

dr hab. Sylwia Hożejowska, prof. PŚk  
Wydział Zarządzania i Modelowania Komputerowego  
Politechnika Świętokrzyska w Kielcach  
Aleja Tysiąclecia Państwa Polskiego 7  
24-314 Kielce

Kielce 16.08.2022



## RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Natalii Lewandowskiej

pt. *Modelowanie numeryczne i analiza przepływu cieczy nienewtonowskich przez kanały rozgałęzione o ściankach elastycznych w kontekście biomechaniki*

Promotor: prof. dr hab. inż. Michał Ciałkowski  
Promotor pomocniczy: dr inż. Jędrzej Mosiężny

### 1. PODSTAWA OPRACOWANIA OPINII

Podstawą opracowania recenzji jest pismo Dziekana Wydziału Inżynierii Mechanicznej Politechniki Poznańskiej dr hab. inż. Olafa Ciszka, prof. PP z dnia 07.06.2022 (nr DIM.075.280.2022) wystosowane zgodnie z uchwałą *Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Poznańskiej* z dnia 03.06.2022 r.

### 2. CHARAKTERYSTYKA PRACY DOKTORSKIEJ

#### 2.1. Ogólna charakterystyka rozprawy

Rozprawa doktorska mgr inż. Natalii Lewandowskiej przedstawiona jest na 129 stronach maszynopisu formatu A4. Praca składa się z 7 rozdziałów poprzedzonych spisem treści, wykazem używanych w pracy skrótów i oznaczeń oraz streszczeniem w języku polskim i angielskim. Integralną część pracy stanowi również 9 załączników. Ponadto praca zawiera 38 rysunków i 16 tabel. Rysunki zamieszczone w pracy są czytelne, a ich liczba jest wystarczająca. Wykaz literatury liczący 109 pozycji, głównie w języku angielskim, zawiera siedem pozycji, których współautorem jest Doktorantka. Tradycyjny układ pracy, tj. wstęp, kwerenda literatury, sformułowanie celów i hipotezy badawczej pracy, teoretyczne i aplikacyjne rozdziały pracy oraz podsumowanie ze wskazaniem tematyki przyszłych badań jest spójny i logiczny.

## 2.2. Cele, tezy i główne zadania pracy doktorskiej

Przedmiotem rozprawy doktorskiej mgr inż. Natalii Lewandowskiej jest analiza wpływu wybranych parametrów geometrycznych tętnicy szyjnej na lokalne zaburzenia przepływu krwi, co może skutkować pojawieniem się zmian miażdżycowych w niektórych obszarach tętnic.

Wybór tematu pracy był podyktowany próbą znalezienia mechanicznych przyczyn odkładania się złogów miażdżycowych i powiązania tego zjawiska z lokalnymi zaburzeniami przepływu krwi. Przeprowadzona przez Doktorantkę kwerenda literatury pozwoliła wskazać luki w aktualnej wiedzy w wybranej tematyce i jasno sformułować następującą hipotezę badawczą:

*Ukształtowanie geometrii tętnicy szyjnej determinuje ryzyko rozwoju zmian miażdżycowych w opuszce.*

Celem głównym dysertacji było zdefiniowanie parametru diagnostycznego, który na podstawie zmiennych geometrycznych będzie zwracał wartość określającą prawdopodobieństwo występowania zmian miażdżycowych. Osiągnięcie tak postawionego celu pracy wymagało realizacji pięciu celów szczegółowych, które z powodzeniem zostały zrealizowane przez Doktorantkę. Pierwszy cel polegał na wyborze najważniejszych cech geometrycznych tętnicy szyjnej i ich parametryzacji. Opracowanie modeli geometrycznych wraz ze zdefiniowaniem warunku brzegowego uwzględniającego pulsację przepływu krwi i elastyczność ścianki tętnicy – to dwa kolejne cele szczegółowe. Dalsze zadania polegały na zdefiniowaniu wzoru parametru diagnostycznego, podaniu zakresów referencyjnych dla osób z grup wysokiego, podwyższonego i niskiego ryzyka pojawienia się zmian miażdżycowych oraz jego weryfikacji w oparciu o dane uzyskane od anonimowych pacjentów (zarówno zdrowych jak i obciążonych zmianami miażdżycowymi).

## 2.3. Omówienie zawartości rozdziałów pracy doktorskiej

Na rozprawę doktorską mgr inż. Natalii Lewandowskiej składa się siedem rozdziałów, które wraz z dziewięcioma załącznikami stanowią zasadniczą część dysertacji. W pracy przedstawiano mechaniczne podejście do symulacji przepływu krwi przez tętnice szyjne z zastosowaniem metod numerycznej mechaniki płynów (CFD).

We wstępie Autorka wskazuje motywy, które skłoniły ją do podjęcia próby wyjaśnienia przyczyn odkładania się złogów w niektórych obszarach tętnicznych oraz szereg pytań badawczych, które pojawiają się przy analizie tego zjawiska. Wskazuje powszechność występowania zmian miażdżycowych i to już u coraz to młodszych pacjentów. Wstęp zawiera również charakterystykę treści przedstawionych w poszczególnych rozdziałach dysertacji.

W kolejnym rozdziale jest omówienie stanu wiedzy w zakresie prowadzonych badań. W rozdziale tym podana jest najnowsza definicja miażdżycy oraz główne przyczyny (genetyczne i te wynikające ze stylu życia pacjenta) rozwoju tej choroby. Analiza dotychczasowych wyników badań pozwoliła Autorce wyodrębnić trzy parametry przepływowe: *uśrednione w czasie naprężenia ścinające na ściankach naczyń, wskaźnik naprężeń* oraz *względny czas zastoju złogów*, służące do oceny zaburzeń przepływu krwi w tętnicach i, co za tym idzie, możliwości pojawiania się złogów miażdżycowych. Rozdział

ten podsumowano wykazaniem luk w istniejącej wiedzy, na podstawie których sformułowano hipotezę badawczą oraz szczegółowe cele badawcze podane w rozdziale trzecim.

W rozdziale czwartym przedstawione są podstawowe pojęcia dotyczące mechaniki płynów, w tym tensora naprężeń oraz warstwy przyściennej. W prezentowanym przez Autorkę podejściu do niestacjonarnego przepływu krwi w tętnicach przyjęto, że krew, ze względu na swoją niejednorodną budowę, traktowana jest jako ciecz nienewtonowska. Zasadniczą częścią tego rozdziału jest szczegółowy opis wyznaczania pulsacyjnego profilu prędkości krwi. Wzór na pełny bezwymiarowy profil prędkości uzyskano poprzez połączenie dwóch najczęściej stosowanych podejść w modelowaniu prędkości przepływu krwi, tj. modelu Windkessela i modelu Womersleya, uwzględniających elastyczność ścianki tętnicy, jej opór naczyniowy oraz zmienność gradientu ciśnienia. Tak zdefiniowany profil prędkości przepływu krwi w tętnicach stanowił warunek brzegowy w przeprowadzonych w dalszej części pracy symulacjach numerycznych. Porównując wyniki obliczeń z profilami prędkości uzyskanymi na podstawie badań ultrasonograficznych dokonano walidacji nowo wprowadzonego wzoru.

W kolejnym rozdziale przedstawiono procedurę wyznaczania siedmiu parametrów geometrycznych użytych do określenia prawdopodobieństwa odkładania się u pacjentów złożeń miażdżycowych. Parametry te zostały ustalone na podstawie pomiarów geometrycznych rzeczywistych obrazów tętnic szyjnych pięciu pacjentów otrzymanych metodą tomografii komputerowej. Wyniki uzyskane z diagnostyki obrazkowej posłużyły do budowy oraz potem do weryfikacji trójwymiarowych (3D) modeli tętnic. Zastosowana przez Autorkę metoda Taguchi'ego pozwoliła ograniczyć liczbę eksperymentów do ośmiu, tworząc plan o macierzy ortogonalnej dla siedmiu parametrów rozważanych na dwóch poziomach wartości. W rozdziale tym podano również sposób budowy siatki obliczeniowej, długość kroku czasowego zapewniającego stabilność obliczeń oraz przyjęte do symulacji numerycznych warunki brzegowe. Przedstawione jest podejście uśrednione do rozwiązywania niestacjonarnych równań przepływowych wraz z opisem metod wykorzystywanych w obliczeniach w programie Ansys Fluent.

Rozdział szósty zawiera wyniki i wnioski wynikające z symulacji przepływu krwi w tętnicy i dotyczące wartości wybranych w rozdziale drugim parametrów przepływowych, tj. naprężeń stycznych na ściankach, oscylacyjnego wskaźnika ścinania oraz względnego czasu zastoju złożeń. Analiza wpływu parametrów geometrycznych na zmiany wartości zmiennych przepływowych pozwoliła Autorce definiować parametr diagnostyczny, którego weryfikacji dokonano w ostatniej części tego rozdziału.

Ostatni rozdział zawiera zwięzłe podsumowanie wyników badań prowadzących do wskazania, w zależności od wartości zdefiniowanego przez Autorkę parametru diagnostycznego, trzech grupy ryzyka. Przynależność pacjenta do danej grupy określa prawdopodobieństwo rozwoju u niego miażdżycy. W rozdziale tym wskazane są również wady zastosowanego modelu wraz z propozycją jego modyfikacji oraz plany dalszych badań.

### **3. ANALIZA I OCENA ROZPRAWY**

Wybór tematu rozprawy był podyktowany istotnym i aktualnym zagadnieniem, jakim jest poszukiwanie metody pozwalającej określić wpływ ukształtowania geometrii tętnicy szyjnej

na lokalne zaburzenia przepływu krwi, a tym samym na powstawanie zmian miażdżycowych w tętnicach. Stąd ważna jest profilaktyka, która powinna dotyczyć w głównej mierze osób z grupy podwyższonego ryzyka, dla których przed pojawieniem się objawów choroby lekarz mógłby wcześniej określić prawdopodobieństwo rozwoju miażdżycy u pacjenta.

Mając na względzie powyższe informacje, stwierdzam, iż tematyka opiniowanej dysertacji jest aktualna i ważna. Doktorantka zaproponowała w swojej pracy powiązanie ukształtowania geometrii tętnicy szyjnej pacjenta ze wskaźnikami przepływowymi krwi, których nieprawidłowe wartości wskazywać mogą na istnienie zmian miażdżycowych. Wysoko oceniam kompleksowe podejście do realizacji tematyki rozprawy doktorskiej, której kolejne szczegółowe etapy to: zdefiniowanie problemu, odniesienie do rozwiązań wskazywanych w literaturze i stosowanych w diagnostyce medycznej, sformułowanie modeli matematycznych, zaplanowanie badań i systematyczne przeprowadzenie serii symulacji numerycznych dla różnych parametrów z wykorzystaniem komercyjnego oprogramowania CFD, analiza wyników, a finalnie zaproponowanie parametru diagnostycznego wraz z jego weryfikacją i podaniem zakresów referencyjnych. Co warto podkreślić, do symulacji numerycznych oraz analizy wyników wykorzystano rzeczywiste dane pomiarowe, a zaproponowany w pracy parametr diagnostyczny może być naturalnym uzupełnieniem już istniejącej diagnostyki obrazowej.

Muszę w tym miejscu zaznaczyć, że Doktorantka podjęła się bardzo ambitnego i trudnego zadania, wykazując się przy tym bardzo dobrym przygotowaniem z zakresu modelowania numerycznego, planowania eksperymentu, informatyki i mechaniki. Rozprawa doktorska mgr inż. Natalii Lewandowskiej jest pracą interdyscyplinarną zawierającą elementy nowości naukowej, które świadczą o jej dysertabilności. Zaliczyłabym do nich:

1. mechaniczne ujęcie niestacjonarnego przepływu krwi, jako cieczy nienewtonowskiej, przez tętnice szyjne,
2. zbudowanie 3D modelu przepływu krwi przez tętnice i przeprowadzenie szeregu symulacji numerycznych z wykorzystaniem CFD dla szerokiego zakresu wybranych parametrów geometrycznych tętnic i przepływowych krwi wraz z analizą wyników,
3. zdefiniowanie parametru diagnostycznego wraz z jego weryfikacją i podaniem wartości referencyjnych.

Uważam, że nabyta przez Doktorantkę w trakcie wykonywania tej pracy wiedza, umiejętność dostrzegania i formułowania problemów badawczych oraz ich rozwiązywania, analiza uzyskanych wyników badań wraz z ich krytyczną oceną są wystarczające do prowadzenia samodzielnej pracy naukowej w przyszłości.

#### **4. UWAGI, SUGESTIE I SPOSTRZEŻENIA DOT. ROZPRAWY**

Oceniając pozytywnie pracę Doktorantki, chciałabym zwrócić uwagę na niektóre zagadnienia o charakterze dyskusyjnym, a także na uchybienia i usterki zauważone w pracy:

1. W procesie modelowania i symulacji numerycznych szczególną uwagę należy zwrócić na dopracowywanie parametrów siatki obliczeniowej oraz kroku czasowego. Krok czasowy zapewniający stabilność obliczeń jest podany wzorem (5.1). W pracy nie podano jednak sposobu doboru wielkości siatki obliczeniowej zapewniającej zbieżność symulacji oraz jej

weryfikacji. Można tutaj było zastosować metodę opartą np. na wyznaczeniu indeksu zbieżności siatki GCI (ang. *Grid Convergence Index*).

2. Przy siedmiu parametrach geometrycznych na dwóch poziomach wartości pełen plan badań obejmuje  $2^7 = 128$  przypadków. Dlaczego w pracy ograniczono się do ośmiu przypadków, a nie wybrano np. planu połówkowego czy też ćwiartkowego z odpowiednim kontrastem? W tabelicy 5.2 przedstawiono macierzy ortogonalną Taguchi'ego. Czy jest to jedyna macierz ortogonalna w tej metodzie i jakie było kryterium jej wyboru?

3. Jednym z głównych warunków brzegowych wykorzystanych w autorskich symulacjach numerycznych jest pulsacyjny profil prędkości krwi w tętnicy dany poprawnym wzorem (4.33). Przy wyprowadzeniu tego wzoru Doktorantka popełniła jednak szereg błędów. Rozwiązaniem równania (4.21), które jest niejednorodnym zmodyfikowanym równaniem Bessela rzędu zero, jest suma rozwiązania szczególnego i kombinacji liniowej zmodyfikowanych funkcji Bessela pierwszego i drugiego rodzaju rzędu zero  $I_0$  i  $K_0$ , a nie jak podano w (4.22) funkcji  $I_0$  i funkcji Bessela pierwszego rodzaju  $Y_0$ . Również błędnie jest rozwiązanie szczególne tego równania. W konsekwencji, błędy te pojawiają się w kolejnych przekształceniach (4.23) – (4.28). Ponadto, w (4.26) powinno być, że  $B_n=0$ , a nie  $Y_0(0)=0$ . Doktorantka wprowadza w tym fragmencie tekstu (str. 28) dodatkowe oznaczenia ( $k$  i  $\alpha$ ), które są użyte incydentalnie w jednym lub dwóch wzorach co powoduje zamieszanie i czyni tekst niezrozumiałym, a cały proces wyprowadzania wzoru (4.33) niespójnym.

Ze wzorem (4.33) jest związany skrypt generujący profile prędkości zawarty w dodatku C, który ma w nagłówku nazwę „Appendix X”, a w tekście pracy „Załącznik C”.

4. W rozdziale 5.1 Doktorantka charakteryzuje wybrane do dalszych badań parametry geometryczne. Nie są one jednakowoż dostatecznie doprecyzowane. Czytamy np. o wartości mierzonej „około 1 cm przed opuszką”, czy „w odległości 1-2 cm za opuszką”. W pracy nie są też podane błędy pomiarowe parametrów.

5. Proszę o scharakteryzowanie modelu redukującego liczbę równań niezbędnych do otrzymania rozwiązania RANS o którym jest mowa w rozdziale 5.6. Ponadto, na rysunku 5.6 przedstawiającym schemat algorytmu rozwiązywania równań przepływowych pojawia się nazwa „równanie(...)fmean”. Co to jest za równanie? Nawiasem mówiąc, używane w pracy określenie „równanie pędu”, jest kalką z języka angielskiego - w polskojęzycznej literaturze przedmiotu używa się zwrotu „równanie zachowania pędu”.

6. Co znaczy termin „szerokość funkcji” (str. 21) ?

7. W rozdziale 5.7 (str. 41) przy charakterystyce metody objętości skończonych napisane jest, że „Metoda ta wyznacza się naturalną zachowawczością...”. Pomijając oczywistą kwestię niepoprawności językowej należy zapytać, co Doktorantka rozumie pod pojęciem, że „metoda oznacza się naturalną zachowawczością”?

Przy prezentacji tak obszernego materiału badawczego nie sposób uniknąć błędów edytorskich i pewnych nieścisłości. Poniżej podana lista uwag:

- skróty i symbole: Praca zawierająca tak dużą liczbę akronimów powinna mieć dobrze i w pełni opisaną ich listę. W recenzowanej rozprawie lista skrótów jest niekompletna (brak opisu skrótów np. GO, HH, FFT, PIV) oraz zawiera błędy - skrót nazwy „uśrednione w

*czasie naprężenia styczne na ścianach*” jest niepoprawny. Również dużo symboli używanych w pracy nie figuruje w spisie, np.  $a$  – waga (str. 53),  $l$  (str.34, str. 35),  $L$  – długość (str. 26),  $I$  -natężenie prądu,  $U$  – napięcie, (str. 23),  $V$ - objętość (str. 25),  $R$ - promień (str. 29),  $S$ - tensor (str. 41),  $\Phi, \Omega, N$  wzór (5.7).  $\xi$  – krętość tętnicy (str. 8),  $\dot{\gamma}$  wzór (4.6), symbol  $\gamma$  (wzór (4.7)) nie jest w ogóle wyjaśniony w pracy; indeksy  $w, o, blood, ica, cca, eca, bulb, bif$ .

Na określenie wartości minimalnej i maksymalnej parametru Autorka używa dwóch oznaczeń: „1” i „2” np. w tabeli 5.2 oraz I.1 oraz „ $n_{min}$ ” i „ $n_{max}$ ” we wzorze (6.1) co wprowadza zamieszanie.

- błędy we wzorach:

- (4.12) zamiast „ $r$ ” powinno być użyte „ $R$ ”;
- (4.14) i (4.17) zbędny znak „ $=$ ” między znakiem sumy i jej składnikami,
- (6.6) brak indeksu „ $i$ ”;
- (6.8) brak „ $X$ ” na początku wzoru;
- str. 41 brak jest numeru przy ostatnim wzorze na tej stronie;
- str. 55 poniżej rysunku 6.9 jest „ $A_{max}/d_{cca}$ ”, a powinno być „ $A_{max}/A_{cca}$ ”.

- błędy w tablicach:

- Tablica 4.1 – brak danych dotyczących parametru  $\gamma$ ;
- Tablica 4.2 – w ostatnim wierszu powinno być „HH2”, a nie „HH1”;
- Tablica 6.2 – tablica ta zawiera wagi, których suma nie zawsze wynosi jeden; ponadto zamiast nazwy „współczynniki” powinno być użyte określenie „wagi”;
- Tablica I.1 w dodatku I – niepoprawne wzory z sumami (brakuje  $\frac{1}{4}$ ) oraz niepoprawna nazwa parametru diagnostycznego TAWWS zamiast TAWSS.

- bibliografia: w pozycji [5] brak nazwiska jednego z autorów, w [71] brakuje nazwy czasopisma, pozycje [4, 10, 11, 51, 61, 62, 64] nie są cytowane w pracy.

- błędy stylistyczne, gramatyczne, kolokwializmy:

- str. 16: jest „...*opracowanie modeli geometrycznych...*” powinno być „...*opracowanie modeli geometrycznych...*”;
- str. 27: jest „...*zmianę po promieniu...*” powinno być „...*zmianę wzdłuż promienia...*”
- str. 41 poniżej wzoru (5.5): jest „...*schemat numeryczny opisane w [70].*”;
- str. 42: w rozdziale 5.8 jest „...*który pole prędkości uzyskuje się poprzez...*”;
- str. 51 pod rysunkiem 6.7: „*Duże zmiany wskaźnika OSI wpływa na zachowanie czerwonych krwinek...*”;
- str. 53, str. 57: jest „...*średnia ważona po parametrach...*” ,a powinno być „...*średnia ważona parametrów ...*”;
- str. 54 przed tablicą 6.2: „...*który zestaw współczynników najlepiej weryfikuje tętnice podatne na zmiany miażdżycowego.*”

-literówki:

- str. 18 na początku rozdziału 4.2 jest „*siła na powstaje*”, a powinno być „*siła ta powstaje*”;
- str. 33 w zdaniu „*By zachować rzeczywisty tętnicy...*” brakuje słowa „*obraz*”;

- str. 40 przed wzorem (5.1) jest „rok czasowy” zamiast „krok czasowy”; przed wzorem (5.3) jest „otrzymuje” zamiast „otrzymuje”;
- str. 41 na początku rozdziału 5.7 brak przyimka „na” w zdaniu „Metoda objętości skończonych polega zdykretyzowaniu”;
- str. 54 w tytule tablic 6.2 jest „disgnostycznego” zamiast „diagnostycznego”.

- pozostałe błędy:

- str. 35: tłumaczenie na język angielski słów „lewy” i „prawy” jest w tekście przestawione;
- str. 37: podane jest, że „parametry podane są w tabeli D.1 (...) w załączniku H”, a w załączniku H jest Tablica H.1;
- str. 39: niezrozumiały początek zdania „W celu wyznaczenia kroku czasowego niezbędnego to określenie kroku czasowego...”;
- str. 44: powtórzenie zwrotu „Obliczenia były prowadzone...” na początku trzech kolejnych zdań;
- str. 52: ostatnie zdanie jest niezrozumiałe „W następnym rozdziale przedstawiono różne definicje, zależne od przyjętego sposobu wyliczania stałych”.

Przedstawione uwagi nie wpływają na całościową pozytywną ocenę pracy.

## 5. WNIOSEK KOŃCOWY

Tematyka rozprawy mgr inż. Natalii Lewandowskiej jest interesująca i wykazuje charakter nowatorski, a największą jej zaletą jest kompleksowe i interdyscyplinarne ujęcie tematu. Warto podkreślić, iż zbudowanie modelu obliczeniowego, przeprowadzenie symulacji numerycznych i analiz wyników wraz z ich weryfikacją, wymagało dużego zaangażowania Doktorantki i wykazania się umiejętnościami praktycznymi i analitycznymi. Przeprowadzone badania pozwoliły na sformułowanie wniosków o charakterze poznawczym oraz aplikacyjnym, jak też wskazujących dalsze kierunki badań.

Biorąc pod uwagę wartość naukową i poznawczą rozprawy oraz wkład własny Autorki uważam, że praca doktorska mgr inż. Natalii Lewandowskiej pt. *Modelowanie numeryczne i analiza przepływu cieczy nienewtonowskich przez kanały rozgałęzione o ściankach elastycznych w kontekście biomechaniki* spełnia warunki stawiane rozprawom doktorskim, o których mowa w art. 13 ust. 1 ustawy z dnia 4.03.2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. z 2003 r. Nr 65 poz. 595 z późniejszymi zmianami). Przedstawiona dysertacja stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, a Doktorantka wykazała się ogólną wiedzą w dyscyplinie inżynieria mechaniczna i umiejętnością samodzielnego prowadzenia pracy naukowej.

**W związku z powyższym wnioskuję o dopuszczenie pracy do publicznej obrony.**

S. Kwiecińska