

prof. dr hab. Anna Kucaba-Piętal
Katedra Inżynierii Lotniczej i Kosmicznej
Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa
Politechnika Rzeszowska im. I. Łukasiewicza
tel.: 178651351, e-mail: anpietal@prz.edu.pl

Rzeszów, 28.11.2022 r.

Recenzja rozprawy doktorskiej

mgr. inż. Marty Sobkowiak:

Modelowanie i symulacja przepływu krwi przez środkową tętnicę mózgową

Recenzja została opracowana na podstawie pisma z dnia 23.09.2022 roku nr RDIB.002.51.2022 Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynieria Biomedyczna Politechniki Śląskiej, Pana prof. dr. hab. inż. Marka Gzika, zawierającego informację o Decyzji Rady z dnia 22.09.2022 r. o powołaniu mnie na recenzenta rozprawy doktorskiej. Pismo wraz z pracą i dokumentacją otrzymałam w dniu 30. 09 2022.

1. Przedmiot recenzji

Rozprawa doktorska Pani mgr. inż. Marty Sobkowiak, zatytułowana „Modelowanie i symulacja przepływu krwi przez środkową tętnicę mózgową” zawiera 173 stron. Promotorem rozprawy jest Pan dr hab. inż. Wojciech Wolański, prof. PŚ.

2. Tematyka, cel, zakres pracy

Szybki rozwój narzędzi obliczeniowych do modelowania przepływów oraz rozwój systemów obrazowania w medycynie stwarza nowe możliwości badawcze układów przepływowych człowieka, w szczególności przepływu krwi przez tętnice mózgowie. Znaczący problem wśród chorób układu krążenia stanowią schorzenia wywołane tętniakami mózgu. W centrum zainteresowań wielu badaczy leży określenie przyczyn powstawania tętniaka oraz przewidywanie jego rozwoju, gdyż odpowiedź na to pytanie ułatwiłaby działanie prewencyjne oraz lecznicze. Symulacje numeryczne takich przepływów dostarczają nowych informacji, które mogą być użyteczne przy wdrożeniu odpowiedniego sposobu leczenia.

Zarówno ze względu na geometrię jak i fizykę zjawiska, określenie wielkości hydrodynamicznych przez rozwiązanie równań opisujących przepływ krwi przez tętnice mózgowe - Naviera Stokesa - jest zagadnieniem nietrywialnym.

Anatomiczna specyfika tętnic mózgowych przejawia się w postaci obecności wielu węzłów, w których następują rozwidlenia i zespolenia tętnic. Z hydrodynamicznego punktu widzenia jest to zatem geometrycznie skomplikowany układ przepływowy, zindywidualizowany dla każdego człowieka. Węzły fizyczne wywołują istotne zaburzenia przepływu w swoim otoczeniu wpływające na wartości wielkości przepływowych. Przepływ krwi, która jest zawiesiną elementów morfotycznych w osoczu przez elastyczne, geometrycznie zmienne tętnice mózgowe jest niestacjonarny oraz trójwymiarowy. Stosuje się więc uproszczenia rzeczywistego przepływu krwi – zarówno geometryczne jak i fizyczne - tworząc jego modele, celem numerycznego rozwiązania równań przepływowych krwi w obszarze modelowym aby następnie poddać je analizie.

Tematyka prezentowanej rozprawy ulokowana jest w tym obszarze badawczym i dotyczy opracowania modelu przepływu krwi przez środkową tętnicę mózgu, celem określenia efektu wpływu parametrów morfometrycznych oraz hemodynamicznych na powstawanie tętniaka, w oparciu o wyniki uzyskane z numerycznych rozwiązań równań przepływowych. Zakres pracy obejmuje: opracowanie modelu przepływu przez środkową tętnicę mózgu umożliwiającego wykonanie numerycznych obliczeń przepływowych, jego weryfikację i walidację oraz wykonanie szeregu obliczeń przy różnych parametrach celem identyfikacji efektu wpływu elementów morfometrycznych oraz hemodynamicznych na przedmiotowe zjawisko.

Biorąc pod uwagę cel i zakres oraz osiągnięte wyniki, rozprawę można zakwalifikować do dyscypliny inżynieria biomedyczna. Temat pracy jest bardzo aktualny i ważny zarówno w aspekcie podstawowej wiedzy, jak i potencjalnej aplikacyjności medycznej. Dysertacja odpowiada wymaganiom stawianym rozprawom doktorskich.

3. Ocena merytoryczna rozprawy

Układ pracy jest logiczny i spójny. Właściwy tekst poprzedzono spisem treści. Treść, zgodną z tytułem, podzielono na dziewięć rozdziałów zawierających podrozdziały oraz załącznik. Spis cytowanej literatury obejmuje 96 pozycji. W pracy zamieszczono również wymagane ustawowo streszczenia w języku angielskim oraz polskim. Dołączono też spis oznaczeń, spis rysunków oraz spis tabel.

W rozprawie można wyodrębnić dwie części. Część pierwsza, wprowadzająca, zawiera 40 stron i obejmuje trzy początkowe rozdziały (I-III)

W rozdziale pierwszym omówiono pokrótce problematykę podejmowaną w doktoracie. Przegląd – bardzo szczegółowy - aktualnego stanu wiedzy w tym zakresie dokonany został jest w rozdziale drugim. Omówiono etiologie powstawania tętniaków oraz badania modelowe i eksperymentalne opisane w literaturze. W końcowej części rozdziału zawarto ocenę aktualnego stanu wiedzy, wskazując na lukę obejmującą brak analizy przepływu krwi w tętnicy z tętniakami w oparciu o wyniki badań numerycznych, retrospektywnych oraz eksperymentalnych. Wypełnienie tej luki stanowiło motywację Doktorantki do podjęcia badań przedstawionych w przedłożonej rozprawie doktorskiej. W kolejnym rozdziale tej części, trzecim, sformułowany został cel pracy doktorskiej oraz pięć zadań badawczych, realizacja których umożliwia jego osiągnięcie.

W tej części rozprawy Doktorantka wykazała umiejętność wprowadzenia w tematykę badawczą i przejrzystego formułowania celu oraz zadań badawczych.

Część druga rozprawy (76 stron) zawiera sześć kolejnych rozdziałów o numerach IV-IX. W pięciu początkowych (IV-VIII) omawiane są szczegółowo realizacje poszczególnych zadań badawczych sformułowanych w części pierwszej. Dotyczą one modelowania, badań numerycznych, badań doświadczalnych oraz analizy wyników. Ostatni rozdział tej części (IX) jest podsumowującym. W rozdziale czwartym pracy opisano wszystkie etapy przeprowadzonego procesu modelowania przepływu przez środkową tętnicę mózgu oraz stosowane metodologie. Doktorantka utworzyła trzy rodzaje modeli rzeczywistej tętnicy mózgu: z tętniakami i bez z udostępnionych obrazów tomografii komputerowej pacjentów oraz parametryczny i retrospektywny. Zaprezentowane w tym rozdziale parametry przyjęte do obliczeń oceniam jako prawidłowe. Zabrakło mi tutaj rysunku przedstawiającego przykładowy model tętnicy mózgu wykorzystany do obliczeń numerycznych (z widokiem siatki oraz układem współrzędnych).

W rozdziale piątym rozprawy Doktorantka analizowała przepływy krwi przez tętnicę środkową mózgu na podstawie otrzymanych wyników numerycznych z rozwiązań programem ANSYS równań opisujących przepływ krwi. Badała wrażliwość wielkości hemodynamicznych na wybrane parametry morfometryczne oraz wpływ parametrów hemodynamicznych na ciśnienie oraz naprężenie styczne na ścianie tętnicy. Również badała wpływ zmian geometrycznych: zarówno promieni odnog tętnicy jak i zmian kąta bifurkacji na przepływ. Wyniki przedstawione zostały na 30 rysunkach oraz umieszczone w ośmiu tabelach. Niestety, niektóre rysunki są nieczytelne, trudno odczytać podpisy, legendy, dla przykładu: 5.26, 5.29, 5.30. Analiza retrospektywna czyli porównanie wielkości hydrodynamicznych z numerycznych symulacji przepływu krwi w tętnicy z tętniakami z wynikami sprzed uformowania tętniaka

stanowi treść rozdziału szóstego. Rozdział siódmy zawiera opis oraz wyniki badań eksperymentalnych przepływu płynu przez fantom środkowej tętnicy mózgu przeprowadzanych na autorskim stanowisku laboratoryjnym, zaprojektowanym przez Doktorantkę. Badania eksperymentalne przepływu Doktorantka wykonała z wykorzystaniem techniki PIV. Wyniki otrzymane z eksperymentu porównano z wynikami symulacji przepływu w tętnicy z tętniakiem porównano z uzyskanymi przed uformowaniem tętniaka. Rozdział ósmy zawiera bardzo szczegółową analizę i dyskusję otrzymanych wyników w aspekcie założonych celów.

W ostatnim rozdziale, dziewiątym, zatytułowanym Wnioski i perspektywy – podsumowano główne wyniki i sformułowano ciekawe wnioski. Wskazano - między innymi - że formowanie się tętniaka rozpoczyna się w miejscu gdzie są największe wartości naprężeń stycznych na ścianie tętnicy. Zaproponowano autorskie współczynniki, które wydają się być przydatne w prognozowaniu formowania tętniaka w oparciu o wyniki numeryczne. W końcowej części rozdziału zaprezentowano również możliwe kierunki przyszłych badań związanych z przedmiotowym zagadnieniem.

Dobór metodologii badawczej uważam za właściwy. Przeprowadzona analiza wyników i zinterpretowanie jej na tle literatury przedmiotu jest poprawne. Wnioski są sformułowane prawidłowo. Prezentacja wyników, mimo drobnych mankamentów, jest na dobrym poziomie.

4. Uwagi dyskusyjne

- 1) Doktorantka do obliczeń przyjmuje model reologiczny krwi Bird- Carreau. Nie podano w rozprawie równania konstytutywnego tego modelu, proszę o podanie.
- 2) W Tabeli 5.9 pojawiają się ujemne wartości ciśnienia. Proszę o interpretację.
- 3) Doktorantka przeprowadziła obliczenia numeryczne w programie ANSYS, Czy była badano efektywność numeryczna obliczeń w zależności od zagęszczenia siatki?

5. Podsumowanie

Rozprawa doktorska mgr inż. Marty Sobkowiak jest interesującym studium z zakresu zastosowania metod obliczeniowych do zagadnień inżynierii biomedycznej.

Cel pracy został osiągnięty. Doktorantka do numerycznych rozwiązań układu równań opisujących przepływ krwi wykorzystwała solver ANSYS. Geometrię obszaru przepływowego środkowej tętnicy mózgu tworzy w oparciu o pozyskane dane medyczne (obrazy) pochodzące z badań tomografii komputerowej (TK) oraz USG Doppler głów pacjentów. Również do obliczeń wykorzystuje wartości rzeczywiste.

Po wykonaniu szeregu wielowariantowych obliczeń mających na celu określenie efektu wpływu na powstawanie tętniaka parametrów morfometrycznych i hemodynamicznych krwi analizuje wyniki otrzymując ciekawe wnioski. Model został zwalidowany oraz zweryfikowany przez porównanie wyników z eksperymentem. Doktorantka badała metodą PIV przez na autorskim stanowisku eksperymentalnym przepływ przez fantom tętnicy płynu o własnościach reologicznych zbliżonych do krwi. Przedstawione badania cechuje oryginalność. Wyniki pochodzą z analiz w oparciu o dane uzyskane z numerycznych symulacji przepływów krwi w oparciu o rzeczywiste geometrie.

Podsumowując syntetycznie uzyskane wyniki rozprawy, chciałabym wskazać na trzy najważniejsze jej aspekty:

- a) sformułowanie podejścia numerycznego w wykorzystaniem rzeczywistych obrazów z tomografii komputerowej dla modelowania przepływów krwi przez tętnicę mózgową
- b) zbudowanie oryginalnego eksperymentalnego stanowiska celem weryfikacji metody obliczeniowej
- c) zastosowanie zaproponowanego podejścia do analizy powstawania tętniaka.

Zamieszczone w rozprawie wyniki obliczeń komputerowych świadczą o bardzo dobrej znajomości problematyki badawczej, dużej pomysłowości i profesjonalności Doktorantki.

Wykazała się Ona dobrą znajomością zarówno metod obliczeniowych mechaniki płynów jak i metod pomiarowych – w szczególności PIV. W badaniach wykorzystwała współczesne narzędzia badawcze zarówno numeryczne jak i doświadczalne. Otrzymane wyniki są nowe i ciekawe, co dowodzi celowości badania. Przeprowadzone analizy w pracy są poprawne.

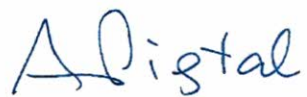
Moja ocena pracy jest pozytywna. Rozprawa przedstawiona przez **Pani mgr. inż. Marty Sobkowiak** nosi znamiona oryginalności, wnosi wkład w wiedzę z zakresu inżynierii biomedycznej.

6. Wniosek końcowy

Po zapoznaniu się z przedłożoną rozprawą doktorską mgr. inż. Marty Sobkowiak : **Modelowanie i symulacja przepływu krwi przez środkową tętnicę mózgową**, stwierdzam, że stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, dowodzi ogólnej wiedzy teoretycznej Doktorantki, a także umiejętności prowadzenia pracy naukowej w dziedzinie nauk inżyniersko-technicznych w dyscyplinie inżynieria biomedyczna.

Spełnia zatem wymagania określone obowiązującą Ustawą z dn. 18 lipca 2018 : Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce, stawiane kandydatom ubiegającym się o nadanie stopnia naukowego doktora.

Wnoszę zatem o przyjęcie rozprawy i dopuszczenie Pani **mgr. inż. Marty Sobkowiak** do dalszych etapów przewodu doktorskiego.



Prof. dr hab. Anna Kucaba-Piętal