

Warszawa 02.12.2021

Dr hab. Jan Poleszczuk, prof. IBIB

Instytut Biocybernetyki i Inżynierii Biomedycznej im. Macieja Nałęcz

Polska Akademia Nauk

jpoleszczuk@ibib.waw.pl

Recenzja pracy doktorskiej mgr Marii Grackiej
pt. *Modeling and analysis of the blood flow using multiphase approach*

Praca przedstawia metodykę modelowania wielofazowego przepływu krwi dla różnych wielkości naczyń krwionośnych, poczynając od aorty wraz z jej początkowymi odgałęzieniami, poprzez mniejsze naczynie wieńcowe, kończąc na poziomie odpowiadającym rozmiarom tętniczek. Praca ma na celu przedstawienie korzyści dla praktycznych zastosowań biomedycznych pochodzących z rozważania w modelach przepływowych krwi jako płynu składającego się z wielu faz, które odpowiadają osoczu oraz różnego rodzaju komórkom.

Modelowanie przepływu krwi i zjawisk zachodzących w układzie sercowo-naczyniowym ma stosunkowo długą historię i jest coraz częściej wykorzystywane przy konstrukcji urządzeń medycznych, czy też opracowywaniu dokładniejszych metod diagnostycznych. W zależności od zastosowania, nie jest jednak jasne na jaki poziom szczegółowości należy zejść w rozważanych modelach i jakie korzyści płyną z zastosowania danego opisu. Wszelkie prace starające się usystematyzować stosowane podejścia i pokazywać korzyści płynące z przyjęcia danej metodologii są bardzo ważne i potrzebne. Praca mgr Grackiej bardzo dobrze wpisuje się w ten nurt.

Praca jest dość obszerna, ma 150 stron i składa się z 7 rozdziałów oraz licznych dodatków zawierających kody źródłowe wykorzystanych programów. Pierwsze dwa to opis istniejących metod modelowania przepływu krwi wraz z przedstawieniem motywacji dla prowadzonych badań. Autorka dobrze przedstawia zarys metod dotychczas rozwijanych na świecie, zjawisk fizjologicznych, które są najciekawsze z punktu widzenia pracy (np. efekt Fåhræus–Lindqvist'a) oraz motywację dla badań związaną z istotnym problemem wysokiej śmiertelności na choroby układu sercowo-naczyniowego w populacji światowej. Jako główny cel prac Autorka stawia przeprowadzenie szczegółowych i wyczerpujących badań numerycznych nad modelowaniem przepływu krwi w ujęciu wielofazowym. Do tej części pracy mogę mieć jedynie zastrzeżenie co do nieco chaotycznego prowadzenia narracji, z licznymi niepotrzebnymi powtórzeniami tych samych informacji. Wydaje mi się również, że w tej części pracy dobrze byłoby wyróżnić kilka hipotez związanych z późniejszymi wynikami.



Główną część pracy stanowią rozdziały od trzeciego do szóstego. W rozdziale trzecim, który jest stosunkowo krótki acz wyczerpujący, Autorka przedstawia podstawy teoretyczne wykorzystanych w pracy modeli. Opis dobrze przedstawia metodykę i koresponduje do dalszych części pracy, ale brakuje mi w nim nieco bardziej wnikliwego opisu przedstawianych równań. Nie jest czasami jasne na jakiej podstawie została przyjęta dana wartość parametru, czy też krótkiej analizy z czym jest związane przyjęcie danego opisu (przykładem są równania (3.2) i (3.3)). Ponadto zdarza się, że parametr równania nie jest opisany w tekście (np. d_s w równaniu (3.11)), czy też pojawia się nadmiarowy nawias (równania (3.6) i (3.7)). Mylące jest również przedstawienie modelu tylko dla dwóch faz (osocze i czerwone krwinki), podczas gdy w rozdziale następnym symulacje wykonywane są dla trzech faz (dodatkowe białe krwinki).

Pierwsze wyniki dotyczące modelowania przepływu krwi w aorcie przedstawione są w rozdziale czwartym. Warte pochwały jest wykorzystanie geometrii początkowej części drzewa tętniczego pochodzącej z rzeczywistego pomiaru klinicznego. W rozdziale przedstawione są z należytą dokładnością dodatkowe założenia i definicje przyjęte w modelu, związane m.in. z koniecznością założenia warunków brzegowych na końcach rozważanych naczyń krwionośnych. Autorka bardzo dobrze ilustruje uzyskane rezultaty wykorzystując jasne i dobrze skonstruowane wykresy. Jasno pokazane są zjawiska fizjologiczne opisywane we wcześniejszych rozdziałach, a wyniki modelu porównywane są z tym co było wcześniej opisywane w literaturze. Dziwi jednak określenie momentu diastoli (Rys. 4.3), który nie jest spójny z tym przyjętym w rozdziale piątym na stronie 67. Trochę niedosytu pozostawia również podrozdział porównujący wyniki z tymi uzyskanymi korzystając z modelu, w którym nie jest rozważany wielofazowy przepływ krwi. Wskazane byłoby również nieco wnikliwsze przeanalizowanie czemu przewidywane wartości ciśnienia są tak istotnie niższe od tych, których spodziewalibyśmy się z pomiarów klinicznych. Ponadto wyjaśnienia wymaga przenikanie się wyników przedstawionych w pracy z tymi zawartymi w publikacji [55], w której Autorka jest piąta na liście współautorów. W publikacji [55] przedstawiony jest bardzo podobny (jeśli nie ten sam) model, a niektóre z wykresów przedstawiają analogiczne wyniki.

W rozdziale piątym, Autorka przedstawia wyniki numeryczne dla symulacji przepływu krwi w naczyniu wieńcowym. Również tutaj warte pochwały jest wykorzystanie rzeczywistej geometrii naczynia. Przedstawione wyniki są dobrze opisane, a ilustracje bardzo dobrze przedstawiają otrzymane wyniki. Autorka również tutaj bardzo dobrze odnosi wyniki modelu do znanych zjawisk fizjologicznych oraz porównuje uzyskane przez siebie wyniki do tych pojawiających się w literaturze. Warto byłoby jednak lepiej nakreślić sposób uzyskania profilu prędkości krwi stanowiący warunek wejściowy dla modelu (Rys. 5.3) – dziwi gwałtowny skok prędkości mający miejsce po zamknięciu zastawki.

Moim zdaniem najbardziej wartościowy i innowacyjny jest rozdział szósty opisujący wyniki symulacji przepływu w mikronaczyńkach, w którym Autorka porównuje uzyskane wyniki bezpośrednio z wynikami eksperymentalnymi. W rozdziale rozważane są dwa układy mikrofluidyczne, w których występują różnego stopnia zwężenia w świetle naczynia. Autorka pokazuje, że rozważane modele bardzo dobrze odzwierciedlają zmierzoną eksperymentalnie prędkość przepływu czerwonych krwinek, jak i grubość warstwy brzegowej, w której nie

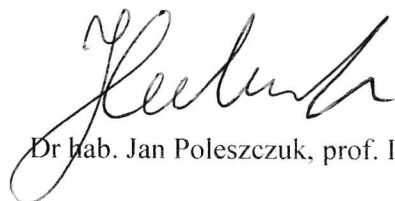
Jell

występują komórki. Co ciekawe, grubość tej warstwy brzegowej jest różna w zależności od zwężenia, co jest bardzo dobrze odzwierciedlone przez wyniki numeryczne.

Końcowe (podsumowujące) rozdziały są dobrze napisane, jednak spodziewałem się nieco obszerniejszego podrozdziału 7.1 zatytułowanego *Guide to modeling of blood flow in a multiphase approach*, który mógłby być wyczerpującym przewodnikiem dla osób, które chciałyby zająć się rozważaną w pracy tematyką. Warto pochwalić jest zamieszczenie w pracy dodatków zawierających kody źródłowe wykorzystanych programów, jednak komentarze w nich zawarte są dość skąpe i nie ułatwiają czytelnikowi ich pełnego zrozumienia. W dzisiejszych czasach mile widziane jest opublikowanie kodów w ogólnodostępnym repozytorium – sugerowałbym Autorce rozważenie stworzenia takowego w momencie próby opublikowania uzyskanych wyników.

Rozprawa jako całość jest spójna tematycznie i dobrze napisana. Znalazłem jedynie kilka literówek i braków (patrz odniesienia na w podrozdziale 7.1). Praca mgr Marii Grackiej jest nietrywialna i wymagająca technicznie, zarówno z punktu widzenia metod numerycznych, jak i podstaw teoretycznych rozważanego zagadnienia. Praca wykazuje ogólną wiedzę teoretyczną Autorki oraz jej umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Praca stanowi znaczący wkład w rozwijanie metod opisu przepływów krwi pod kątem dalszych zastosowań biomedycznych.

Pomimo wymienionych powyżej uwag krytycznych, stwierdzam, że praca z pewnością spełnia ustawowe i zwyczajowe warunki stawiane pracy doktorskiej. Pani Maria Gracka w pełni zasługuje na nadanie stopnia doktora i wnioskuje o dopuszczenie jej do dalszych etapów przewodu doktorskiego.



Dr hab. Jan Poleszczuk, prof. IBIB