

dr hab. inż. Damian Krenczyk, prof. PŚ
Katedra Automatykacji Procesów Technologicznych
i Zintegrowanych Systemów Wytwarzania
Wydział Mechaniczny Technologiczny
Politechnika Śląska
ul. Konarskiego 18A
44-100 Gliwice

Gliwice, 04.03.2024r.

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Wiktorii Wojnarowskiej pt. „*Model MES kości miednicy do analizy biomechanicznej*”

Podstawa opracowania

Recenzję opracowano na podstawie pisma nr RM-530-32-03/2023
Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Rzeszowskiej,
dr. hab. inż. Andrzeja Burghardta, prof. PRz

Obszar problemowy i aktualność tematyki rozprawy

Podjęta w rozprawie tematyka dotyczy zagadnień związanych z biomechaniką, metodami obliczeniowymi w mechanice, modelowaniem numerycznym oraz prezentacją i wizualizacją wyników analiz MES. Doktorantka koncentruje się w szczególności na problemie zastosowania, do opracowania modelu numerycznego złożonych struktur anatomicznych, zintegrowanego podejścia, w którym dane pozyskiwane są z zastosowaniem różnych technik pomiarowych, zarówno obrazowania medycznego, jak i rejestracji danych kinematycznych przy pomocy systemu inercyjnego. Autorka rozprawy w swoich badaniach podjęła wysiłek doskonalenia stosowanych w tych obszarach metod komputerowych poprzez zastosowanie w praktyce obliczeniowej opracowanych modeli numerycznych – modeli spersonalizowanych, opartych na aktualnych danych, pozyskiwanych w procesie analizy od konkretnych pacjentów, redukujących dotychczas przyjmowane uproszczenia modelowe. Pozwoliło to na wykonanie analiz stanu naprężeń i odkształceń metodą elementów skończonych (MES) odpowiadających stanom rzeczywistym badanych przypadków. W konsekwencji wdrożenie do praktyki obliczeniowej metod tworzenia spersonalizowanych modeli MES, stanowiących swoistego rodzaju spersonalizowany model diagnostyczny, może przyczynić się do doskonalenia procesów diagnostycznych i planowania leczenia terapeutycznego pacjentów.

Nie ulega wątpliwości, że problemy w obszarze biomechaniki stanowią aktualne, często bardzo złożone i wielowymiarowe zadania badawcze i inżynierskie. Za odniesienie może tutaj służyć krótki przegląd liczby publikacji naukowych w bazie Scopus, związanych z zastosowaniem metody elementów skończonych w biomechanice, z którego wynika, że w ostatniej dekadzie liczba publikacji

JK

naukowych w tym obszarze rośnie i jest na wysokim poziomie. Jest to jeden z obszarów, w którym konieczne jest ciągłe udoskonalanie i implementacja praktyczna coraz bardziej zaawansowanych modeli obliczeniowych. Potrzeba ciągłego rozwoju w tym zakresie wynika z często podnoszonej w literaturze przedmiotu konieczności zapewnienia większej wiarygodności wyników poprzez odpowiedni proces pozyskiwania geometrii 3D, właściwości materiałowych oraz możliwie najwierniejszego odniesienia do obciążeń fizjologicznych przyjmowanych warunków brzegowych modelu, tak aby maksymalnie wyeliminować uproszczenia niekorzystne dla konfiguracji fizjologicznych. W tym zakresie Doktorantka, biorąc pod uwagę możliwość zastosowania zintegrowanego podejścia biomechanicznego łączącego dane zebrane przy pomocy różnych metod i technik, w tym obrazowania medycznego, analizy kinematycznej chodu oraz dynamiki odwrotnej, trafnie wskazuje na potrzebę prowadzenia badań nad spersonalizowanym modelowaniem numerycznym złożonych struktur, uwzględniających indywidualne cechy anatomiczne.

Reasumując, recenzowana praca koncentruje się na rozwiązywaniu problemów wybranych zagadnień mechaniki, w szczególności modelowania numerycznego systemów biomechanicznych oraz opracowaniem modeli spersonalizowanych, umożliwiających wykonanie analiz MES odpowiadających rzeczywistym stanom badanych przypadków. Podejmowane zagadnienia obejmują również aspekty rozwoju efektywnych metod wizualizacji wyników analiz numerycznych. Przedstawione w rozprawie zagadnienia oraz wspomniane obszary problemowe wpisują się także z powodzeniem w zidentyfikowaną przez Doktorantkę lukę badawczą, związaną z ograniczeniami badań wytrzymałościowych, czy metod stykowych w pozyskiwaniu danych geometrycznych w analizie MES w odniesieniu do diagnozowanych osób. Podobnie w odniesieniu do doboru warunków brzegowych – brakiem spersonalizowanego podejścia do przyjmowanych obciążeń. W tym kontekście Doktorantka prawidłowo formułuje cel pracy *jako opracowanie zaawansowanego modelu obliczeniowego kości miednicy przy pomocy metody elementów skończonych*, jak również *wypełnieniu istniejącej luki badawczej, skupiając się na potrzebie opracowania spersonalizowanego modelu MES kości miednicy, uwzględniającego indywidualne cechy geometryczne, jak również obciążenia dynamiczne generowane przez chód, specyficzne dla danego pacjenta*.

Wybór tematyki badawczej poruszanej przez Doktorantkę w przedstawionej do recenzji rozprawie uważam za uzasadniony, a omawiane w niej treści są aktualne. Przedstawione w rozprawie zagadnienia oraz wspomniane obszary problemowe mieszczą się w dyscyplinie inżynieria mechaniczna, a ich znaczenie i zastosowania mają charakter interdyscyplinarny – szczególnie w odniesieniu do inżynierii biomedycznej, czy medycyny. Prezentowane wyniki mogą mieć także znaczenie w definiowaniu obszarów przyszłych badań naukowych.

Ocena rozprawy i uwagi ogólne

Oceniana rozprawa liczy 161 stron, składa się z 9 rozdziałów, wstępu, podsumowania i wniosków oraz listy cytowanej bibliografii liczącej 156 pozycji, w tym 7 pozycji internetowych. Do rozprawy doktorskiej dołączono streszczenia w języku polskim i angielskim. Pracę uzupełniono także o wykaz ważniejszych skrótów i symboli.

W pracy można wyróżnić trzy zasadnicze części. Część pierwsza obejmuje krótki wstęp, teoretyczny opis podstawowych zagadnień rozpatrywanych w pracy (rozdziały 1 i 2), szeroki przegląd

literatury naukowej (rozdział 3) oraz opis problematyki badawczej, sformułowanie celu i tezy pracy (rozdział 4). We wstępie zwięźle przedstawiono zagadnienia badań własności mechanicznych elementów układu ruchu człowieka oraz krótko uzasadniono i określono motywację podjęcia tematyki badawczej. Autorka pracy prawidłowo wskazała na to, że stosowane obecnie modele numeryczne często bazują na uproszczonych założeniach, które z kolei mogą prowadzić do nadmiernych uproszczeń i błędnych wyników analizy numerycznej. W rozdziale 1 opisano podstawy anatomiczne i zagadnienia biomechaniczne, w szczególności zarys anatomii i biomechaniki wybranej do badań struktury anatomicznej – obręczy miednicznej. W przejrzysty sposób omówiono poszczególne jej składowe. Bardziej szczegółowo przedstawiono zagadnienia związane ze strukturą kości miednicznej, budową i własnościami mechanicznymi jej tkanek kostnych na różnych poziomach strukturalnych. Zaprezentowano, ważne z punktu widzenia dalszych rozważań, własności mechaniczne poszczególnych struktur, prezentujących wyniki prac badawczych w tych obszarach. Sporo uwagi poświęcono opisowi kluczowych dla opracowywanych modeli numerycznych zagadnień stanu obciążania przedmiotu badań. Doktorantka wskazała na kluczowe miejsca koncentracji obciążeń i dokonała krótkiego przeglądu literaturowego proponowanych modeli obciążeniowych wybranych stawów. W odniesieniu do zmienności przenoszonych obciążeń w zależności od faz cyklu chodu, poza kwestiami samej biomechaniki chodu, dużo uwagi poświęcono na kwestie biomechanicznej analizy ruchu, zarówno analizy kinematycznej ruchu i stosowanych w praktyce metod jego śledzenia, jak i analizy kinetyki wraz z przeglądem metody wyznaczania reakcji w stawach i sił mięśniowych. Trafnie wskazano na ich ograniczenia w odniesieniu do zakresu zastosowań i przydatności w modelowaniu numerycznym. Podniesione kwestie nabierają szczególnego znaczenia w odniesieniu do później zdefiniowanej luki badawczej i sformułowania celu pracy.

Rozdział 2 poświęcono na zwięźły opis podstaw teoretycznych MES oraz poszczególnych etapów analizy obiektu przy pomocy tej metody. Doktorantka wzięła tutaj pod uwagę kwestie interpretacji uzyskiwanych wyników, procesów weryfikacji oraz walidacji modelu, jak również dokładności obliczeń i błędy występujące na poszczególnych etapach. Rozdział kończy krótki przegląd możliwości zastosowania MES w biomechanice.

Rozdział 3 dotyczy zagadnień związanych z modelowaniem numerycznym kości miednicznej z zastosowaniem metody elementów skończonych. Opis poszczególnych zagadnień oparto na przeprowadzonej analizie literaturowej. Doktorantka omawia problem uzyskania, wymaganego w analizach MES, numerycznego modelu geometrii struktur anatomicznych. Opisano stosowane w praktyce metody odwzorowania geometrii fizycznych obiektów na modele cyfrowe oraz trafnie wskazano na ograniczenia w odniesieniu do pomiarów wykonywanych techniką stykową. W odniesieniu do struktur anatomicznych i możliwości wykorzystania wcześniej opracowanych modeli cyfrowych metodami stykowymi (czy ich modyfikacji), wskazano na istniejącą konieczność opracowania metodyki pozyskiwania geometrii spersonalizowanej. Kolejny podrozdział poświęcono na krótkie przedstawienie stosowanych typów elementów skończonych i ich parametrów. Autorka rozprawy ograniczyła się tutaj do stwierdzenia, że dobór typu elementów ma istotny wpływ na jakość i dokładność analizy MES w biomechanice, zwłaszcza w kontekście modelowania miednicy, a w praktyce wykorzystuje się zazwyczaj ich kombinacje, natomiast wybór odpowiednich typów elementów zależy od konkretnego badania, rodzaju struktury anatomicznej oraz celów analizy.

Zabrakło jednak tutaj głębszej analizy wybranych badań i sformułowania bardziej szczegółowych wniosków w odniesieniu do przyjmowanych założeń, czy uzasadnienia ich wyboru. Aspekty te zostały opisane w dalszej części pracy (rozdział 6.2), a słuszność ich wyboru wydają się potwierdzać uzyskane wyniki, jednak ich brak przed sformułowaniem celów badawczych może sprawiać wrażenie zbyt skrótowego potraktowania tych kwestii. Dużo uwagi poświęcono opisowi założeń dotyczących określenia właściwości materiałowych tkanek. Doktorantka zawarła w tym podrozdziale, bazując na wcześniejszych publikacjach, wartości parametrów materiałowych oraz opis metody ich szacowania empirycznego, bazującego na danych z obrazowania tomograficznego. Podkreśliła przydatność tej klasy metod do uzyskania spersonalizowanych modeli numerycznych geometrii struktur anatomicznych. Ważne kwestie, z punktu widzenia prowadzonych przez Doktorantkę badań, zawarto w podrozdziale dotyczącym przyjmowania warunków brzegowych i wartości obciążeń wybranej do badań struktury anatomicznej. Krytycznie odniesiono się do badań proponujących daleko idące uproszczenia w odniesieniu do przyjętych warunków obciążeniowych uwzględniających siły punktowe i przypadki statyczne, pomijające odzwierciedlenie złożonej dynamiki i zmienności obciążeń obserwowanych podczas typowych aktywności. Autorka rozprawy podnosi znaczenie wpływu specyfiki badanego problemu biomechanicznego przy doborze warunków brzegowych na dokładność i wiarygodność uzyskiwanych wyników z analizy MES. Identyfikuje również lukę badawczą w postaci braku w pełni spersonalizowanych podejść do przyjmowanych obciążeń i podkreśla konieczność doskonalenia metod pozwalających na realizację spersonalizowanych, precyzyjnych analiz uwzględniających zarówno dynamikę chodu, jak i indywidualne cechy anatomiczne, dające kompletny obraz zachowania przedmiotu badań w różnych sytuacjach biomechanicznych. Wskazuje ponadto na brak standardowego, jednolitego podejścia do sposobu określenia warunków brzegowych oraz własności materiałowych.

W rozdziale 4 sformułowano cele oraz tezę pracy, odpowiadające zidentyfikowanym lukom badawczym w odniesieniu do potrzeby opracowania efektywnego podejścia do modelowania numerycznego biomechanicznych systemów, w szczególności złożonych struktur, takich jak wybrana obręcz miednicza. Podano również zakres rozprawy doktorskiej.

Druga, bardzo obszerna część badawcza pracy (rozdziały 5 - 9), została przez Doktorantkę poświęcona sformułowaniu koncepcji opracowanego modelu wspierającego analizę biomechaniczną struktury kości miednicy, a także programowi oraz szczegółowemu opisowi realizacji badań własnych. Sformułowano (Rozdział 5) założenia modelowe oraz zaproponowano, do przeprowadzenia symulacji numerycznych, opracowanie trzech modeli: modelu bazującego na założeniach i danych pracy [112] (tzw. model weryfikacyjny), modelu bazującego na geometrii z pracy [112], lecz uwzględniającego obciążenia na podstawie badań własnych dla konkretnego pacjenta (tzw. model ogólny, częściowo spersonalizowany) oraz tzw. modelu spersonalizowanego, który poza obciążeniami dla konkretnego pacjenta korzystał z modelu geometrycznego, odzwierciedlającego jego indywidualne cechy anatomiczne. Zaproponowana koncepcja badań podporządkowana została możliwości osiągnięcia postawionego wcześniej celu pracy oraz wykazaniu słuszności przyjętej tezy badawczej. Zabrakło tutaj, szczególnie w kontekście przeglądu badań z rozdziału 3, uzasadnienia przyjętego uproszczenia w założeniach modelowych w odniesieniu do budowy kości miednicy jako zbudowanej z jednorodnego materiału o stałych własnościach mechanicznych.

Rozdział 6 zawiera szczegółowy opis procesu opracowania modelu numerycznego. W pierwszej części przedstawiono etapy tworzenia modelu geometrycznego 3D podporządkowane celowi analizy – modelu prawidłowego anatomicznie. Na podstawie analizy wniosków z publikacji naukowych z tego obszaru, prawidłowo dobrano kolejność działań oraz narzędzia informatyczne przydatne w kolejnych krokach. Wymagane procesy obejmowały m.in. automatyczną segmentację, modyfikację geometrii, generowanie brakujących struktur. Zaznaczono ważną kwestię dotyczącą konwersji modelu do modelu bryłowego oraz konieczność oceny dokładności wymiarowo-kształtowej. Część tę kończy opis proponowanego algorytmu postępowania z wyszczególnionymi procesami składowymi oraz narzędziami informatycznymi. Pewnym mankamentem tej części pracy jest niewystarczające w mojej ocenie, uzasadnienie uznania, że sposób konwersji modelu zapewnia odpowiednią dokładność odwzorowania geometrii, dla zidentyfikowanych (w procesie oceny dokładności wymiarowo-kształtowej) wielkości odchyłań. Uważam ponadto, że wkład własny Doktorantki powinien zostać lepiej wyeksponowany w tej części rozprawy. W kolejnej części, na podstawie analizy wniosków z publikacji naukowych, opisano sposób generowania siatki elementów skończonych na modelu geometrycznym, w tym doboru ich rozmiaru oraz własności mechanicznych poszczególnych elementów. Sformułowano tutaj ważne spostrzeżenia i wnioski dotyczące wpływu typu elementów i ich parametrów na stopień odzwierciedlenia rzeczywistej geometrii analizowanej struktury. Następnie szczegółowo przedstawiono badania własne, w tym badania eksperymentalne, poświęcone opracowaniu metody określenia obciążeń oddziałujących na kości miednicy w trakcie chodu. Zaproponowano metodę pomiarową pozwalającą na analizę chodu w warunkach zbliżonych do naturalnych (poza środowiskiem laboratoryjnym), umożliwiającą pozyskanie zindywidualizowanych danych kinematycznych. Dane te wykorzystano w badaniach symulacyjnych w procesie modelowania numerycznego układu mięśniowo-szkieletowego. Następnie, z wykorzystaniem dynamiki odwrotnej, wygenerowano wymagane parametry biomechaniczne, w tym przebiegi sił reakcji w stawach. Uzyskane wyniki zostały porównane z danymi pochodzącymi z innych publikacji naukowych z tego obszaru, co pozwoliło na potwierdzenie trafności zastosowanej metody numerycznej. Rozdział kończy opis przyjętych warunków brzegowych. Badania prowadzone w tej części pozwalają na uzyskanie nowej wiedzy w omawianym obszarze i w mojej ocenie stanowią jedno z najważniejszych osiągnięć Doktorantki.

Rozdział 7 poświęcono opisowi porównania wyników przeprowadzonych symulacji numerycznych z wykorzystaniem modelu uwzględniającego obciążenia wyznaczone z zastosowaniem proponowanej przez Doktorantkę (rozdział 6) metody oraz obciążeń z pracy [112]. Należy podkreślić szczegółową i obszerną dyskusję wyników symulacji oraz analizę przyczyn zidentyfikowanych różnic. Dyskusja ta prowadzi Autorkę rozprawy do stwierdzenia, że opracowany model dobrze odwzorowuje globalne rozkłady naprężeń. Trafnie wskazano ograniczenia metody i konieczność dalszego doskonalenia modelu w odniesieniu do wyznaczanych naprężeń lokalnych w wybranych obszarach, czy koncentracji naprężeń w obszarach nieuruchomienia. Sformułowano w tym miejscu także ważne spostrzeżenia i wnioski dotyczące zróżnicowania obciążenia działającego na układ mięśniowo-szkieletowy podczas ruchu. Dyskusyjne w mojej ocenie, w odniesieniu do przyjętych obciążeń dla modeli weryfikacyjnego oraz ogólnego (częściowo spersonalizowanego) jest formułowanie wniosków w odniesieniu do niewystarczającego w opinii Autorki *korzystania z tych samych warunków*

obciążenia dla różnych osób w analizach (str. 105/106). Czy nie należało w tym przypadku, w modelu ogólnym *znormalizować* wartości obliczonych obciążeń fizjologicznych, uwzględniając stosunek ciężaru ciała z pracy [112] i przeprowadzonych badań eksperymentalnych (62 vs 78 kg)? Podobnie, nasuwa się pytanie o nieuwzględnienie w porównaniach modelu ogólnego obciążonego jedynie siłami reakcji w stawach biodrowych. W kolejnych podrozdziałach opisano wyniki badania zbieżności siatki oraz analizy wrażliwości modelu na zmianę wartości stałych materiałowych. Na podkreślenie zasługują kompleksowość przeprowadzonych badań i kończące ten rozdział wyniki przeprowadzonych symulacji dla obciążeń fizjologicznych dla 9 statycznych pozycji w cyklu chodu.

Rozdział 8 przedstawia kolejne etapy tworzenia modelu, symulacje numeryczne oraz analizy łączące wszystkie zaproponowane przez Doktorantkę techniki, m.in. w procesach analizy chodu, modelowania MSK, akwizycji danych obrazowych, ich segmentacji czy modyfikacji modelu geometrycznego. Do opracowania modelu geometrycznego wykorzystano tutaj serię obrazów DICOM, natomiast rejestrację danych kinematycznych wykonano w badaniach eksperymentalnych z użyciem systemu Motion Capture. Symulacje numeryczne wykonano ponownie (jak w rozdziale 7.4) dla 9 pozycji w cyklu chodu. Wyniki odniesiono i porównano z uzyskanymi dla modelu ogólnego. Podobnie jak w przypadku poprzedniej części pracy uważam, że chociaż dyskusja wyników jest obszerna i ciekawa, to zabrakło w niej odniesienia do różnic ciężaru ciała badanych osób i ich wpływu na obserwowane różnice w wynikach. W podsumowaniu tego rozdziału zaprezentowano w postaci czytelnego schematu zbiór technik i metod cząstkowych składających się na proponowane przez Doktorantkę rozwiązanie postawionego problemu opracowania spersonalizowanego modelu MES z wykorzystaniem zintegrowanego podejścia biomechanicznego.

Ostatni w tej części pracy, rozdział 9 dotyczy zaproponowanej przez Doktorantkę formy wizualizacji wyników analizy MES z zastosowaniem barwnych modeli fizycznych, wykonanych technikami wytwarzania przyrostowego. Proces wykonania barwnych modeli obejmował dopasowanie tekstury do modelu cyfrowego, przygotowanie modelu do druku oraz barwny druk 3D.

Trzecia część rozprawy obejmuje podsumowanie i sformułowanie wniosków końcowych. Doktorantka, odnosząc się do uzyskanych wyników badań stwierdza, że zastosowanie do opracowania modelu numerycznego kości miednicy technik medycznych, inżynierskich, w tym analizy MES, stanowi kompleksowe podejście biomechaniczne do rozwiązywania skomplikowanych problemów medycznych oraz pozwala na utworzenie zaawansowanego, spersonalizowanego modelu, a zaproponowana w pracy metoda analizy danych i walidacji jej wyników może być podstawą do opracowania spersonalizowanego modelu diagnostycznego. Formułuje ponadto szereg wniosków dotyczących wyników przeprowadzonych badań oraz propozycje przyszłych prac badawczych w omawianym obszarze.

Reasumując, uważam, że kompozycja rozprawy, układ rozdziałów i podrozdziałów są poprawne oraz podporządkowane postawionemu i konsekwentnie zrealizowanemu przez Doktorantkę celowi. Lista cytowanych źródeł literaturowych obejmuje pozycje istotne i aktualne. Strona edycyjna pracy jest na bardzo wysokim poziomie.

Oryginalne osiągnięcia rozprawy

W swojej pracy Doktorantka poszukuje odpowiedzi na postawiony problem naukowy, dotyczący opracowania efektywnego podejścia do modelowania numerycznego biomechanicznych systemów, w szczególności struktur anatomicznych, pozwalającego na tworzenie spersonalizowanych modeli cyfrowych opartych na danych pacjentów. Identyfikuje luki badawcze oraz odpowiadające im braki. Odpowiedzią na postawiony problem badawczy, są:

- Opracowany sposób modelowania struktur anatomicznych uwzględniających indywidualne cechy anatomiczne pacjenta, bazujący na kompleksowym podejściu biomechanicznym z zastosowaniem, do opracowania spersonalizowanego modelu numerycznego, technik medycznych, takich jak: obrazowanie medyczne, analiza chodu, a także technik inżynierskich obejmujących inżynierię odwrotną, modelowanie numeryczne układu mięśniowo-szkieletowego i analizę MES.
- Zaproponowany sposób postępowania w procesie tworzenia prawidłowego anatomicznie modelu geometrycznego 3D, obejmujący m.in. automatyczną segmentację, modyfikacje geometrii oraz generowanie brakujących struktur, wraz z dobranymi narzędziami informatycznymi.
- Zaproponowany sposób generowania siatki elementów skończonych na modelu geometrycznym, w tym doboru ich rozmiaru oraz własności mechanicznych poszczególnych elementów wraz ze sformułowanymi spostrzeżeniami i wnioskami dotyczącymi wpływu typu elementów i ich parametrów na stopień odzwierciedlenia rzeczywistej geometrii analizowanej struktury.
- Badania eksperymentalne analizy chodu w warunkach zbliżonych do naturalnych, poświęcone opracowaniu metody określenia obciążeń oddziałujących na kości miednicy w trakcie chodu, pozwalającą na pozyskanie zindywidualizowanych danych kinematycznych.

Uwagi szczegółowe

Poza uwagami natury ogólnej i dyskusyjnej, zawartymi w poprzednich częściach recenzji, można sformułować następujące uwagi szczegółowe:

- Rozdział 5, str. 66 – na rys. 5.1. w odwołaniach do pozycji literaturowych podano błędne numery pozycji *Ricci i in. 2018*.
- Podrozdział 7.2, str. 107 - 108 – jak wartości naprężenia maksymalnego z tabeli 7.1 dla rozmiaru ES 1,2 mają się do wartości pokazanych na rys. 7.4b) (247MPa / ~190 MPa)?
- W podrozdziale 3.4 wskazano na to, że własności mechaniczne kości w pracy [47] zostały określone na podstawie poziomu szarości obrazów uzyskanych metodą TK a takie podejście umożliwia uwzględnienie zróżnicowania własności tkanki. Praca [47] nie została jednak uwzględniona w zestawieniu parametrów materiałowych w tab. 3.4.
- Podrozdział 6.3.2.3. – wyjaśnienia wymaga różnica wartości siły reakcji w stawie w pozycji B uzyskanych w symulacjach przedstawionych na rysunku 6.22 (lewy staw biodrowy) z wartościami podanymi w tab. 6.3 w wierszu „Staw biodrowy” (Poz. B LK).
- Podrozdział 7.2, str. 110 – wyjaśnienia wymaga dla jakiej wartości rozmiaru ES uzyskano zaprezentowane wartości wybranych wskaźników jakości siatki (tab. 7.2).

Podsumowanie i wniosek końcowy

Przedstawione w niniejszej recenzji uwagi mają głównie charakter dyskusyjny i nie podważają mojej pozytywnej oceny rozprawy. Na podstawie powyższej, szczegółowo uzasadnionej oceny, stwierdzam, że przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska stanowi oryginalne rozwiązanie aktualnego problemu naukowego, natomiast podejście Autorki do zagadnień prezentowanych w pracy, sposób wyłożenia materiału, prowadzonych badań i opisy uzyskanych rezultatów dowodzą, że rozprawa doktorska prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną kandydatki w dyscyplinie naukowej inżynieria mechaniczna, jak również umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej.

Uważam, że opiniowana rozprawa mgr inż. Wiktorii Wojnarowskiej pt. „*Model MES kości miednicy do analizy biomechanicznej*” spełnia warunki stawiane przez ustawę ustawy Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce z dnia 20 lipca 2018 r., w odniesieniu do rozpraw doktorskich (Dz.U. z 2023 r. poz. 742 z późniejszymi zmianami). Wnioskuje o dopuszczenie jej Autorki do obrony.

Damian Kuciel