

Prof. Tomasz Łodygowski
Politechnika Poznańska
tomasz.lodygowski@put.poznan.pl
tel.: +48 691 978 943

Poznań, 12 lipca 2023

Opinia na temat rozprawy doktorskiej
pana mgr. inż. Adriana Wita
pt.: „Analiza stanu obciążenia kości udowej człowieka w cyklu normalnego chodu
z wykorzystaniem metody elementów skończonych”.

1. Podstawa opracowania

Podstawą niniejszej recenzji jest prośba Przewodniczącego Rady Dyscypliny Nauki Fizyczne (AGH) Pana Prof. dr. hab. Janusza Wolnego o zaopiniowanie przedmiotowej rozprawy doktorskiej. Wraz z prośbą otrzymałem wydrukowany egzemplarz pracy pana mgr. Wita oraz zestaw dokumentów formalnych.

2. Uwagi ogólne na temat rozprawy

Podjęta tematyka rozprawy dotyczy problemu biomechanicznego, analizy obciążenia kości udowej człowieka i jest zgodna z kierunkami badań dyscypliny naukowej Nauki Fizyczne uprawianej na Wydziale Fizyki i Informatyki Stosowanej Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie. Problem oceny stanu obciążenia kości udowej nie jest łatwy i wymaga zbudowania całej serii modeli numerycznych a także sprzężenia otrzymanych wyników z badaniami eksperymentalnymi, a tym samym dokonania oceny przydatności poszczególnych modeli. W klasycznych zadaniach modelowania procesów termo-mechanicznych można relatywnie łatwo zweryfikować poprawność zastosowanych modeli konstytutywnych, czy też dobierania stosownych parametrów. Zgoła inaczej jest z tak zaawansowanymi problemami inżynierii biomedycznej czy biomechaniki z jakimi przyszło się zmagać Doktorantowi. Tu nawet nieliczne badania eksperymentalne tylko w niewielkim zakresie mogą zweryfikować poprawność przyjmowanych złożonych modeli matematycznych (numerycznych). Wynika to z faktu, że przyjmowane modele fizyczne materiałów (kości, mięśni, ścięgien) są wieloparametrowe. Trudności potęgowane są jeszcze przez przyjmowanie uproszczonej często geometrii, a na dokładność oceny wpływa też sposób dyskretyzacji (gęstość siatki, typy przyjętych elementów skończonych). Choćby te wymienione powyżej złożoności świadczą o podjęciu przez Doktoranta ambitnego i niebanalnego zadania.

Rozprawa pana dr. Wita składa się z pięciu rozdziałów, zawiera Podsumowanie, Spis cytowanej bibliografii oraz Spis rysunków – łącznie 176 stron.

Rozdział pierwszy poświęcony jest przybliżeniu podstawowej wiedzy z anatomii człowieka, w szczególności układowi kostnemu i mięśniowemu. Omówiono między innymi cykl chodu człowieka, model reologiczny mięśnia, właściwości sprężyste mięśni i ścięgien oraz budowę tkanki kostnej.

W rozdziale drugim Autor skoncentrował się na przybliżeniu środowiska obliczeniowego OpenSim, w którym można zbudować model kończyny, modele stawów i model układu mięśniowego oraz przeprowadzić procedurę obliczeń kinematycznych i dynamicznych. Wyniki tego rozdziału posłużyły Autorowi między innymi do racjonalnego doboru danych, wykorzystywanych w kolejnych częściach pracy nad doskonaleniem modelu obliczeniowego.

Kolejny rozdział zawiera detaliczne studium nad przygotowaniem skończonego elementowego modelu belkowego kończyny dolnej. Zawiera kilka uwag wprowadzających do stosowanej w dalszej części pracy metody elementów skończonych i środowiska obliczeniowego jakim jest program ABAQUS. Budowa modelu prawej kończyny dolnej z zastosowaniem technologii MES wymagała odwzorowania modelu kostnego, modelu mięśniowego, przyjęcia sprężysto-kurczliwego modelu konstytutywnego mięśnia, przyjęcia miejsc i sposobu połączeń między mięśniami i kością, modelowania stawów biodrowego, kolanowego i skokowego oraz narzucenia warunków brzegowych. Walidacja modelu belkowego w dużej mierze polegała na ocenie różnic modelu MES z modelem Gait2392 przygotowanym w środowisku OpenSim. Oceniono też wpływ modułu sprężystości mięśnia na odwzorowanie siły działającej na kość udową.

Kolejny rozdział czwarty w pewnym sensie jest rozszerzeniem rozdziału poprzedniego z tą jednak różnicą, że kość udowa – główny element zainteresowań, modelowana jest za pomocą elementów objętościowych 3D. Geometrię kości udowej odtworzono na podstawie rzeczywistej kości preparowanej z denata. Tworzenie modelu objętościowego kości udowej związane było z pokonywaniem takich trudności jak: utworzenie modelu panewki stawu biodrowego i chrząstki stawu kolanowego czy utworzenie anatomicznych obszarów przyczepu mięśni. Ważną kwestią było rozstrzygnięcie właściwości przyjmowanego modelu konstytutywnego uwzględniającego anizotropową mikrostrukturę kości udowej. Doktorant przygotował własny model konstytutywny i zastosował go w środowisku ABAQUS używając zbudowanej przez siebie procedury UMAT.

Utworzenie takiego modelu w końcu dało szansę na analizę numeryczną stanu obciążenia kości udowej, a więc prezentację tego stanu w cyklu chodu w tym reakcji sił, kinematyki główki kości udowej w panewce stawu biodrowego oraz stanu naprężenia i odkształcenia na powierzchni kości.

Praca kończy się podsumowaniem i dyskusją perspektyw rozwoju tej tematyki. Zawiera także 183 pozycje bibliograficzne, na które powołuje się Autor.

3. Uwagi krytyczne dotyczące pracy

Cała rozprawa ułożona jest logicznie i kolejno wprowadza czytelnika w problemy wymagające zrozumienia by w końcu doprowadzić do oceny obciążenia kości udowej z wykorzystaniem najbardziej zaawansowanego modelu obliczeniowego 3D.

W rozdziale drugim Autor opisuje oprogramowanie OpenSim i nie wiadomo jaka część jest powszechnie znana i czy są elementy twórcze, własne Doktoranta. Wersja modelu Gait2392 zakłada domyślnie iż reprezentuje człowieka o konkretnych wymiarach (wzroście i masie ciała). Jak sądzę dalsze przyjmowanie parametrów z tego modelu może być mało reprezentatywne dla dowolnie wybranej osoby. Proszę o komentarz w tej sprawie. W tym rozdziale jasno powinny być określone elementy, które są własne, oryginalne Autora, a które tylko cytują zaszyte w programie OpenSim, jak w czarnej skrzynce, założenia. Wzory pojawiające się w tym rozdziale niekiedy „spadają” bez

wyjaśnienia dlaczego właśnie tak ma np. wyglądać algorytm optymalizacyjny – wzór (2.1) i dalsze. Co oznacza stwierdzenie, że *błąd będzie na satysfakcjonująco niskim poziomie?*

Rozdział trzeci Doktorant rozpoczyna od niejako wprowadzenia do MES. Uważam, że ten fragment lepiej aby został pominięty, ale dziwi mnie, że Autor nie cytuje żadnego z wielkich twórców metody (Couranta, Babuski, Zienkiewicza, Odena czy innych). Wobec faktu, że cytowane jest wiele pozycji (niepotrzebnie kilka razy manuałe ABAQUSa) w tym mnogość stron internetowych niecytowanie prac fundamentalnych, również twórców kluczowego dla pracy oprogramowania Hibbitta, Carlsona i Sorensena jest niedopatrzeniem.

Kluczową sprawą dla jakości modelu np. belkowego kości udowej jest przyjęcie parametrów (właściwości) konstytutywnych dla kości. Na str. 66 Autor dokonuje logicznego wyboru cech materiałowych fragmentów kości (nasady dolnej i górnej, strefy przejściowej i trzonu), ale dlaczego nie eksponuje co jest Jego dorobkiem (co osobiście zbadał) a co jest zaczerpnięte z literatury.

Proszę o komentarz do rozdziału 3.2 dotyczącego *Walidacji modelu kurczliwego mięśnia*. Autor wyraża myśl, że celem jest by wyniki analizy MES były jak najbardziej zgodne z innym modelem obliczeń kinematycznych Gait2392. Z tym trudno mi jest się pogodzić.

Sama budowa modelu belkowego i z pietyzmem odwzorowana struktura kości, ścięgien i stawów oraz analiza wybranych etapów cyklu chodu człowieka jest zadaniem bardzo trudnym i Autor pokonał trudności bardzo sprawnie. Dyskusja dokładności dopasowania siły mięśnia i porównanie sił reakcji w stawie z wykorzystaniem tych dwóch eksponowanych narzędzi (MES i OpenSim) jest wielce satysfakcjonujące.

Model 3D wymagał wprowadzenia dyskretyzacji kości udowej z wykorzystaniem elementów przestrzennych. Nie uwzględniono w modelu kości udowej części gąbczastej. Proszę scharakteryzować właściwości fizyczne tej części i wpływ pominięcia tego fragmentu na rozkład sił i naprężeń w kości udowej.

Na koniec kilka uwag krytycznych dotyczących samych sformułowań i strony gramatyczno-stylistycznej rozprawy. Praca jest napisana na ogół poprawnym językiem. Nasuwa się jednak kilka uwag, które być może przyczynią się do poprawienia samej prezentacji. Widać, że końcówka pracy była wykonywana w pośpiechu i Autor nie zdążył uważnie przeczytać całości i wyeliminować wszystkich błędów literowych. Zdarza się, że Autor myli adaptację z adopcją. Nie podoba mi się wielokrotnie używane sformułowanie *w oparciu* zamiast *opierając się na*. Mówimy raczej o *właściwościach* związków konstytutywnych a nie *własnościach*. Mówi się *przy pomocy* ludzi oraz *za pomocą* rzeczy. Zawsze próbuję uświadamiać młodemu pokoleniu, że prawdziwym twórcą pojęcia naprężenia zredukowanego w tym również energetycznego kryterium plastyczności był polski uczone Tytus Maksymilian Huber (1905) a nie von Mises (1913). Chociaż my powinniśmy pamiętać o tym pierwszeństwie. Choć zdaję sobie sprawę, że wobec rozpropagowanego powszechnie pojęcia naprężenia Misesa, takie uświadamianie to walka z wiatrakami.

4. Uwagi końcowe

Nie chciałbym aby powyższe uwagi krytyczne i prośby o komentarze (na obronie) przysłoniły Wysokiej Komisji i Radzie Naukowej obraz bardzo dobrej, czasochłonnej i ambitnej rozprawy doktorskiej pana Adriana Wita. Uważam, że przygotowując tę rozprawę Doktorant musiał wielu

nowych rzeczy się nauczyć, pokonać wiele trudności leżących na styku kilku dziedzin w tym fizyki, inżynierii biomedycznej, biomechaniki i zaawansowanych metod numerycznych. Uważam, że Doktorant wykazał się umiejętnością posługiwania się dorobkiem znanym z literatury, wykonał wiele badań własnych i przygotował niezwykle zaawansowane modele numeryczne, które pozwoliły odpowiedzieć na stawiane w pracy cele.

Rozprawa doktorska pana mgr. inż. Adriana Wita spełnia wymagania formalne i zwyczajowe stawiane pracom tego typu w Dyscyplinie Nauki Fizyczne i wnoszę o dopuszczenie Kandydata do publicznej obrony.



Tomasz Łodygowski