zakresie dużych odkształceń odpowiednim modelem nieliniowym zaproponowanym przez Borję. Pomija efekt lepkości, grawitację i siły bezwładności. Skóra opisana jest jednofazowym materiałem sprężystym. Na tej podstawie definiuje zagadnienie początkowo-brzegowe dla trzech metod diagnostycznych służących do oceny obrzęku limfatycznego tkanki i wykonuje odpowiednie symulacje numeryczne. Do analizy Doktorantka stosuje komercyjny system obliczeniowy oparty na metodzie elementów skończonych. Badania doświadczalne prowadzi na specjalnie przygotowanych fantomach o cechach odpowiadających tkance ludzkiej oraz *in vivo* na ludziach. Doktorantka przeprowadza także jakościową walidację proponowanych modeli odnosząc je do danych z doświadczeń oraz wyznacza pewne parametry materiałowe tkanek obrzękowych.

W rozdziale pierwszym Autorka pracy przedstawia obecny stan wiedzy dotyczący badanej problematyki oraz omawia podstawowe modele matematyczne wykorzystywane do opisu tkanek zdrowych i zestawia potrzebne parametry materiałowe. Także wskazuje na wady i zalety opisywanych metod diagnostycznych. Rozdział drugi zawiera sformułowanie modelu dwufazowego. W rozdziale trzecim przedstawione są metody pomiarowe stosowane w diagnostyce obrzęku limfatycznego oraz wyniki badań na fantomach i uzyskanych z badań *in vivo* z udziałem ludzi. Rozdział czwarty opisuje modele numeryczne i wyniki symulacji oraz analizę parametryczną. W rozdziale piątym Doktorantka podejmuje się dyskusji uzyskanych wyników oraz identyfikuje parametry materiałowe tkanki z obrzękiem. Przeprowadzone w pracy rozważania teoretyczne oraz badania doświadczalne i numeryczne pozwalają na sformułowanie, w rozdziale szóstym, wniosków końcowych, podsumowanie całości oraz nakreślenie kierunków dalszych badań.

W pracy zawarto także spis cytowanej literatury w postaci 105 pozycji polskich i zagranicznych.

### 3. Ocena rozprawy

Głównym celem pracy jest modelowanie matematyczne procesów hydrodynamicznych zachodzących w tkance ludzkiej z obrzękiem limfatycznym podczas diagnostyki medycznej z zastosowaniem modelu dwufazowego, przeprowadzenie badań doświadczalnych i numerycznych stanowiących bazę do oceny przydatności klinicznej proponowanych nowych metod i narzędzi diagnostycznych oraz identyfikacja parametrów materiałowych tkanki obrzękowej. Ponadto Autorka podejmuje próbę modelowania przebiegu testów diagnostycznych i analizy różnic w ich wynikach bazując na modelowaniu zachowania tkanki obrzękowej jako porowatego ośrodka dwufazowego wypełnionego płynem poddanego działaniu obciążenia generowanego przez urządzenia diagnostyczne. W tym wskazuje na znaczenie właściwości skóry i tkanki podskórnej, co pokazuje analiza parametryczna.

Oryginalne elementy pracy stanowią: 1) opracowane modele numeryczne dla trzech metod badań (fałdomierza, aparatu wgłębnikowego oraz systemu dwukomorowego), z wykorzystaniem dwufazowego modelu tkanki podskórnej z obrzękiem, w zakresie małych i dużych deformacji; 2) opracowana metodologia pomiarowa dla dwóch z trzech wymienionych wyżej metod badań (fałdomierza wraz z uchwytem do formowania fałdu oraz aparatu wgłębnikowego z funkcją montażu w uchwycie mobilnym) oraz 3) opracowanie i przeprowadzenie badań doświadczalnych *in vivo* z udziałem pacjentów w warunkach ambulatoryjnych oraz z wykorzystaniem fantomów z pianki poliuretanowej w testach laboratoryjnych.

Autorka wykorzystuje wyniki numeryczne uzyskane przy użyciu dwufazowego modelu tkanki podskórnej wraz ze sprężystą warstwą skóry, do interpretacji wyników doświadczalnych pochodzących z testów *in vivo*. Stosuje także analizę parametryczną, co jest dodatkowym atutem pracy, gdyż pozwala na ocenę jakościową uzyskiwanych rezultatów a następnie podejmuje się identyfikacji parametrów materiału tkanki obrzękowej. Jest to zadaniem trudnym, ale też ważnym, bo pokazuje możliwość określenia parametrów materiałowych tkanki ludzkiej z użyciem danych diagnostycznych w sytuacji dużej różnorodności osobniczej takich cech.

Ważnym aspektem przedstawionych badań naukowych jest uzyskana wiedza na temat ewolucji właściwości tkanki obrzękowej, zarówno skóry jak też tkanki podskórnej uzyskana dzięki zaproponowanemu modelowaniu. Doktorantka wykazuje ważną rolę, jaką w procesach

hydromechanicznych zachodzących w tkance z obrzękiem odgrywa przepuszczalność i sztywność tkanki podskórnej.

Istotnym wydaje się fakt, że pomimo wykazanych wad i ograniczeń zastosowania diskutowanych metod modelowania i pomiaru, uzyskane rezultaty mogą być pomocne w pełniejszym zrozumieniu mechanizmów zachodzących w tkance obrzękowej, z uwzględnieniem różnych stadiów zaawansowania schorzenia oraz przyczynić się do rozwoju tych i nowych metod pomiarowych wykorzystywanych w diagnostyce obrzęku limfatycznego. W tej kwestii Autorka wskazuje także kierunek potencjalnego rozwoju takich metod.

Uważam, że podjęcie tematyki poruszanej w pracy jest celowe i ma duże znaczenie poznawcze i praktyczne. Wpisuje się ono także w aktualne priorytety badań naukowych, tak medycznych jak i technicznych związanych z zastosowaniem inżynierii w diagnostyce medycznej, wspomaganiu leczenia oraz inżynierii tkankowej.

Przedstawiona przez Doktorantkę analiza jest kompleksowa. Zawiera rozważania teoretyczne, badania doświadczalne oraz modelowanie matematyczne i numeryczne. Podane rozwiązania są poparte obliczonymi numerycznie przykładami, a wyniki obliczeń odniesione do badań doświadczalnych, co stanowi rodzaj ich walidacji. Tutaj należy zwrócić uwagę, że walidacja jest szczególnie ważnym etapem modelowania numerycznego.

Praca jest merytorycznie poprawna a układ rozdziałów oraz ich treść dobrze służy czytelności i logice przeprowadzonych wywodów. Literatura dobrze nawiązuje do problematyki poruszanej w pracy. Jest ona związana głównie z problemami mechaniki, metod numerycznych i zagadnień medycznych dotyczących problemu tkanki z obrzękiem.

## **4. Uwagi krytyczne**

### *4.1. Uwagi ogólne*

- 1) Tkanki biologiczne charakteryzuje duża różnorodność osobnicza ze względu na parametry materiałowe. Jaki wpływ na przedstawione wyniki miałyby uwzględniony rozrzut parametrów materiałowych? Czy to badano lub zastanawiano się nad tą kwestią?
- 2) Jakie ograniczenie wprowadza użycie fantomu z materiału z pamięcią kształtu, gdy w modelowaniu pomijamy lepkość materiału?

- 3) Czy inny sposób modelowania kontaktu skóry z tkanką podskórną (z materiałem porowatym) miałyby szanse poprawić wyniki analiz numerycznych?
- 4) Przy opisie modelu numerycznego Doktorantka podaje ogólną liczbę elementów skończonych (strona 85). Wyszczególnia przy tym liczbę elementów czworobocznych, brzegowych, krawędziowych etc. Podaje także ogólny zakres ich wielkości, np. „maksymalny wynosi 5.55, a minimalny 0.0188” (strona 88).

Brakuje mi informacji jaka część układu jest dyskretyzowana przy użyciu jakich elementów z podaniem ich szczegółów, np. rząd elementu. Dlaczego dokonano takiego wyboru elementów? Jaka jest jednostka podanego wymiaru i których z wymienionych elementów te wartości dotyczą?

- 5) Czy przeprowadzono analizę zbieżności?
- 6) Jakie dokładnie warunki brzegowe założono w modelu numerycznym oraz jak zdefiniowano warunki symetrii? Które stopnie swobody elementów zablokowano (Rys. 47, zdaje się, pokazuje swobodne podparcie części układu, jednak nie opisano symetrii)?
- 7) Na stronie 81 Autorka pisze, że w systemie użytym do symulacji „*domyślnie można wybrać wartość całkowitą z przedziału 1-5*”. Co opisuje ta wartość? Stopień wielomianu interpolacyjnego? Dalej czytamy „*W prezentowanych symulacjach dla wybranych metod diagnostycznych, współczynnik ten wynosił 3, a tłumienie zostało zmniejszone poprzez dobór odpowiednio mniejszych kroków czasowych.*”

Jak było oceniane tłumienie numeryczne i na jakiej podstawie przyjęto odpowiednie parametry?

- 8) Na stronie 104 Autorka pisze: „*Z obliczeniowego punktu widzenia model bez skóry okazał się znacznie mniej stabilny niż model ze skórą i konieczne było dostosowanie względnej tolerancji solvera dla metody elementów skończonych. Generowane były mimo wszystko pewne zakłócenia widoczne w rozwiązaniach, zwłaszcza bliskich maksymalnym wartościom siły lub ciśnienia.*”

Na czym polegało to dostosowanie solvera? Z czego wynikała niestabilność obliczeniowa modelu i jakie działania podjęto, aby ją wyeliminować?

- 9) Na Rys. 38 przedstawiono zestawienie uśrednionych wartości siły z pomiarów fibrometrem. Z czego wynika fakt, że pianka miękka (S) charakteryzuje największa siła, a nie podobnie jak w poprzednich testach, najmniejsza?

- 10) Czy faldomierz będący produkcją własną jest wykonany/zaprojektowany przez lub z udziałem Autorki?
- 11) Czy na Rys. 33 przedstawiono wynik konkretnej analizy czy przykładowe użycie aproksymacji?
- 12) Autorka w pracy nie podaje szczegółów (np. numeru) zgody komisji bioetycznej.

#### 4.2. Uwagi szczegółowe

W tekście stwierdzono drobne błędy edycyjne oraz wymienione poniżej usterki:

- Rysunek 36 mógłby być lepszej jakości.
- Strona 69 – czy współczynniki  $\nu$  do wyznaczenia modułu Younga pianek przyjęto z literatury, jak czytamy w pracy z odwołaniem do pozycji [89]? Nie zgadza się bowiem przywołane nazwisko autora z odpowiednią pozycją bibliografii. Czy nie nastąpiło omyłkowe przesunięcie numeracji cytowań?
- Nazewnictwo zmiennych i parametrów powinno odzwierciedlać konwencję przyjętą w matematyce – czyli zasady mówiące jaką wielkość oznaczamy symbolem pochyłym a jaką prostym. Jednakże, w pracy Doktorantka oznacza te same zmienne niekonsekwentnie – czasami symbolem prostym a czasem pochyłym. Np. ten sam symbol we wzorach jest pochyły (gdyż pochodzi z edytora równań) a w tekście już prosty. Przykładem mogą być stałe Lamego na stronie 46; moduł  $E$ ; równanie 33; na stronie 118-119 –  $F_0$ , podobnie parametr  $M$ . Tutaj dodatkowo w równaniu 34 występuje oznaczenie  $Merf$ , które się nie pojawia w wyjaśnieniu, ale pojawia się samo  $M$ . Może zestawienie symboli pozwoliłoby uniknąć się takich błędów, a także poprawiłoby czytelność pracy w tym kontekście.
- Strona 123 – moduł Younga jest oznaczony jako  $E_s$ , gdzie „s” nie jest indeksem, a wydaje się, że powinno być odnosząc się do pozostałej części pracy.
- Doktorantka używa określenia „deformacje rezidualne”. W języku polskim powinno używać się określenia „deformacje rezydualne”.
- Pewna niekonsekwencja panuje też w nazewnictwie ośrodka porosprężystego, czasem jest to ośrodek/model *poro-sprężysty* a czasem *porosprężysty*?
- Razi także stosowanie określenia „zamodelować”. Raczej powinno się używać określenia „wymodelować”.

Wszystkie opisane powyżej uwagi nie umniejszają wartości merytorycznej przedstawionej rozprawy ani nie zmieniają pozytywnej opinii Recenzenta.

## **5. Podsumowanie i wniosek końcowy**

Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego. Ponadto wskazuje na dużą samodzielność Autorki w badaniach naukowych i analizie uzyskanych wyników, a także świadczy o bogatej wiedzy teoretycznej w zakresie podjętego tematu co dotyczy zagadnień mechaniki oraz metod numerycznych i doświadczalnych w dziedzinie nauk inżyneryjno-technicznych, w dyscyplinie inżynieria mechaniczna. Chociaż podjęta tematyka ma także charakter interdyscyplinarny, co zasługuje na szczególną uwagę. Dodatkowo Doktorantka dobrze prezentuje swój warsztat praktyczny, zwłaszcza w realizacji części doświadczalnej pracy. Wcześniejsze publikacje Autorki w międzynarodowych czasopismach naukowych, przywoływane w postaci cytowań, świadczą o tym, że prowadzone przez nią badania były już poddane krytycznej dyskusji w świecie nauki, co zasługuje na uznanie.

**Podsumowując stwierdzam, że opiniowana dysertacja spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim przez Ustawę 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.) oraz stawiam wniosek o dopuszczenie mgr inż. Joanny Nowak do publicznej dyskusji nad rozprawą.**