

Prof. dr hab. inż. Tadeusz BURCZYŃSKI, czł. koresp. PAN

Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN

ul. A. Pawińskiego 5B

02-106 Warszawa

e-mail: tburczynski@ippt.pan.pl

Warszawa, 24.01.2018

**Recenzja
rozprawy doktorskiej**

mgr inż. Moniki Ratajczak

**pt. „*Analiza zmian parametrów biomechanicznych tkanek mózgowych
spowodowanych obciążeniami dynamicznymi*”**

1. Uwagi ogólne

Rozprawa doktorska mgr inż. Moniki Ratajczak poświęcona jest modelowaniu mózgu i tkanek mózgowych podczas gwałtownych obciążeń mechanicznych.

Praca powstała na Wydziale Podstawowych Problemów Techniki Politechniki Wrocławskiej, Promotorem rozprawy jest prof. dr hab. inż. Romuald Będziński, czł. koresp. PAN, a promotorem pomocniczym dr inż. Mariusz Ptak.

Recenzowana rozprawa mieści się bez wątplenia w dyscyplinie naukowej – biocybernetyka i inżynieria biomedyczna.

2. Zakres rozprawy

Rozprawa o objętości 146 stron składa się z wykazu ważniejszych skrótów i oznaczeń, dwunastu rozdziałów, spisu rysunków i tabel oraz bibliografii.

Wprowadzenie w postaci rozdziału 1. zawiera motywy podjęcia badań oraz opis syntetyczny procedury ich realizacji.

Rozdziały od 2. do 4., które poświęcone są odpowiednio anatomii, biomechanice i neurologicznym aspektom tkanek mózgowych (rozd. 2), przeglądowi modeli numerycznych głowy człowieka (rozd. 3) oraz właściwościom mechanicznym struktur mózgowych (rozd. 4), podsumowane są w rozdziale 5.

Rozdziały od 6. do 12. są oryginalnym wkładem Doktorantki do rozważanego zagadnienia. Sformułowanie problemu badawczego i określenie przebiegu badań przedstawione są

w rozdziale 6. Rozdział 7. poświęcony jest wyborowi metody badawczej.

W rozdziale 8. Doktorantka przedstawiła własny model numeryczny głowy α HEAD. Walidację modelu głowy przedstawiła Doktorantka w rozdziale 9.

Rozdział 10. poświęcony jest badaniom względnych przemieszczeń mózgu w zależności od jego właściwości materiałowych.

W rozdziale 11. przedstawione są wyniki badania parametrów biomechanicznych żył mostkowych.

Podsumowanie i wnioski wynikające z rozprawy zawarte są w rozdziale 12.

Bibliografia jest obszerna i zawiera 249 pozycji literaturowych, w tym 5 pozycji jest autorstwa lub współautorstwa Doktorantki.

Niestety rozprawa nie zawiera streszczeń w j. polskim i angielskim, w tym tytułu w j. angielskim.

3. Ocena merytoryczna

Oceniana rozprawa doktorska poświęcona jest oryginalnej tematyce badawczej związanej z badaniem tkanek mózgowych przy gwałtownych obciążeniach mechanicznych głowy. Tematyka rozprawy jest bardzo aktualna, ponieważ przy obecnym poziomie rozwoju motoryzacji i infrastruktury technicznej oraz sposobu życia, możliwość takich oddziaływań mechanicznych i w konsekwencji urazowych uszkodzeń mózgu stale wzrasta i staje się wyzwaniem cywilizacyjnym dla medycyny.

Doktorantka zajęła się tym zagadnieniem w sposób niemal kompleksowy, przeprowadzając dogłębną krytyczną analizę dotychczasowego piśmiennictwa obejmującego to zagadnienie, a następnie zaproponowała nowoczesną i oryginalną metodologię, bazującą na modelowaniu komputerowym.

Doktorantka opracowała swój własny oryginalny model numeryczny głowy o nazwie α HEAD oparty na metodzie elementów skończonych.

Trójwymiarowy model geometryczny mózgu i czaszki został zbudowany na podstawie obrazów medycznych uzyskanych ze skanerów medycznych na podstawie kilkunastu obrazów tomografii komputerowej i rezonansu magnetycznego uzyskanych z Katedry Radiologii Uniwersytetu Medycznego we Wrocławiu oraz z National Library of Medicine.

Model numeryczny zbudowano przy użyciu profesjonalnych narzędzi i programów klasy CAx: ANSYS DesignModeler i LS-PrePost. Opracowany model numeryczny składał się z opony twardej, sierpu mózgu, namiotu mózdzku zatoki strzałkowej górnej i żył mostkowych. Model zawierał łącznie z 59.048 elementów skończonych oraz 17 różnych komponentów, w tym 55.117 elementów bryłowych, 3.784 elementów powłokowych oraz 133 elementów belkowych. Do obliczeń numerycznych Doktorantka zastosowała oprogramowanie LS-DYNA.

Model numeryczny zbudowany przez Doktorantkę jest zdecydowanie bardziej kompleksowy niż znane z literatury modele, a ponadto został poddany procesowi walidacji, co znacznie podnosi znaczenie poznawcze wyników numerycznych uzyskanych na podstawie tego modelu. Przeprowadzony proces walidacji na podstawie danych eksperymentalnych ma bardzo ważne znaczenie dla wiarygodności modelu i cechuje się istotną właściwością polegającą na dużej

zgodności wyników eksperymentalnych i generowanych przez model.

Inną ważną cechą tego modelu jest przyjęcie takich warunków brzegowych, które zdecydowanie lepiej odwzorowują kontakt mózgu z powierzchnią wewnętrzną czaszki niż inne znane modele opracowane przez innych badaczy.

Doktorantka przeprowadziła analizę porównawczą modelu α HEAD ze znanym w literaturze modelem mózgu YEAHM i zauważyła, że uwzględnienie w modelu numerycznym sierpa mózgu i namiotu mózdzku jest ważne w prawidłowej ocenie biomechaniki urazów mózgu.

Kluczową rolę w modelowaniu mózgowia odgrywa model konstytutywny materiału. Doktorantka analizowała różne modele konstytutywne: modele lepkosprężyste w dwóch wariantach oraz modele hipersprężyste Mooney'a-Rivlina w trzech wariantach i model hiperprężysty Ogdena. Najlepsze dopasowanie wyników numerycznych do eksperymentu uzyskała dla wariantu drugiego modelu Mooney'a-Rivlina.

Kluczowe i oryginalne znaczenie w modelu α HEAD ma uwzględnienie żył mostkowych, które są najbardziej podatne na uszkodzenia przy mechanicznych obciążeniach. Wyniki badań eksperymentalnych przeprowadzonych przez różnych autorów wskazują na duże rozbieżności, co do znaczenia żył mostkowych. Także możliwość ich uwzględnienia w modelu numerycznym jest niejednoznaczna. Doktorantka przeprowadziła interesujące badania odkształceń żył mostkowych w zależności od parametrów biomechanicznych i zauważyła, że żyły mostkowe wpływają na względne przemieszczenia mózgu i przy gwałtownych obciążeniach mechanicznych dochodzi do ich rozerwania.

Doktorantka przedstawiła w rozprawie wiele interesujących wyników symulacji komputerowych, które uzyskała dzięki opracowanej i zastosowanej metodologii.

Opracowana przez Doktorantkę metodologia okazała się bardzo efektywna w analizie skutków mechanicznych obciążeń głowy poprzez analizę odkształceń tkanek mózgowych.

Do najważniejszych osiągnięć Doktorantki należy:

- opracowanie własnej oryginalnej metodologii modelowania komputerowego tkanek mózgowych wykorzystującej metody obrazowania i metodę elementów skończonych oraz walidacja opracowanego modelu,
- analiza wpływu właściwości mechanicznych tkanki mózgowej i żył mostkowych na przemieszczenia mózgu względem czaszki przy gwałtownych obciążeniach mechanicznych,
- zbadanie zależności wpływu parametrów fizycznych żył mostkowych i mózgu na odkształcalność żył.

Zamieszczone w rozprawie wyniki badań świadczą o bardzo dobrej znajomości problematyki badawczej, dużej pomysłowości i profesjonalności Doktorantki. Warto także podkreślić wysoki poziom numeryczny rozprawy.

Struktura rozprawy jest logiczna, dobrze przemyślana i zwięźle zredagowana. Zwraca uwagę duża pieczołowitość w przygotowaniu ilustracji oraz wyników obliczeń numerycznych.

4. Uwagi dyskusyjne

- (i) Mózg i czaszka człowieka są bardzo złożonymi trójwymiarowymi obiektami zarówno od strony geometrycznej jak i struktury materiału. Zastosowanie profesjonalnego i zaawansowanego oprogramowania metody elementów skończonych w takiej sytuacji jest koniecznością. Jednakże otwartym zagadnieniem jest odpowiedź na pytanie z jaką dokładnością uzyskane są wyniki obliczeń przy przyjętych założeniach i uproszczeniach modelowych. Niestety Doktorantka nie zastanawia się w rozprawie na tym zagadnieniu. W procesie walidacji konfrontuje wyniki eksperymentu z wynikami obliczeń, a przecież zarówno wyniki doświadczenia jak i symulacji numerycznych obarczone są niewątpliwie błędami pomiarowymi jak i błędami obliczeń. W tym kontekście warto zastanowić się nad tym, na ile uzyskane wyniki są wiarygodne i na ile mogą być podstawą do pewnych generalnych wniosków i konkluzji.
- (ii) Przyjęty model materiału lepkosprężystego lub hipersprężystego zakłada milcząco, że rzeczywistą strukturę mózgu, składającą się z bardzo skomplikowanej sieci neuronów, zastąpiono abstrakcyjnym kontinuum o pewnych własnościach mechanicznych. Model taki wydaje się być adekwatny, jako globalny model mózgu, ale otwartym zagadnieniem jest odpowiedź na pytanie, czy analiza takiego modelu daje zawsze odpowiedź na wszystkie możliwe konsekwencje gwałtownych oddziaływań mechanicznych działających na głowę człowieka. Czy model wieloskalowy uwzględniający rzeczywistą strukturę neuronalną mózgu i lokalne zjawiska nie byłby właściwszy, zwłaszcza w sytuacjach gdy zjawiska mikrouszkodzeń mózgu kumulują się w wyniku częstych urazów mechanicznych głowy (np. u bokserów).
- (iii) Istnieje pewien niedosyt po przeczytaniu ostatniego 12. rozdziału rozprawy. Doktorantka podsumowała uzyskane ciekawe i oryginalne wyniki swoich badań, ale nie zarysowała programu dalszych możliwych badań. Byłoby ciekawe dowiedzieć się jak Doktorantka widzi możliwości dalszego rozwoju opracowanej metodologii badań mózgu przy gwałtownych obciążeniach mechanicznych.

5. Podsumowanie i wniosek końcowy

Rozprawa doktorska mgr inż. Moniki Ratajczak jest bardzo interesującym studium z zakresu opracowania kompleksowego podejścia do zagadnień modelowania zachowania się mózgu człowieka przy gwałtownych obciążeniach mechanicznych.

Zamieszczone w rozprawie rozważania oraz obliczenia numeryczne, świadczą o bardzo dobrym rozeznaniu Doktorantki w obszarze objętym rozprawą.

Główny cel rozprawy został osiągnięty, a uzyskane wyniki stanowią bardzo cenny materiał.

Doktorantka wykazała się bardzo dużą wiedzą i doświadczeniem oraz posiada istotny i wartościowy dorobek publikacyjny.

Biorąc pod uwagę przedstawioną opinię stwierdzam, iż rozprawa doktorska mgr inż. Moniki Ratajczak w pełni odpowiada wymogom stawianym rozprawom doktorskim.

Doktorantka jest bardzo dobrze przygotowana do prowadzenia samodzielnych badań

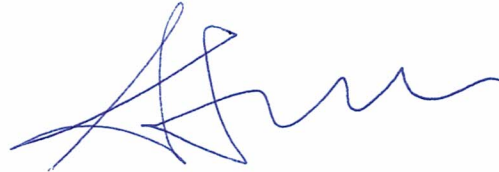
naukowych, zwłaszcza w zakresie zaawansowanych badań dotyczących zagadnień modelowania komputerowego mózgu.

Dlatego uważam, że przedstawiona rozprawa doktorska w pełni spełnia warunki stawiane rozprawom doktorskim przez obecnie obowiązującą ustawę o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki i wnoszę o dopuszczenie jej do publicznej obrony przed Radą Wydziału Podstawowych Problemów Techniki Politechniki Wrocławskiej.

Jednocześnie z uwagi na wysokim poziom naukowy rozprawy oraz dorobek publikacyjny Doktorantki, zgłaszam wniosek o wyróżnienie rozprawy doktorskiej mgr inż. Moniki Ratajczak.

Istotnymi argumentami za wyróżnieniem rozprawy jest:

- (i) opracowanie oryginalnej metodologii badań mózgu przy gwałtownych obciążeniach mechanicznych, biorącej pod uwagę szereg nowatorskich osiągnięć, w tym walidację modelu i. uwzględnienie wpływu uszkodzeń żył mostkowych na wystąpienie i przebieg udarów krwotocznych,
- (ii) wyniki przedstawione w rozprawie zostały opublikowane w sześciu wartościowych artykułach i referatach naukowych.



Tadeusz Burczyński