

Warszawa, dn. 05.07.2025 r.

Dr hab. inż. Paweł Baranowski, prof. WAT
Wydział Inżynierii Mechanicznej
Wojskowa Akademia Techniczna
ul. gen. Sylwestra Kaliskiego 2
00-908 Warszawa
Tel.: +48 261 837 275
E-mail: pawel.baranowski@wat.edu.pl



Recenzja
rozprawy doktorskiej
„Optymalizacja właściwości mechanicznych protezy stopy”
autorstwa mgr. inż. AGATY MROZEK - CZAJKOWSKIEJ

1. Podstawa opracowania

Podstawę opracowania stanowi umowa nr 0600/2025/101 podpisana przez Dziekana Wydziału Inżynierii Mechanicznej Politechniki Poznańskiej **DR. HAB. INŻ. BARTOSZA GAPIŃSKIEGO, PROF. PP** oraz dołączona do niej rozprawa doktorska, pt. „*Optymalizacja właściwości mechanicznych protezy stopy*” autorstwa **MGR. INŻ. AGATY MROZEK - CZAJKOWSKIEJ**. Promotorem rozprawy jest **DR HAB. INŻ. TOMASZ STRĘK, PROF. PP**, natomiast promotorem pomocniczym jest **DR INŻ. JAKUB K. GRABSKI**.

2. Omówienie treści rozprawy

Recenzowana rozprawa została napisana w języku polskim i ujęta na 113 stronach w 9 rozdziałach. Wykaz literatury obejmuje 81 pozycji związanych z problematyką rozprawy. Poszczególne rozdziały zatytułowano następująco:

1. Wstęp.
2. Anatomia i biomechanika stopy.
3. Chód – analiza z zastosowaniem metody elementów skończonych.
4. Protezy stóp.
5. Metamateriały auksetyczne.
6. Proces tworzenia modelu elementów skończonych oraz optymalizacja właściwości materiałowych w analizie biomechanicznej chodu.
7. Optymalizacja geometryczna protezy stóp.
8. Optymalizacja topologiczna protez z zastosowaniem metamateriałów auksetycznych.
9. Wnioski.

Pozostałe elementy nie ujęte w rozdziałach to: Streszczenie, Wykaz Symboli, Wykaz tabel, Wykaz rysunków oraz Literatura.

W Rozdziale 1 zawarto wprowadzenie do recenzowanej dysertacji, gdzie zawarto motywację, cel oraz tezę pracy; zawarto również krótki opis zawartości poszczególnych rozdziałów. Rozdział 2 stanowi omówienie podstaw teoretycznych związanych z anatomią stopy oraz biomechaniką chodu. W Rozdziale 3 Autorka prezentuje stan wiedzy dotyczący elementów kluczowych związanych z modelowaniem stopy w aspekcie symulacji procesu chodu: począwszy od utworzenia geometrii stosując rekonstrukcję rzeczywistych obrazów na podstawie obrazowania medycznego CT (ang. *Computed Tomography*) oraz MRI (ang. *Magnetic Resonance Imaging*), poprzez definicję właściwości materiałowych oraz kończąc na opracowaniu warunków początkowo – brzegowych. Następnie, w Rozdziale 4, przedstawiono dostępne na rynku komercyjne protezy, omówiono ich rodzaje, wymagania przed nimi stawiane oraz parametry mechaniczne i funkcjonalne. Przedstawiono również wybrane prace skupiające się na zagadnieniu optymalizacji protezy stóp. W Rozdziale 5, Doktorantka przedstawia charakterystykę metamateriałów auksetycznych oraz ich potencjalne zastosowanie w protetyce ortopedycznej. Rozdział 6 zawiera proces opracowania modelu numerycznego do symulacji chodu, bazującego na danych anatomicznych pozyskanych z wykorzystaniem technik obrazowania medycznego oraz danych biomechanicznych zarejestrowanych za pomocą systemów analizy ruchu. Szczegółowo przedstawiono etapy generowania geometrii na podstawie obrazów MRI, definiowania warunków brzegowych i przykładanych obciążeń, a także doboru parametrów materiałowych dla zastosowanych modeli tkanek. Tak opracowany model posłużył do przeprowadzenia optymalizacji w celu dopasowania wartości współczynników modeli materiałowych dla tkanki miękkiej stosując dwa algorytmy: algorytm genetyczny (GA, ang. *Genetic Algorithm*) oraz algorytm inspirowany zachowaniem wirusów (VOA, ang. *Virus Optimization Algorithm*). W kroku kolejnym, Autorka przedstawiła algorytm do automatycznego generowania płaskiego, parametrycznego modelu protezy stopy wraz z przygotowaniem pliku wsadowego do analiz numerycznych stosując solver obliczeniowy FEBio. Zaprezentowano również wyniki optymalizacji parametrów mechanicznych ww. modelu protezy stopy celem uzyskania najlepszej zbieżności dla przebiegu siły reakcji podłoża uzyskanej z modelu oraz z badań eksperymentalnych. Wszystko to ujęto w Rozdziale 7. Kolejny Rozdział 8 przedstawia proces definiowania parametrów optymalizacji topologicznej protezy stopy celem poprawy jej właściwości mechanicznych poprzez zmianę dystrybucji materiału oraz zastosowania materiałów o właściwościach auksetycznych. Ostatni rozdział oraz pozostałe rozdziały nie ujęte w spisie treści nie wymagają omówienia, a ich tytuły zawarto w poprzednim akapicie niniejszego punktu recenzji.

Mgr. inż. AGATA MROZEK - CZAJKOWSKA jest współautorem łącznie 9 prac zarejestrowanych w systemie Informacji Naukowej Politechniki Poznańskiej opublikowanych w czasopiśmie oraz materiałach konferencyjnych. Z tej listy publikacji 8 prac jest zarejestrowanych w bazie SCOPUS na dzień pisania recenzji. Dane naukometryczne Pani mgr. inż. Agaty Mrozek - Czajkowskiej to 59 cytowań z łącznym indeksem Hirscha równym 4 na dzień powstania recenzji (wg bazy SCOPUS). Dorobek publikacyjny w pełni spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim przez stosowną ustawę.

3. Pytania merytoryczne, kwestie do dyskusji oraz uwagi

Recenzent, po zapoznaniu się z przedłożoną rozprawą doktorską, zwraca uwagę na następujące kwestie merytoryczne związane z rozprawą:

1. W opinii Recenzenta jednym z głównych mankamentów rozprawy jest brak bezpośredniego odniesienia przeprowadzonych badań modelowych i eksperymentalnych stopy do zaproponowanej przez Doktorantkę procedury optymalizacji protezy stopy, co jest głównym celem niniejszej rozprawy. Cały proces opracowania modelu numerycznego stopy wraz z testami eksperymentalnymi celem oszacowania i korelacji parametrów materiałowych dla tkanki miękkiej są oryginalnymi i dość znaczącymi elementami pracy. Doktorantka na początku Rozdziału 7 stwierdza, że „zdefiniowany w środowisku FEBio model FEM stosuje zwalidowane w rozdziale szóstym warunki brzegowe i obciążenia”. Recenzent ma wątpliwości, czy zwalidowane warunki brzegowe i obciążenia dla jednego modelu można bezpośrednio przełożyć na inny model o nieco odmiennych parametrach mechanicznych. Nawet jeśli to jest prawidłowy zabieg, to czy wysiłek i czas włożony w przygotowanie modelu 3D stopy wraz z kolejnymi krokami był niezbędny, żeby te warunki zdefiniować i zastosować w modelu protezy? Czy nie „szybciej” byłoby po prostu rozpocząć od definicji i opracowania tych warunków bezpośrednio na modelu protezy z pominięciem modelu stopy? Co więcej, jeśli warunki początkowo – brzegowe były zaczerpnięte z modelu stopy, to tym bardziej zastanawiający jest brak porównania wyników dla modelu stopy i modelu protezy stopy – Doktorantka odnosi się wyłącznie do badań eksperymentalnych przy porównaniu przebiegów nacisku stopy.
2. W nawiązaniu do powyższej uwagi, w opinii Recenzenta autorka Dysertacji nietrafnie zdefiniowała cel i zakres pracy. Jak już wspomniano, dużą część recenzowanej Rozprawy stanowią badania eksperymentalne i badania modelowe stopy, co stanowi dość istotną zawartość merytoryczną całości, a tak naprawdę uzyskane z tych badań wyniki oraz wnioski nie mają bezpośredniego przełożenia na główny cel pracy dot. analizy wpływu parametrów mechanicznych protezy stopy. W kontekście powyższego, cel pracy mógłby brzmieć: „Ocena możliwości zastosowania algorytmów optymalizacyjnych do precyzyjnego określenia parametrów modeli numerycznych stopy i protezy stopy”. Idąc tym tokiem, tytuł rozprawy również powinien być zmieniony, uwzględniając również implementację procedur optymalizacyjnych do modeli stopy.
3. Jedno z kolejnych pytań, które nasuwa się po analizie Rozdziału 6, jest uwzględnienie w procesie tworzenia modelu stopy skanów z obrazowania 3D oraz stworzenie na tej bazie pełnego modelu trójwymiarowego stopy. Czy było to konieczne, skoro Autorka zastosowała uproszczony model stopy w płaszczyźnie strzałkowej? Przy procesie obrazowania można było wykorzystać tylko skany w tej płaszczyźnie i opracować na ich podstawie do modelu geometrycznego i numerycznego.
4. W Rozdziale 6 Autorka przechodzi do omówienia kolejnych etapów opracowania modelu parametrycznego protezy stopy. Następnie przedstawia wyniki prowadzonych analiz optymalizacyjnych w dwóch etapach: (1) optymalizacji parametrów modelu w celu dopasowania charakterystyki siły nacisku do przebiegu eksperymentalnego oraz (2) optymalizacja topologiczna w celu poprawy dystrybucji materiału poprzez zastosowanie metamateriałów o właściwościach auksetycznych. Tutaj również brakuje połączenia wniosków i wyników z dwóch etapów optymalizacji: parametrycznej i topologicznej. W opinii Recenzenta brakuje również obszerniejszej dyskusji nad optymalnymi kształtami z optymalizacji i ich przełożenia na ewentualne zastosowanie w rzeczywistym prototypie protezy.



5. Skan MRI przeprowadzono dla położenia stopy, które nie jest naturalnym położeniem stopy podczas swobodnego stania. Zauważalne jest to szczególnie na Rys. 6.3, gdzie widoczne jest odchylenie w stawie skokowym zapewne od położenia pacjenta w pozycji leżącej podczas realizacji skanowania MRI. Nasuwa się więc pytanie, czy otrzymane wyniki z symulacji chodu nie były obciążone zbyt dużym błędem i czy opracowany model poprawnie odzwierciedlał biomechanikę stopy podczas chodu?
6. Doktorantka od początku do końca rozprawy konsekwentnie opisuje opracowane modele numeryczne jako model FEM. Skrót FEM pochodzi od angielskiej nazwy dla Metody Elementów Skończonych (ang. Finite Element Method). Nie byłoby to rażące, gdyby recenzowana praca pisana była w języku angielskim, jednak pisząc rozprawę w języku polskim należałoby stosować przynajmniej sformułowanie typu „model MES”. Co więcej, w opinii Recenzenta lepszym i bardziej trafnym sformułowaniem byłby „model numeryczny stopy” lub „model numeryczny protezy stopy”. W tym kontekście tytuł Rozdziału 6 również powinien być zmieniony na P
7. W rozdziałach omawiającym aktualny stan wiedzy Doktorantka przedstawiła dość dokładną analizę literatury odnoszącą się do modelowania stopy, symulacji i optymalizacji protez oraz stosowanych modeli i parametrów dla materiałów użytych w ww. modelach numerycznych. Zestawienie modeli numerycznych stopy jest dobrym zabiegiem i ułatwia czytelnikowi ich analizę oraz pewne porównanie, natomiast z przedstawionego opisu i wymienionych czterech podejść do modelowania stopy nasuwa się wniosek, że w literaturze znaleźć można tylko te konkretne modele, co jak wiadomo nie jest prawdą.
8. Recenzent nie odnalazł w rozdziałach poświęconych symulacjom numerycznym informacji o zastosowanym module obliczeniowym do prowadzenia analizy MES. Tego typu zagadnienia, związane z odwzorowaniem i symulacją chodu, mogą być prowadzone stosując solwery komercyjne z modulem całkowania niejawnego i jawnego, jednak takiej informacji oraz parametrów samej analizy Autorka nie uwzględniła.
9. W tych samych rozdziałach Doktorantka stosuje nazwy rodzaju elementu skończonego wynikające stricte z zastosowanego kodu, np. C3D4 oraz C3D8. Dla osoby czytającej Dysertację ta nazwa nic nie mówi, dlatego należałoby zastosować nazewnictwo jasno wskazujące na rodzaj elementu oraz liczbę punktów całkowania (lub/i węzłów). Dodatkowo, ważnym zagadnieniem jest analiza wpływu gęstości siatki MES na uzyskane rozwiązania, którego problemu w ogóle nie podnosi Autorka. Na jakiej więc podstawie wytypowano tą konkretną wielkość elementu do prowadzonych badań symulacyjnych?
10. Na stronie 29, Doktorantka stosuje niepoprawne sformułowanie „zwrot energii”. Energia nie jest wektorem, nie ma więc kierunku ani zwrotu — z punktu widzenia fizyki jest ona wielkością skalarną. Prawdopodobnie chodziło o „oddawanie energii” lub „uwalnianie energii”.
11. Doktorantka stosuje na przemian sformułowanie „walidacja” i „weryfikacja” w kontekście opracowanych modeli numerycznych, np. na stronie 44 i 51. W opinii Recenzenta są to dwa odrębne etapy związane z oceną poprawności modelu, a zasadnicze różnice polegają na tym, że weryfikacja obejmuje sprawdzenie czy model matematyczny został prawidłowo zaimplementowany w kodzie numerycznym, natomiast walidacja polega na sprawdzeniu czy ten sam model odzwierciedla rzeczywistość z wystarczającą dokładnością.



12. Na stronie 70 Doktorantka napisała „*W związku z tym zoptymalizowano podobnie jak dla pięty współczynniki materiałowe dla tkanek miękkich obejmujących śródstopie (...)*”. Ostatecznie nie do końca jest jasne, jakie parametry Autorka zastosowała do modelowania tkanki miękkiej przy pięcie, a jakie dla tkanki miękkiej w obrębie śródstopia. Idąc dalej, nasuwa się kolejne pytanie, czy podzielono stopę (tkankę miękką) na dwa obszary: pięty i śródstopia, dla których nadano odrębne i zoptymalizowane parametry materiałowe.
13. W Rozdziale 7 na stronie 79 Autorka opisuje zakres zmian dla trzech parametrów geometrycznych modelu protezy stopy, jednak nie ma informacji na jakiej podstawie i skąd zaczerpnięto wartości minimalne oraz maksymalne? Czy pozyskano jest z literatury czy na bazie własnych badań? Podobnych informacji brakuje również w Rozdziale 8 (str. 92) dotyczących trzech badanych materiałów. Czy tego typu materiały stosowane są w protezycie? Jeśli tak, to w jakim zakresie i obszarze? Co więcej, przyjęta wartość dla modułu sprężystości wzdłużnej dla stali wydaje się być również za duża.
14. Zastanawiające są otrzymane wyniki z optymalizacji topologicznych przedstawionych w Rozdziale 8, gdyż jak to wspomniano na stronie 89 „*Celem optymalizacji jest znalezienie optymalnego rozkładu materiału w domenie, aby zminimalizować podatność (zwiększyć sztywność), jednocześnie spełniając ograniczenie objętości*”. W tym kontekście wydaje się, że jeśli sztywność zastosowanego materiału się różni, to rozkład materiału w domenie będzie inny. Dla stali, dla której $E = 230\,000$ MPa, uzyskano zbliżone rezultaty jak dla dwóch pozostałych materiałów o znacznie mniejszym Module Younga (np. Rys. 8.6 – Rys. 8.8). W opinii Recenzenta, dla tego przypadku w analizowanej domenie powinno być znacznie mniej materiału (struktury protezy) przenoszącej obciążenie. Co więcej, na Rys. 8.5 zaobserwować można znacznie inną dystrybucję materiału dla nylonu w porównaniu do onyxu i stali, pomimo, że Moduł Younga dla tego materiału oscyluje pomiędzy pozostałymi dwoma materiałami.

Recenzent zwraca uwagę na dość sporą liczbę błędów natury edycyjnej, językowej i stylistycznej. Wybrane błędy wymieniono poniżej:

1. Podwójne spacje lub brak spacji, np. na stronie 12.
2. Stosowanie kolokwializmów, np. „potężne” na str. 28.
3. Sporo błędów językowych / stylistycznych, np. „(...) *zmniejszyć, przyspieszyć*” (str. 20), „*modelowania modelu FEM*” i „*bardzo pomijalnie mała*” (str. 23). Więcej podobnych sformułowań można znaleźć na stronach: 25, 27, 29, 30 czy 37.
4. Momentami Autorka zastosowała czas teraźniejszy i przeszły przy omawianiu badań literaturowych, np. 26 str.
5. Na Rys. 3.1 wydaje się, że zastosowano niepoprawne odniesienie do literatury.
6. Zauważalny jest brak konsekwencji w stosowanych czcionkach na grafikach i wykresach zawartych w pracy. W niektórych przypadkach zastosowano czcionkę szeryfową, w innych bezszeryfową, a zdarzają się również rysunki, na których jednocześnie występują oba rodzaje czcionek, co negatywnie wpływa na estetykę i spójność opracowania. Dodatkowo występują rozbieżności w wielkości czcionek używanych do opisu osi i etykiet, co wpływa na odbiór treści. Niektóre grafiki nie są przygotowane z należytą starannością i mają niską jakość, np. Rys. 7.12 czy Rys. 7.14.



4. Ocena końcowa przedłożonej rozprawy

Wykonane przez Doktorantkę badania mogą być rozpatrywane jako nowatorskie, chociaż w pewnym zakresie bazują na rozwiązaniach i metodach stosowanych w literaturze, np. procedura utworzenia modelu stopy bazując na skanach MRI. Niemniej jednak, uzyskane wyniki patrząc całościowo mają duże znaczenie praktycznie w kontekście analizy oraz projektowania protez stóp. Pod względem merytorycznym Rozprawa jest na dość dobrym poziomie, pomimo wspomnianych wcześniej zastrzeżeń i uwag. Należy przy tym zwrócić uwagę, że gdyby Rozprawa przygotowana była na wyższym poziomie edycyjnym, estetycznym oraz graficznym, odbiór pracy przez czytelnika byłby z pewnością bardziej pozytywny.

Po zapoznaniu się z treścią rozprawy, Recenzent pragnie zwrócić uwagę na następujące mocne elementy pracy, które świadczą o poziomie merytorycznym i aspektach poznawczych wynikających z przeprowadzonych przez Doktorantkę badaniach eksperymentalnych, modelowych oraz symulacyjnych:

1. Opracowanie szczegółowego modelu geometrycznego stopy bazując na skanie laserowym oraz skanie MRI z wyszczególnieniem tkanki miękkiej oraz poszczególnych kości wchodzących w skład stopy. Na bazie zbudowanego modelu geometrycznego Doktorantka umiejętnie przeszła do etapu opracowania modeli numerycznych zastosowanych do późniejszych analiz stopy oraz protezy stopy.
2. Przeprowadzenie testów eksperymentalnych przy użyciu wglębniaka celem wyznaczenia i skorelowania parametrów materiałowych dla tkanki miękkiej.
3. Implementacja procedury optymalizacji do wyznaczenia i dopasowania parametrów modelu Ogden'a oraz Mooney'a – Rivlin'a dla analizowanej tkanki miękkiej. Zastosowanie tej samej procedury do parametrycznej analizy protezy stopy oraz oceny wpływu parametrów mechanicznych zaproponowanej geometrii protezy na uzyskaną odpowiedź w postaci siły nacisku stopy na podłoże.
4. Szczegółowe omówienie wpływu parametrów zastosowanej procedury optymalizacyjnej na otrzymywane wyniki. Dzięki temu czytelnik nie tylko jest w stanie ocenić wpływ samych zmiennych na otrzymane wyniki, ale również przestudiować wpływ parametrów numerycznych używanych w poszczególnych metodach optymalizacji.
5. Zastosowanie analitycznego podejścia do wyznaczenia parametrów i warunków początkowych do prowadzonych analiz numerycznych zarówno dla stopy oraz dla protezy stopy.

5. Wniosek końcowy

Przedstawiona Rozprawa doktorska spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim przez stosowną ustawę oraz mieści się w dyscyplinie naukowej Inżynieria Mechaniczne. Recenzent stawia wniosek o przyjęcie i dopuszczenie do publicznej obrony pracy MGR. INŻ. AGATY MROZEK – CZAJKOWSKIEJ.



Dr hab. inż. Paweł Baranowski, prof. WAT