



Prof. dr hab. inż. Dawid Taler
Politechnika Krakowska
Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki
Katedra Procesów Ciepłych,
Ochrony Powietrza i Utylizacji Odpadów
ul. Warszawska 24
31-155 Kraków

Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki, Kraków, 05.09.2022 r.
mgr *Natalia Czerniak*

**Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Natalii Lewandowskiej
pt. „Modelowanie numeryczne i analiza przepływu cieczy nienewtonowskich przez
kanały rozgałęzione o ściankach elastycznych w kontekście biomechaniki“**

Recenzowana rozprawa o objętości 107 stron napisana jest w języku polskim. Składa się z 7 rozdziałów, 9 załączników oraz spisu literatury cytowanej zawierającej 109 pozycji literaturowych. Na początku rozprawy znajdują się jej streszczenia w języku polskim i angielskim, podziękowania, spis treści, spis rysunków, spis tablic, wykaz skrótów i symboli oraz indeksów.

Przedmiotem rozprawy jest modelowanie CFD (Computational Fluid Dynamics) przepływu krwi (cieczy nienewtonowskich) w tętnicach szyjnych, które można traktować jak kanały elastyczne o polu przekroju poprzecznego i długości zależnych od ciśnienia. Odkładanie się złogów w niektórych obszarach tętnic może być przyczyną rozwoju miażdżycy, wynikającą z lokalnych zaburzeń prędkości i ciśnienia krwi w tętnicy. Mgr inż. Natalia Lewandowska skupiła się w swojej rozprawie na analizie przepływu krwi w tętnicy szyjnej. Kandydatka próbowała znaleźć odpowiedź jak kształt tętnicy szyjnej pacjenta wynikający z uwarunkowań genetycznych może wpływać na zwiększone prawdopodobieństwo rozwoju miażdżycy.

Tematyka rozprawy jest ważna i aktualna. Może stanowić przedmiot rozprawy doktorskiej. Recenzowana rozprawa ma duże znaczenie poznawcze oraz praktyczne.

1. Charakterystyka rozprawy doktorskiej

Pierwszy rozdział rozprawy, to jest wstęp, składa się z 5 podrozdziałów, w których kolejno omówiono: genezę tematu rozprawy, obiekt badań - tętnicę szyjną, związek tematyki rozprawy z reprezentowaną dziedziną naukową, wskazanie pytań badawczych i sformułowanie tezy rozprawy doktorskiej oraz strukturę rozprawy.

W rozdziale drugim przeprowadzono analizę dotychczas opublikowanych prac dotyczących: miażdżycy oraz przyczyn jej powstawania, diagnostyki i profilaktyki pacjentów miażdżycowych, parametrów używanych do oceny zaburzeń przepływu krwi w tętnicach, analiz przepływowych w tętnicach szyjnych, w tym identyfikacji miejsc w tętnicy szyjnej podatnej na odkładanie się złogów. W ostatnim podrozdziale 2.5 omówione są sposoby walidacji wyników symulacji przepływu krwi w tętnicy.

W rozdziale trzecim sformułowane są cele i tezy rozprawy. Rozdział zaczyna się od analizy luk w dostępnej wiedzy. Sformułowana została również następująca hipoteza badawcza (teza rozprawy): „Ukształtowanie geometrii tętnicy szyjnej determinuje ryzyko rozwoju zmian miażdżycowych w opuszcze”.

Głównym celem rozprawy jest stworzenie parametru diagnostycznego, który na podstawie zmiennych geometrycznych będzie zwracał wartość określającą prawdopodobieństwo występowania zmian miażdżycowych.

Jako cele szczegółowe wymienione zostały następujące zagadnienia: wybór najważniejszych cech geometrycznych i parametryzacja geometryczna tętnicy szyjnej, opracowanie modeli geometrycznych z pełną kontrolą wyżej wyselekcjonowanych parametrów, określenie warunku brzegowego uwzględniającego pulsację przepływu i elastyczność ścianki tętnicy, opracowanie równania dla parametru diagnostycznego i kalibracja współczynników na podstawie analizy wyników symulacji przepływu oraz weryfikacja stworzonego parametru z danymi medycznymi anonimowych pacjentów (zarówno zdrowych jak i obciążonych zmianami miażdżycowymi).

Mechanika przepływu krwi w tętnicach jest przedmiotem rozdziału czwartego. Tensor naprężeń Cauchy’ego i naprężenie na ściance omówione zostały krótko, odpowiednio w paragrafie 4.1 i 4.2

Krew jako ciecz nienewtonowska i wpływ hematokrytu na właściwości reologiczne krwi scharakteryzowane zostały w paragrafie 4.3.

Modele pulsacyjnego profilu prędkości w tętnicy omówione zostały w paragrafie 4.4. Najpierw przedstawiona została eksperymentalna metoda wyznaczania przebiegu prędkości na podstawie badań dopplerowskich. Wyznaczanie pulsacji ciśnienia przy użyciu modelu Windkessela przeprowadzono w paragrafie 4.4.2. Przebieg ciśnienia krwi w czasie jest funkcją strumienia objętości krwi, oporu tętniczego i pojemności tętniczej oraz oporu charakterystycznego. Przedstawiono przykład przebiegu ciśnienia krwi w czasie dla zadanego przebiegu czasowego strumienia objętości krwi. Wyznaczenie profilu prędkości płynu przy przepływie pulsacyjnym w kanale o przekroju kołowym za pomocą metody zaproponowanej przez Womersleya przedstawione jest w paragrafie 4.4.3. Przebieg prędkości krwi w czasie wyznaczony na podstawie badania USG porównano z prędkością wyznaczoną za pomocą wzoru Womersleya.

Modelowanie CFD przepływu krwi w tętnicy szyjnej przedstawiono w rozdziale piątym. Kształty i wymiary modelowanych tętnic zdefiniowane były za pomocą 6 parametrów geometrycznych, z których tylko jeden, tj. średnica tętnicy szyjnej wspólnej jest wymiarowy, a pozostałych 5 parametrów jest bezwymiarowych. Dane wejściowe służące do wyznaczenia wartości parametrów geometrycznych analizowanych tętnic wyznaczone zostały na podstawie wyników tomografii komputerowej przeprowadzonej dla 5 pacjentów w wieku powyżej 60 lat.

Omówione została również metoda optymalizacji zaproponowana przez Taguchi’ego pod kątem zmniejszenia liczby eksperymentów i wyznaczenia parametrów, które mają największy wpływ na ekstremum funkcji. Procedura Taguchie’go wykorzystana została do optymalnego wyboru parametrów w parametrze diagnostycznym tętnic szyjnych. Przedstawionych zostało 8 różnych modeli geometrycznych tętnicy szyjnej opracowanych z wykorzystaniem programu Autodesk Inventor. Modelowanie CFD przepływu krwi w tętnicy szyjnej przeprowadzono z wykorzystaniem programu komercyjnego Ansys Fluent 2021R2. Podstawą modelowania CFD były uśrednione przez Reynoldsa równania zachowania masy i pędu (z ang. RANS-Reynolds Averaged Navier Stokes). Turbulencję przepływu krwi symulowano za pomocą modelu $k-\omega$ -SST.

Wyniki modelowania CFD, tj. przestrzenne rozkłady prędkości i ciśnienia w analizowanych ośmiu modelach geometrycznych tętnic szyjnych przedstawione zostały w rozdziale szóstym.

Dokładność oceny wpływu danego parametru geometrycznego na powstawanie w tętnicy obszarów niebezpiecznych podwyższono za pomocą metody Taguchi'ego.

W paragrafie 6.3 zdefiniowano parametr diagnostyczny, który jest średnią ważoną z 7 parametrów geometrycznych. Wartości wag przy parametrach wyznaczono na podstawie symulacji. W paragrafie 6.3.2 przedstawiono wartości parametru diagnostycznego P dla danych wejściowych będących wynikami pomiaru dla 10 tętnic rzeczywistych (Tablica 5.1). Wartości parametru diagnostycznego osiągają maksymalne wartości dla dwóch przypadków, w których wystąpiły zmiany miażdżycowe. Wartości P są większe od 10. Tętnice te charakteryzują się dużym kątem bifurkacji, większym od 45° oraz dużą średnicą tętnicy szyjnej wspólnej - powyżej 7 mm.

Mgr inż. Natalia Lewandowska sformułowała na końcu rozdziału szóstego następujący wniosek: „Obserwując powyższe tendencje można wysnuć jeszcze jeden, następujący wniosek: mimo, że analiza wpływów Taguchi'ego nie wykazała istotnego udziału kąta bifurkacji we wpływie na zmienne przepływowe, determinuje ona geometrię tętnicy wpływając na inne cechy geometryczne takie jak długość opuszki, maksymalna powierzchnia przekroju poprzecznego w opuszce, itp. w taki sposób, że równomiernie zawyża ona ich wartości wraz ze wzrostem kąta co wpływa na wysokie wartości parametru diagnostycznego. Podobny, pośredni wpływ można zauważyć w przypadku wartości średnicy tętnicy szyjnej wspólnej.”

Podsumowanie wyników rozprawy oraz plany badawcze na przyszłość z zakresu tematyki pracy przedstawione są w rozdziale siódmym.

Praca zawiera również osiem dodatków, od A do H, zawierających wybrane programy obliczeniowe oraz wyniki obliczeń za pomocą własnych programów i wybrane wyniki symulacji CFD.

2. Charakterystyka najważniejszych osiągnięć naukowo-badawczych przedstawionych w rozprawie

Rozprawa doktorska mgr inż. Natalii Lewandowskiej jest napisana na bardzo wysokim poziomie naukowym. Ma również duże znaczenie praktyczne. Wyniki uzyskane w rozprawie, w tym zaproponowany parametr diagnostyczny, mogą służyć do oceny wystąpienia złogów w tętnicy szyjnej sprzyjających rozwojowi miażdżycy. Według definicji Goldschmidta-Clermont' a z 2012 roku miażdżycą to ogólnoustrojowy proces chorobowy, w którym złogi tłuszczowe, komórki i tkanka bliznowata gromadzą się na ścianach tętnic oraz występuje stan zapalny.

Mgr inż. Natalia Lewandowska przeprowadziła obszernie symulacje CFD przepływu krwi w tętnicy szyjnej, które wykazały, że w obszarze rozwidlenia dochodzi w wielu przypadkach do oderwania strugi krwi od powierzchni tętnicy oraz w przypadku dużego rozwidlenia i asymetrii przepływu dochodzi do powstawania lokalnych wirów. W obszarach zaburzeń przepływu krwi spowodowanych wirami i oderwaniem strugi krwi od powierzchni tętnicy mogą odkładać się złogi. Analiza rozkładów prędkości i ciśnienia w tętnicach o różnej geometrii pozwoliła mgr inż. Natalii Lewandowskiej wysnuć wniosek, że największe obszary podatne na rozwój zmian miażdżycowych występują w tętnicach o długiej opuszce, dużym rozwidleniu oraz wysokiej asymetryczności. Ważnym osiągnięciem naukowym mgr inż. Natalii Lewandowskiej jest propozycja parametru diagnostycznego P do oceny ryzyka rozwoju miażdżycy. Parametr diagnostyczny P został zdefiniowany jako średnia ważona z parametrów geometrycznych tętnicy. Wagi poszczególnych parametrów wyznaczone zostały na podstawie wyników symulacji CFD przepływu krwi w ośmiu modelowych geometriach tętnicy szyjnej. Wartość parametru diagnostycznego szybko wzrasta dla tętnic o dużym kącie rozwarcia (większym od 45°) oraz dużej względnej zmianie przekroju poprzecznego w opuszce tętnicy.

Na podstawie przeprowadzonych analiz, tętnice szyjne podzielone zostały na trzy grupy ryzyka, w zależności od wartości parametru diagnostycznego P :

- grupa wysokiego ryzyka: parametr diagnostyczny P osiąga wartość większą od 10,
- grupa podwyższonego ryzyka: parametr diagnostyczny P zawarty jest w przedziale od 8,7 do 10,
- grupa niskiego ryzyka: parametr diagnostyczny P jest mniejszy od 8,5.

Kandydatka potwierdziła sformułowaną na początku rozprawy tezę badawczą że, „Ukształtowanie geometrii tętnicy szyjnej determinuje ryzyko zmian miażdżycowych w opuszcze”.

3. Uwagi krytyczne

Pomimo bardzo wysokiej oceny rozprawy doktorskiej mgr inż. Natalii Lewandowskiej mam również uwagi krytyczne, z których pierwsza dotyczy małej liczby modeli tętnic symulowanych za pomocą modelowania CFD. Tylko 8 modeli tętnicy szyjnej o różnych kształtach przedstawionych na rysunku 5.3 było modelowanych w rozprawie.

Druga uwaga krytyczna dotyczy małej liczby wyników tomografii komputerowej, na podstawie których wyznaczono wartości parametrów geometrycznych tętnic szyjnych. Badania tomograficzne zostały przeprowadzone tylko dla 5 pacjentów w wieku powyżej 60 lat, tj. łącznie dla 5 prawych i 5 lewych tętnic szyjnych.

Mgr inż. Natalia Lewandowska może w przyszłości wykorzystać badania tomograficzne dla większej liczby pacjentów i na ich podstawie wygenerować większą liczbę modeli geometrycznych tętnic, dla których przeprowadzone zostaną symulacje komputerowe.

4. Wniosek końcowy

Rozprawa doktorska mgr inż. Natalii Lewandowskiej spełnia wszystkie wymagania ustawowe stawiane pracom doktorskim.

Rozprawa wnosi istotny wkład w rozwój modelowania komputerowego przepływów krwi w tętnicach szyjnych. Zaproponowany przez Nią parametr diagnostyczny może być wykorzystywany do oceny stopnia rozwoju zmian miażdżycowych w tętnicach szyjnych.

Wnioskuje o dopuszczenie mgr inż. Natalii Lewandowskiej do publicznej obrony swojej rozprawy i o nadanie Jej stopnia naukowego doktora nauk technicznych. Proponuję również wyróżnić rozprawę za obszerne symulacje CFD tętnic szyjnych, w których wykorzystane zostały dane z badań tomograficznych tętnic szyjnych pacjentów starszych od 60 lat.

David Jaler