

Kraków, 25.01.2024

Dr hab. inż. Krzysztof Karbowski, prof. PK
Politechnika Krakowska
Wydział Mechaniczny
Al. Jana Pawła II nr 37
31-864 Kraków

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Wiktorii Wojnarowskiej na temat:

„Model MES kości miednicy do analizy biomechanicznej”.

Promotor rozprawy doktorskiej: dr hab. inż. Sławomir Miechowicz, prof. PRz

Podstawa opracowania: zlecenie Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Rzeszowskiej im. Ignacego Łukasiewicza dr. hab. inż. Andrzeja Burghardta nr RM-530-32-02/2023 z dnia 19.12.2023 r.

1. OCENA UKŁADU ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

Przedstawiona do recenzji rozprawa zawiera 161 stron wraz z spisem treści oraz wykazem piśmiennictwa.

Pracę rozpoczyna **Wstęp**, w którym Autorka omawia m.in. ogólne zagadnienia biomechaniki. W ostatnim akapicie wymienia cel pracy.

W rozdziale **1. Podstawy anatomiczne i zagadnienia biomechaniczne** omówione zostały, kolejno:

- budowa anatomiczna obręczy miedniczej,
- układ mięśniowy,
- struktura kości miedniczej,
- budowa i własności mechaniczne tkanki kostnej,
- tkanka chrzęstna,
- biomechanika miednicy,
- biomechanika chodu

Na rys.1.9, przywołując monografię [126], zobrazowano fazy chodu. W fizjoterapii definiuje się fazy chodu (gait cycle, GC) na podstawie wytycznych Rancho Los Amigos Hospital gait laboratory (stosując angielskojęzyczną terminologię): faza podporu (Stance phase) i faza przeniesienia (Swing phase), wyróżniając w nich:

1. initial contact (0-2% GC),
2. loading response (2-10% GC),
3. mid stance (10-30% GC),
4. terminal stance (30-50% GC),
5. pre swing (50-60% GC),
6. initial swing (60-73% GC),
7. mid swing (73-87% GC),
8. terminal swing (87-100% GC).

- biomechaniczna analiza ruchu,
- analiza kinematyki ludzkiego ciała,
- optyczne systemy śledzenia ruchu,
- analiza kinetyki ludzkiego ciała,
- metody wyznaczania reakcji w stawach i sił mięśniowych.

Rozdział 2. Metoda elementów skończonych zawiera opisy następujących zagadnień:

- podstawy teoretyczne MES,
- etapy rozwiązywania problemu przy pomocy MES - Autorka zaznacza, iż model MES wymaga weryfikacji (sprawdzenie poprawności rozwiązania równań) oraz walidacji. Znajduje się tu m.in. takie stwierdzenie (s.34): „Walidacja natomiast jest procesem porównania rozwiązania MES z danymi doświadczalnymi, co pozwala sprawdzić, czy model numeryczny poprawnie odwzorowuje rzeczywiste zachowanie obiektu”.
- błędy w analizie MES,
- przykłady zastosowań MES w biomechanice.

Rozdział 3. Modelowanie numeryczne kości miednicy człowieka rozpoczyna opis przeprowadzonej kwerendy, w wyniku której zidentyfikowano 11 prac o tematyce zgodnej z tematem pracy doktorskiej. Następnie omówiono:

- programy komputerowe do analiz MES,
- model geometryczny struktur anatomicznych,
- właściwości siatki,
- właściwości materiałowe:
 - w tym miejscu chciałbym zwrócić uwagę na, wielokrotnie pojawiający się w pracy, termin „poziomy/odcienie szarości”, w kontekście analizy obrazów,

uzyskanych metodami tomografii komputerowej (TK). Obraz TK to, wbrew powszechnej opinii, nie jest „zdjęcie z tomografii komputerowej”, a jedynie uproszczona wizualizacja zrekonstruowanej funkcji pochłaniania promieniowania w danym przekroju. Co więcej, wizualizacja ta jest wykonywana z rozdzielczością 8 bitów (256 „odcieni szarości”), ale „obraz TK” jest zrekonstruowany z rozdzielczością 12 bitów (4096 poziomów kwantyzacji - patrz: okno wizualizacji TK oraz zakres jednostek Hounsfielda).

- na s.55 przedstawiono matematyczne zależności, łączące parametry wytrzymałościowe struktur kostnych z gęstością radiologiczną, uwidocznioną na obrazach, uzyskanych metodami TK;

- warunki brzegowe i obciążenia.

Rozdział ten kończy podsumowanie.

Rozdział 4. **Problematyka badawcza, cel i teza pracy** omówię w jednym z następnym rozdziałów recenzji.

Rozdział 5. **Koncepcja opracowania modelu** rozpoczyna opis części badawczej pracy.

Opisano założenia modelowe, w tym:

- „kości miednicy będą zbudowane z jednorodnego materiału o stałych własnościach mechanicznych” - co, w kontekście wcześniejszych uwag Autorki podkreślających, iż kość nie jest jednorodną izotropową strukturą oraz prezentującą wzory, łączące własności mechaniczne struktur kostnych z gęstością radiologiczną, jest zaskakujące! Oceniam to założenie, jako w znaczący sposób obniżające innowacyjność opracowanego modelu;
- „weryfikacja modelu zostanie przeprowadzona poprzez porównanie wyników numerycznych z wynikami badań Ricciego i in. [112]” - dlaczego z tym opracowaniem, które ukazało się w czasopiśmie Journal of Experimental Orthopaedics w formule open access? W wykazie czasopism MEiN - 20 pkt., IF 1.8; wg bazy Scopus, była to pierwsza publikacja naukowa autora korespondencyjnego (P.-L. Ricci), który do stycznia 2024 opublikował 4 prace;
- a co z walidacją modelu, o której Autorka pisze w rozdziale 2 ?

W pracy wielokrotnie występują stwierdzenia o „dokładnym odwzorowaniu”, „dokładnym monitorowaniu” itp. Chciałbym zauważyć, iż jest to praca w dyscyplinie inżynieria mechaniczna, w której pojęcie „dokładność” jest jasno zdefiniowane. W kontekście pomiaru

mówimy o wartości wielkości mierzonej i wartości błędu pomiaru (rozumianych łącznie - sama wartość wielkości mierzonej nie jest wynikiem pomiaru). W kontekście projektu wyrobu mówimy o tolerancji wykonania, czyli dopuszczalnym zakresie zmienności wymiarów.

Rys.5.1. - błędnie zacytowana literatura - jest [106], powinno być [112].

Używane są nazwy: „model referencyjny”, „model uproszczony”, „model weryfikacyjny” - czy to są synonimy dla „model weryfikacyjny”?

Rozdział 6. Opracowanie modelu numerycznego zawiera następujące treści:

- opracowanie modelu geometrycznego kości miednicy,
- model 3D kości miednicy na podstawie obrazowania medycznego:
 - na s.70 napisano „Do przeprowadzenia analizy porównawczej z wykorzystaniem MES na potrzeby tej pracy niezbędny był model geometryczny miednicy, podobny do tego z pracy [112]”. Co to znaczy „podobny”? Jeśli jedynie „podobny”, to jak wykonano weryfikację? Inna geometria implikuje inne wyniki;
 - s.72: „Jedną z podstawowych wad formatu STL jest jego duża nadmiarowość [...]. Efektem tego są degeneracje powierzchni modelu”. Format STL to jedynie sposób zapisu geometrii fasetkowej, utworzonej w programie typu CAD. Jeśli będzie źle zbudowana (spikes, self intersections, small holes itp.), to również będzie źle zapisana. Wspomniana nadmiarowość nie występuje w formatach PLY i OBJ. Natomiast STL odróżnia od formatów PLY i OBJ dodatkowa informacja, przypisana każdej fasetce - wektor normalny, wskazujący zewnętrzną powierzchnię definiowanej bryły (nb. błędna orientacja wektorów, to błąd charakterystyczny dla STL).
- modyfikacja geometrii oraz siatki trójkątnej:
 - Autorka opisuje model, który charakteryzował się obecnością złamania w obrębie prawej kości miedniczej. Aby usunąć tę wadę Autorka wykonuje szereg operacji geometrycznych w programach Meshmixer i SpaceClaim, w tym symetryczne odbicie prawidłowej anatomicznie geometrii (nb. podobne operacje geometryczne wykonywał autor referencyjnej pracy [112], gdyż również opracowywał patologiczną strukturę kości miednicy). A czy nie prościej było użyć wyników obrazowania TK miednicy bez wad anatomicznych?
 - s.74, akapit 1. od góry: „Zredukowano gęstość siatki, co miało na celu m.in. zmniejszenie wymaganej do przetworzenia modelu mocy obliczeniowej, a tym

samym poprawę efektywności pracy z modelem” - wymagana moc obliczeniowa to wyłącznie ograniczenie techniczne. Oczywiście praca z programem Ansys na własnym laptopie jest uciążliwa, ale program Ansys jest dostępny w ogólnopolskiej infrastrukturze superkomputerów PLGrid;

- s.74, ostatni akapit: „Format STL nie jest zalecany [...]. Wynika to z [...] wysokiego współczynnika kształtu elementów”. Wspomniany współczynnik to błąd geometrii nazywany „spike” i nie jest cechą formatu, o czym już wcześniej pisałem. Błędy geometrii fasetkowej należy naprawić przy użyciu programów takich jak np. Geomagic Wrap lub Autodesk Netfabb;

- konwersja modelu powierzchniowego do modelu bryłowego:

- - opisano konwersję STL - NURBS - STEP. Taka konwersja wprowadza kolejne błędy odwzorowania geometrii modelu;

- ocena dokładności wymiarowo-kształtowej:

- na rys.6.8 pokazano, mało czytelną” mapę błędów - porównano model bryłowy z modelem powierzchniowym NURBS - a co z STL, który był geometrią bazową?
- s.77, akapit 1.: „Odchylenia [...] osiągając wartość 0,742 mm” - rozdzielczość typowego badania TK miednicy to 0,9 mm x 0,9 mm x 1,2 mm. Jakie znaczenie mają 2 mikrometry wobec rozdzielczości pomiaru o dwa rzędy większej. Tak zapisane „błędy” (w szczególności błędy procentowe, podane z rozdzielczością do setnych części procenta, w sytuacji gdy błąd metody należy szacować na co najmniej kilka procent) występują również w dalszej części pracy;

- sposób tworzenia modelu geometrycznego,

- siatka elementów skończonych oraz własności materiałowe,

- s.81 - Autorka pisze „Podejście do wyboru właściwości materiałowych może być bardziej spersonalizowane, poprzez wykorzystanie medycznych danych obrazowych do określenia gęstości tkanki kostnej w różnych obszarach [...], co umożliwia uwzględnienie indywidualnych cech pacjenta”. Ale w następnym akapicie pisze: „Te dwie wielkości [moduł Younga i współczynnik Poissona] są wystarczające do pełnego zdefiniowania własności materiału tworzącego model” - uwagi nt. tego uproszczenia zawarłem we wcześniejszej części recenzji;

- wyznaczanie obciążeń w stawach:

- to ciekawy aspekt pracy, wykorzystujący sprzęt i oprogramowanie do śledzenia ruchu i wyznaczania na tej podstawie warunków brzegowych dla modelu numerycznego;
 - należy zwrócić uwagę, iż zastosowane oprogramowanie (AnyBody Modeling System), obliczające obciążenia miednicy, zostało użyte jak „czarna skrzynka”. Brak jest dyskusji o zastosowanych w nim metodach numerycznych oraz błędach symulacji;
- badania eksperymentalne;
 - obiekt badawczy;
 - przebieg badania;
 - badania symulacyjne;
 - analiza wyników;
 - Rys. 6.19 i kolejne, pokazujące cykl chodu - powinny zostać wskazane poszczególne fazy chodu, nie tylko podpór (stance) i przeniesienie (swing);
 - s.93, 1. akapit: „Można stwierdzić, że obciążenia wyznaczone przy pomocy modelowania mięśniowo-szkieletowego nie będą w znaczny sposób odbiegać od wartości rzeczywistych” - jaki jest błąd metody?
 - Rys.6.22 - „Pozycje A i B” - które to fazy chodu i dlaczego w nich wykonano obliczenia?
 - Rys.6.3. „LK” „PK” - czy to skróty od „Lewa Kończyna” „Prawa Kończyna” ?
 - obciążenia modelu - personalizacja danych;
 - warunki brzegowe;
 - podsumowanie - w którym Autorka pisze, iż przyjęła założenia upraszczające m.in.:
 - „kości [...] traktowane są jako ciała jednorodne o właściwościach izotropowych”,
 - „nie dokonano wyraźnego rozróżnienia między kością korową i gąbczastą [...]”
 - na powyższe uproszczenia zwróciłem już uwagę we wcześniejszej części recenzji.

W Rozdziale 7. **Symulacje numeryczne** opisano najważniejsze zagadnienia, będące tematem pracy. Rozdział ten zawiera:

- analizy porównawcze - w tym rys.7.1 i dalsze:
 - na rysunkach brakuje oznaczenia jednostek;
 - nie jest jasne, której kończyny dotyczą mapy naprężeń i odkształceń. Prawdopodobnie jest to wykres dla lewej kończyny, gdyż jeśli za rys.6.22

przyjmujemy, iż poz. A to faza „initial contact” oraz poz. B to „mid stance” stopy lewej, to w pozycji A widać wzrost naprężeń po stronie prawej, następnie w pozycji B naprężenia po stronie prawej spadają do stanu nieobciążonego i wzrastają naprężenia po stronie lewej;

- na s.104, w akapicie 2. Autorka porównuje wyniki własnych obliczeń z wynikami z pracy [112], zwracając uwagę, iż wyniki prac własnych wskazują większe wartości - „Niemniej jednak globalne rozkłady wydają się być podobne” - to nie jest ocena podobieństwa, gdyż nie zdefiniowano miary podobieństwa, a w kontekście planu badań, nie jest to weryfikacja modelu numerycznego (!). Natomiast na kolejnej stronie w akapicie 2.: „Na podstawie przeprowadzonej analizy stwierdzono, że opracowany model dobrze odwzorowuje globalne rozkłady naprężeń [...]” - stwierdzenie to stoi w sprzeczności z wcześniejszym;
- badanie zbieżności siatki (rys.7.4 i kolejne - uwagi takie jak do rys. 7.1);
- analiza wrażliwości modelu na zmianę wartości stałych materiałowych;
- symulacje dla obciążeń fizjologicznych:
- na rys.7.9 wskazano pozycje pacjenta w cyklu chodu, dla których wykonano obliczenia. Jakim fazom cyklu chodu odpowiadają te pozycje oraz dlaczego zostały wybrane do obliczeń?
 - rys.7.10 pokazuje rozkład naprężeń w pozycjach, wskazanych na rys. 7.9. Która kończyna rozpoczyna cykl? Przyjmując za rys.7.9, powinna to być kończyna lewa, co byłoby zgodne z występującymi naprężeniami: (a) - (e) - faza „stance”, (f) - (i) - faza „swing” stopy lewej;
- podsumowanie:
- „Odpowiedni dobór własności materiałowych ma istotny wpływ na rozkład naprężeń i odkształceń w modelu numerycznym kości miednicy” - wniosek jest oczywisty, ponadto użycie terminu „istotny” sugeruje wykonanie statystycznego testu istotności wpływu wielkości wejściowych - takiego testu nie przeprowadzono;
 - „Opracowany model pozwala na przeprowadzenie analiz, których wyniki stanowią przybliżenie rzeczywistego zachowania kości miednicy” - z jakim błędem !?
 - „Dokładne zbadanie wpływu obciążeń na strukturę miednicy, wymagałoby przeprowadzenia analiz numerycznych dla różnych pozycji statycznych [...], co byłoby zadaniem trudnym i czasochłonnym” - wcześniej w recenzji wspomniałem o obliczeniach w infrastrukturze PLGrid. Oczywiście, symulacje prowadzone na

laptopie z 8-rdzeniowym procesorem będą czasochłonne, ale przykładowy klaster Ares w ACK Cyfronet (wymieniony na liście TOP 500 superkomputerów) ma w każdym węźle obliczeniowym 24 rdzenie. To co lokalnie liczyłoby się przez miesiąc można na nim policzyć w ciągu jednej nocy ! Dostęp do infrastruktury PLGrid przez pracownika uczelni lub doktoranta wymaga jedynie zarejestrowania się i złożenia wniosku o grant obliczeniowy.

Rozdział 8. Spersonalizowany model MES kości miednicy - to podsumowanie prac naukowych, wykonanych przez Autorkę. W rozdziale opisano:

- opracowanie modelu:

- na rys.8.2 pokazano model kości miednicy, który powstał na podstawie segmentacji 361 obrazów TK (odległość przekrojów 1,25 mm), a następnie „[...] wygenerowano modele 3D brakujących struktur przy użyciu operacji boolowskich. Następnie, przeprowadzono naprawę, uproszczenie i ujednoczenie siatki trójkątnej”;
- w kontekście opiniowanej pracy, skaner tomografii komputerowej to przyrząd pomiarowy, który cechuje się rozdzielczością i dokładnością pomiaru - aspekty te w ogóle nie zostały omówione w pracy (sic!). Wcześniej w recenzji wspomniałem o tym, co to są obrazy uzyskane metodami TK. Matryca obrazów TK ma rozmiar 512x512 punktów i na niej obrazowana jest zrekonstruowana funkcja pochłaniania promieniowania w wybranym przekroju. A zatem rozdzielczość przyrządu pomiarowego, wyrażona w jednostkach długości, będzie zależna od zakresu pomiarowego (FOV - field of view). W typowym badaniu TK miednicy jest to 0,9 mm x 0,9 mm. Co więcej, krawędź kości jest „rozmyta”, co wynika z tak zwanego błędu podwójnej objętości (wewnątrz zrekonstruowanego woksela znajdują się tkanki o różnej gęstości radiologicznej). W programie 3D Slicer, użytym przez Autorkę do segmentacji obrazów, w module „Sandbox”, jest funkcja „Line Profile”, pozwalająca zobrazować profil HU. Można zobaczyć, iż zmiana „jasności” profilu na odcinku od tkanek miękkich do tkanek kości może przebiegać nawet przez 3 punkty obrazu. A zatem z pliku DICOM należy odczytać rozdzielczość w płaszczyźnie obrazu (tag „pixel spacing”) oraz odległość warstw (tag „slice”) oraz po wykonaniu analizy profilu na granicy kości, można oszacować niepewność pomiaru (dokładność odwzorowania skanera

TK jest okresowo sprawdzana poprzez analizę wymiarów zdigitalizowanego fantomu kalibracyjnego);

- Autorka wspomina o wykonaniu operacji boolowskich, naprawie, uproszczeniu i ujednoczeniu siatki trójkątnej - jaki wpływ na dokładności rekonstrukcji mają te operacje?
- rys. 8.4 - uwagi analogiczne, jak do wcześniejszych wykresów, pokazujących obliczone siły reakcji w cyklu chodu;

- symulacje numeryczne:

- rys.8.5 - zmiany naprężeń w cyklu chodu są niewielkie i występują w obszarach innych niż w wynikach wcześniejszych obliczeń;
- ciekawe i nieoczywiste wyniki odkształceń pokazano na rys.8.7 - niestety w tekście nie ma dyskusji na ten temat;

- podsumowanie, w którym na rys. 8.9 pokazano „Zintegrowane podejście biomechaniczne zastosowane do opracowania spersonalizowanego modelu MES”.

Rozdział 9. **Wizualizacja wyników MES** pokazuje zastosowanie kolorowego druku 3D do wizualizacji wyników symulacji. Można w tym miejscu zadać pytanie o koszty i przydatność zaproponowanego rozwiązania w praktyce klinicznej.

Podsumowanie i wnioski. Autorka przedstawia m.in. taki wniosek:

- „Model geometryczny na podstawie danych z obrazowania medycznego metodą rentgenowskiej tomografii komputerowej odzwierciedla rzeczywistą geometrię kości” - czy słowo „odzwierciedla” należy odczytywać tak, iż zrekonstruowany model jest podobny do rzeczywistego? Jeśli tak, to co jest miarą podobieństwa. W innym przypadku jest to wniosek przeczący podstawom teorii pomiarów - nie znamy i nie poznamy rzeczywistej wartości wielkości mierzonej, gdyż każdy pomiar jest obarczony błędem;

Rozdział kończy akapit opisujący propozycje dalszych badań.

Brak jednoznacznego odniesienia do tezy pracy.

Układ rozprawy doktorskiej oceniam pozytywnie.

2. OCENA ZASTOSOWANEGO PIŚMIENICTWA

W spisie literatury wymieniono 149 prac, w tym 95 (64%) ukazało się w ostatnich 10 latach. Ponadto zamieszczono odwołania do 7 stron internetowych.

Zamieszczono również opis przeprowadzonej kwerendy.

Zastosowane piśmiennictwo oceniam pozytywnie.

3. WSKAZANIE ORAZ OCENA CELU PRACY

Cel pracy został zdefiniowany następująco:

„Celem pracy było opracowanie zaawansowanego modelu obliczeniowego kości miednicy przy pomocy metody elementów skończonych. Głównym założeniem pracy było wykorzystanie danych uzyskanych dostępnymi metodami i technikami pomiarowymi w celu stworzenia modelu, który wiernie odwzorowuje skomplikowane zachowanie kości miednicy. Praca miała na celu wypełnienie istniejącej luki badawczej, skupiając się na potrzebie opracowania spersonalizowanego modelu MES kości miednicy. Opracowany model mógłby uwzględniać indywidualne cechy geometryczne jak również obciążenia dynamiczne generowane przez chód, specyficzne dla danego pacjenta”.

Co to znaczy, że model „wiernie” odwzorowuje skomplikowane zachowanie kości miednicy?

Sformułowano również tezę pracy:

„Zastosowanie zintegrowanego podejścia biomechanicznego, łączącego techniki medyczne, takie jak obrazowanie medyczne i analiza chodu, a także techniki inżynierskie, takie jak inżynieria odwrotna, śledzenie ruchu z wykorzystaniem Motion Capture, modelowanie numeryczne układu mięśniowo-szkieletowego oraz MES, pozwoli na stworzenie zaawansowanego i spersonalizowanego modelu numerycznego. Takie kompleksowe narzędzie może przyczynić się do rozwoju medycyny spersonalizowanej, a tym samym do doskonalenia diagnostyki i terapii związanych z układem mięśniowo-szkieletowym”.

Autorka znalazła „lukę badawczą”, którą jest brak spersonalizowanych modeli numerycznych kości miednicy. Zastosowanie metod obrazowania medycznego ma umożliwić opracowanie modelu geometrycznego struktur kostnych, natomiast metody „Motion Capture” będą narzędziem do określenia warunków brzegowych modelu MES.

Sformułowanie celu pracy oceniam pozytywnie.

4. WSKAZANIE ORAZ OCENA ZASTOSOWANYCH METOD BADAWCZYCH

W pracy zastosowano następujące metody i narzędzia badawcze:

- obrazowanie metodami tomografii komputerowej,
- oprogramowanie do analizy obrazów, uzyskanych metodami tomografii komputerowej (3D Slicer),
- oprogramowanie do komputerowego modelowania geometrii (SpaceClaim, Meshmixer),
- oprogramowanie do symulacji MES (Ansys),
- system Motion Capture (MVN Awinda),
- oprogramowanie do wyznaczania obciążeń kości miednicy (AnyBody Modeling System).

Zastosowane metody badawcze oceniam pozytywnie.

5. OCENA CZĘŚCI ROZPRAWY, DOTYCZĄCEJ OMÓWIENIA WYNIKÓW BADAŃ

Każdy z rozdziałów rozprawy, opisujących poszczególne etapy prac badawczych, kończy się podsumowaniem, czytelnie podsumowujących osiągnięte wyniki.

Wnioski końcowe mają charakter ogólny i odczytuję je jako komentarz do przedstawionego celu i zakresu pracy.

W pracy postawiono tezę - ale w podsumowaniu brak jednoznacznego odniesienia do jej treści.

Omówienie wyników badań oceniam pozytywnie.

6. INFORMACJE DOTYCZĄCE PRAKTYCZNEGO ZASTOSOWANIA UZYSKANYCH WYNIKÓW BADAŃ

Zaprezentowany spersonalizowany model numeryczny - a w zasadzie metoda przygotowania spersonalizowanego modelu numerycznego - jest ciekawym osiągnięciem naukowym. Niestety brak walidacji (lub pokazania metody walidacji) modelu powoduje, iż jego zastosowanie praktyczne może być jedynie uzupełnieniem metod diagnostycznych stosowanych w fizjoterapii.

7. INFORMACJE O NIEPRAWIDŁOWOŚCIACH W OCENIANEJ PRACY

Autorka pisze o konieczności personalizacji modeli numerycznych. Zaznacza, iż kości miednicy nie są jednorodne oraz izotropowe pod względem własności mechanicznych. Opisuje możliwości powiązania gęstości radiologicznej z parametrami wytrzymałościowymi kości. Ale w założeniach modelowych stwierdza, że „kości miednicy będą zbudowane z jednorodnego materiału o stałych własnościach mechanicznych” - czyli nie uwzględnią, postulowanej przez siebie, personalizacji modelu.

Modele geometryczne miednicy, wykonane na podstawie obrazowania metodami tomografii komputerowej zostały przygotowane bez analizy dokładności odwzorowania. Co więcej, Autorka we wnioskach stwierdza, iż „Model geometryczny na podstawie danych z obrazowania medycznego metodą rentgenowskiej tomografii komputerowej odzwierciedla rzeczywistą geometrię kości”, co przeczy podstawom teorii pomiarów.

Autorka zaznacza, że model numeryczny wymaga weryfikacji (sprawdzenia poprawności rozwiązania równań) oraz walidacji (porównania z wynikami eksperymentu).

Weryfikację stara się przeprowadzić przez porównanie z wynikami, opublikowanymi w jednej z prac naukowych - ale obliczenia prowadzi na innym modelu geometrycznym, niż użyty w badaniach referencyjnych.

Walidacja modelu w ogóle nie została przeprowadzona - więc nie wiadomo, czy model jest poprawny.

Program AnyBody Modeling System, będący fundamentem wyznaczania obciążeń modelu na podstawie analizy ruchu, został potraktowany jak „czarna skrzynka”. Nie wiadomo jaka jest dokładność wyznaczonych wartości obciążeń, a co za tym idzie warunków brzegowych modelu MES.

Autorka, ze względu na czasochłonność obliczeń numerycznych, wykonała jedynie ograniczoną liczbę symulacji numerycznych. Użycie klastra obliczeniowego umożliwiłoby uniknięcie tego problemu.

8. OCENA, CZY ROZPRAWA STANOWI ORYGINALNE ROZWIĄZANIE PROBLEMU NAUKOWEGO

Ustawa z dnia 20 lipca 2018 roku Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce w art.187, pkt 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”.

Oceniam, iż opiniowana rozprawa doktorska spełnia w/w wymagania ustawowe.

9. OCENA, CZY ROZPRAWA PREZENTUJE OGÓLNA WIEDZĘ TEORETYCZNA AUTORKI W DYSCYPLINIE INŻYNIERIA MECHANICZNA ORAZ UMIEJĘTNOŚĆ SAMODZIELNEGO PROWADZENIA PRACY NAUKOWEJ

Ustawa z dnia 20 lipca 2018 roku Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce w art.187, pkt 1: „Rozprawa doktorska prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną kandydata w dyscyplinie albo dyscyplinach oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej lub artystycznej”.

Oceniam, iż Autorka rozprawy doktorskiej spełnia w/w wymagania ustawowe.

10. WNIOSEK KOŃCOWY

Autorka przedstawiła oryginalne rozwiązanie problemu naukowego oraz wykazała, iż posiada wiedzę teoretyczną oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej.

W związku z powyższym stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr inż. Wiktorii Wojnarowskiej na temat „Model MES kości miednicy do analizy biomechanicznej” spełnia wymagania Ustawy z dnia 20 lipca 2018 roku Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. 2018 poz 1668, z późniejszymi zmianami) i wnoszę o dopuszczenie jej Autorki do publicznej obrony.

Krzysztof Karbowski