

POLITECHNIKA POZNAŃSKA

WYDZIAŁ MASZYN ROBOCZYCH I TRANSPORTU

MGR INŻ. NATALIA LEWANDOWSKA

METODOLOGIA I ZASADA REDAGOWANIA PRAC NAUKOWYCH

ROBOCZY TEMAT PRACY:

CFD analysis of blood flow through the arteries for diagnostic purposes

opiekun naukowy:

prof. dr hab. inż. Michał CIAŁKOWSKI

31 sierpnia 2018

Spis treści

1	Obszar i kierunek badań	2
2	Literatura wymagana do realizacji celu rozprawy doktorskiej	2
2.1	Gdzie szukano literatury	2
2.2	Literatura ogólna	3
2.3	Literatura specjalistyczna	3
2.4	Literatura wysokospecjalistyczna	4
2.5	Literatura pomocnicza - metodyczna	5
2.6	Literatura - inna	5
3	Zakres wiedzy i niewiedzy	6
3.1	Zakres wiedzy	6
3.2	Zakres niewiedzy	6
4	Problem badawczy	7
5	Zasadniczy cel pracy	7
6	Harmonogram prac	7
7	Koncepcja badań	8
8	Określenie metod badawczych	10
9	Spodziewane wyniki i rezultaty	11

1 Obszar i kierunek badań

Ogólny obszar badań: mechanika płynów, komputerowa mechanika płynów (CFD).

Podobszar badań (specjalistycznie zagadnienia):

- przepływ nieściśliwy cieczy nienewtonowskich,
- przepływy z kanałach o ściankach elastycznych,
- zagadnienia z dziedziny chirurgii naczyniowej i neurochirurgii w kontekście geometrii tętnic i biomechaniki przepływu.

2 Literatura wymagana do realizacji celu rozprawy doktorskiej

2.1 Gdzie szukano literatury

Głównym źródłem poszukiwanej literatury są czasopism związanych z biomechaniką przepływów i chirurgią naczyniową. Najważniejsze z nich to:

- Journal of Biomechanics (lista ministerialna: 30 pkt.)
- Journal of Biomechanical Engineering (25 pkt.)
- Stroke (45 pkt.)
- Journal of Vascular Surgery (35 pkt.)
- Journal of Surgical Research (30 pkt.)
- European Journal of Vascular and Endovascular Surgery (35 pkt.)

Prace dot. właściwości ścianek tętnic, modelu krwi i wzrostu tętniaków są poszukiwane głównie w takich czasopismach jak np.:

- Proceedia Engineering,
- Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering (25 pkt.)
- International Journal for Numerical Methods in Biomedical (30 pkt.)
- Journal of the Mechanical Behaviour of Biomedical Materials (35 pkt.)

2.2 Literatura ogólna

Literatura ogólna dotyczy głównie mechaniki płynów. Poznanie podstawowych zjawisk przepływowych i ich matematycznego opisu jest kluczowe dla zrozumienia procesów przepływowych w tętnicy. Główne źródła wykorzystywane do nauki to:

1. Prosnak W., Mechanika Płynów tom I, PWN, Warszawa 1970
2. Ciałkowski M., Mechanika Płynów, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2015
3. White F., Fluid Mechanics 8th edition, McGraw-Hill, 2011
4. von Karman T., Mechanical Similitude and Turbulence, Washington 1931
5. Elsner J., Turbulencja Przepływów, PWN, Warszawa 1987

Do literatury ogólnej zakwalifikowano również literaturę z dziedziny numeryki, silnie korelującą z mechaniką płynów. Ponadto uzupełniania jest wiedza z matematyki, więc literatura ogólna obejmuje również podręczniki z matematyki:

1. Bjorck A., Dahlquist G., Metody numeryczne, PWN, 1987
2. Kincaid D., Cheney W., Analiza numeryczna, WNT, 2007
3. Maćkiewicz A., Algorytmy algebry liniowej, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, 2002

2.3 Literatura specjalistyczna

Literatura specjalistyczna obejmuje głównie zagadnienia związane z biomechaniką przepływów. Są to głównie artykuły opisujące zachowanie się różnych parametrów przepływowych krwi pod wpływem modyfikacji geometrii. Istotą literatury specjalistycznej jest wyjaśnienie zjawisk przepływowych. Wiele artykułów, które kwalifikują się do literatury specjalistycznej dotyczą teoretycznego opisu zjawisk np. pompowania krwi przez serce, zachowania się ciśnienia i prędkości krwi po jej „wypchnięciu” z komorę sercowej oraz tłumaczą one proces formowania się tętniaków. Przykłady artykułów:

1. Catanho, M., Sinha, M., Vijayan, V. BENG 221-Mathematical Methods in Bioengineering Model of Aortic Blood Flow Using the Windkessel Effect. (2012).

2. Morales, H. G., Larrabide, I., Geers, A. J., Aguilar, M. L., Frangi, A. F., Newtonian and non-Newtonian blood flow in coiled cerebral aneurysms, *J. Biomech.* 46, 2158–2164, 2013.
3. Golam Rabby, M., Razzak, A., Mamun Molla, M., Pulsatile non-Newtonian blood flow through a model of arterial stenosis. *Procedia Eng.* 56, 225–231, 2013.
4. Reichmann, B. L., Flow Velocities in the External Carotid Artery Following Carotid Revascularization, *European Journal of Vascular and Endovascular Surgery*, doi:10.1016/j.ejvs.2013.07.002, 2013
5. Wesseling, K. H., Jansen, J. R. C., Settels, J. J., Schreuder, J. J., Computation of aortic flow from pressure in humans using a nonlinear, three-element model., *Journal of Applied Physiology*, doi: 10.1152/jappl.1993.74.5.2566, 2018
6. Bijari, P. B., Wasserman, B. A., Steinman, D. A., Carotid bifurcation geometry is an independent predictor of early wall thickening at the carotid bulb, *Stroke*, doi:10.1161/STROKEAHA.113.003454, 2014

2.4 Literatura wysokospecjalistyczna

Literatura wysokospecjalistyczna dotyczy głównie zastosowań metod numerycznych w przepływie krwi przez tętnice. Obejmuje ona artykuły naukowe, materiały konferencyjne i rozprawy doktorskie. Zagadnienia występujące w literaturze wysokospecjalistycznej dotyczą głównie symulacji przepływu przez tętnicę szyjną i fragmentów koła Willisa (zbioru rozgałęzionych tętnic mózgowych). Rozważane są również przypadki, w których autor nie precyzuje rodzaju tętnicy, natomiast skupia się bardziej na parametrach przepływowych i ich wpływie na niektóre schorzenia naczyńiowe.

1. Olufsen, M. S., Numerical Simulation and Experimental Validation of Blood Flow in Arteries with Structured-Tree Outflow Conditions., *Ann. Biomed. Eng.* 28, 1281–1299, 2000
2. Van Steenhoven, A. A., Van De Vosse G., Experimental and Numerical Analysis of Carotid Artery Blood Flow, *Monogr Atheroscler.* Basel, Karger 15, 250–260, 1990
3. Sarkar Shishir, S., Abdul Karim Miah M., Sadrul Islam A., Toufique Hasan A., Blood Flow Dynamics in Cerebral Aneurysm - A CFD Simulation. *Procedia Eng.* 105, 919–927, 2015.

4. Shamloo, A., Nejad M. A., Saeedi M., Fluid–structure interaction simulation of a cerebral aneurysm: Effects of endovascular coiling treatment and aneurysm wall thickening, J. Mech. Behav. Biomed. Mater. 74, 72–83, 2017

2.5 Literatura pomocnicza - metodyczna

Literatura typu metodycznego wspierająca wyciągnięcie właściwych wniosków ze zrealizowanych badań oraz prawidłowe napisanie rozprawy doktorskiej:

1. Wisłocki K., Metodologia i redakcja prac naukowych, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, 2013

Do literatury pomocniczej zakwalifikowano również wszelkiego rodzaju tutoriale, podręczniki użytkownika i materiały pomocnicze do wykorzystywanego oprogramowania:

- do tworzenia geometrii i siatek: Ansys ICEM CFD,
- do analizy numerycznej: Ansys Fluent oraz OpenFOAM,
- podręczniki do nauki programowania w języku Python i C++.

2.6 Literatura - inna

W rozprawie doktorskiej będą przedstawione rozszerzone wyniki badań, które rozpoczęto już przy pisaniu pracy magisterskiej. Część z nich już opublikowano w ramach materiałów konferencyjnych. Będą one bazą do napisania pracy doktorskiej. Poniższe artykuły zostaną również opublikowane (w rozszerzonej wersji) w monografii *“New Developments on Computational Methods and Visualization in Biomechanics and Biomedical Engineering”* wydawanej przez wydawnictwo Springer.

1. Ciałkowski, M., Lewandowska N., Micker M., The Impact of Patches on Blood Flow Disorders in Carotid Artery, 15th International Symposium on Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering, 2018
2. Lewandowska, N., Ciałkowski M., Micker M.: Numerical Study of Carotid Bifurcation Angle Effect on Blood Flow Disorders, 15th International Symposium on Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering, 2018
3. Micker, M., Lewandowska N., Ciałkowski M., Physical Foundations for the Selection of Diagnostic Parameters of Atherosclerotic Plaque Growth, 15th International Symposium on Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering, 2018

3 Zakres wiedzy i niewiedzy

3.1 Zakres wiedzy

Stan wiedzy dotyczący biomechaniki przepływów jest bardzo wysoko rozwinięty:

- istnieją modele odwzorowujące bardzo dobrze właściwości reologiczne krwi, które zaimplementowane do modelu tętnicy dają bardzo dobre rezultaty;
- bardzo solidne podstawy analityczne opisujące przepływ płynu nienewtonowskiego za pomocą równania zachowania pędu;
- duża baza badań reologicznych krwi, właściwości wytrzymałościowych ścianek tętnicy;
- bardzo dobrze udokumentowane zdjęcia tętniaków i zwężonych tętnic.

3.2 Zakres niewiedzy

Pomysł na pracę zrodził się podczas współpracy z chirurgami naczyniowymi. Okazuje się, że nieznane są przyczyny występowania niektórych schorzeń. Przeprowadzane obecnie analizy zwykle odzwierciedlają obecny stan rzeczy, i bardzo rzadko na podstawie pola przepływowego dokonuje się przewidywań dalszego rozwoju zmiany chorobowej. Inaczej mówiąc, modele numeryczne przepływu krwi w tętnicach nie służą jako narzędzia diagnostyczne. Wykonywany w pracy doktorskiej model jest na bieżąco konsultowany z chirurgami, głównie ze względu na to, że będą oni w przyszłości wykorzystywać go do diagnostyki pacjentów.

Luki w wiedzy, których próba zapewnienia zostanie podjęta podczas realizacji przewodu doktorskiego:

- brak fizycznych podstaw kwalifikacji pacjentów do operacji usunięcia złogów (chirurdzy zwykle kwalifikują pacjentów na podstawie przeczucia i doświadczenia),
- brak znormalizowanych geometrii łatek operacyjnych wszywanych w miejsce rozcięcia tętnicy,
- do dzisiaj nie wiadomo, dlaczego niektóre tętniaki pękają a inne przez lata nie zmieniają swoich wymiarów.

4 Problem badawczy

Najważniejszym problemem badawczym jest umożliwienie stosowania modelu jako narzędzie diagnostyczne. Rozwiązanie tego problemu wymaga wdrożenia wielu parametrów, które będą traktowane jako dane wejściowe o zmiennych wartościach. Model musi być również obudowany w przyjazny chirurgom interfejs.

5 Zasadniczy cel pracy

Model numeryczny jako narzędzie diagnostyczne.

Cele pośrednie:

- na podstawie analizy pola przepływowego, głównie prędkości i wielkości tworzących się wirów, być w stanie określić prędkość narastania złożeń w tętnicy i na tej podstawie określić po jakim czasie poziom zablokowania światła tętnicy jest na tyle duży, że ryzyko operacyjne związane z usunięciem złożeń jest mniejsze od ryzyka „zatkania” tętnicy,
- FSI (połączenie analizy pola przepływowego z analizą wytrzymałościową materiałów) tętniaków: stworzenie symulacji pozwalającej przewidzieć proces narastania tętniaka i czas jego pęknięcia.

6 Harmonogram prac

Na rysunku 1 przedstawiono harmonogram prac. Koncepcje prowadzenia badań szczegółowo opisano w rozdziale 7.

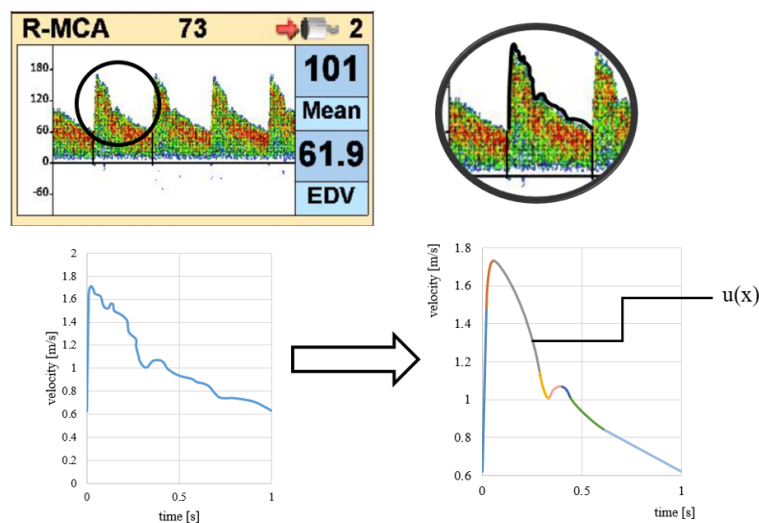
zadanie:	2018		2019		2020		2021	
	I	II	I	II	I	II	I	II
1. Analiza literatury								
2. Nauka oprogramowania i analizy numerycznej								
3. Badania numeryczne i analiza geometrii rzeczywistych tętniaków								
4. Opracowanie warunków brzegowych na wlotach i wylotach								
5. Eksperyment - walidacja modeli turbulencji								
8. Stworzenie modelu bifurkacyjnego								
7. Prace nad modelem elastycznej ścianki								
9. Tworzenie programu								
10. Symulacje FSI tworzenia się tętniaków								
11. Pisanie rozprawy doktorskiej								
12. Obrona rozprawy doktorskiej								

Rysunek 1: Harmonogram prac

7 Koncepcja badań

Analiza literatury trwa przez cały okres studiów doktoranckich. Pierwsze dwa lata doktoratu obejmują naukę oprogramowania i języków programowania: zapoznanie się z oprogramowaniem do FSI, naukę języków: C++ i Python pod kątem analizy danych i tworzenia interfejsu. Nauka oprogramowania uwzględnia również zdobycie doświadczenia poprzez modelowanie w opensource’wym programie OpenFOAM.

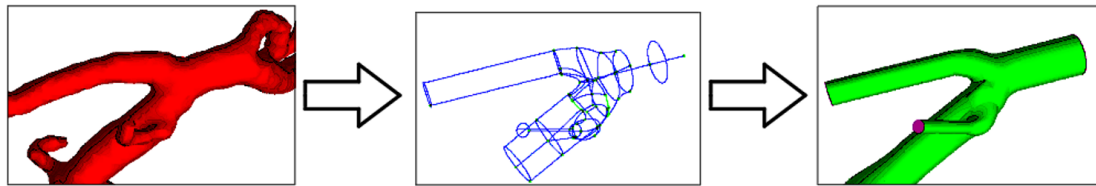
Zadania postawione na pierwszy rok doktoratu są już w większości zrealizowane. Opracowano autorski program do tworzenia funkcji pulsacyjnego profilu prędkości na podstawie zdjęć z ultrasonografu. Program po wczytaniu obrazu, wyznacza funkcję prędkości poprzez aproksymację wielomianem metodą najmniejszych kwadratów (Rys.2). Następnie funkcja prędkości jest wykorzystywana do wyznaczenia profilu ciśnienia na wylocie z tętnicy przy wykorzystaniu modelu Windkessela. Oprócz profilu prędkości, danymi wejściowymi do modelu Windkessela są również parametry związane z lepkością, gęstością krwi oraz geometrią tętnicy. Program jest napisany w języku Python i kod dostępny jest na Githubie. Kolejne pół roku zostanie przeznaczone na dostosowanie pozostałych zmiennych wejściowych do tętnic naczyniowych i mózgowych oraz uwzględniania w ich wartościach nienewtonowskich właściwości krwi.



Rysunek 2: Aproksymacja profilu prędkości

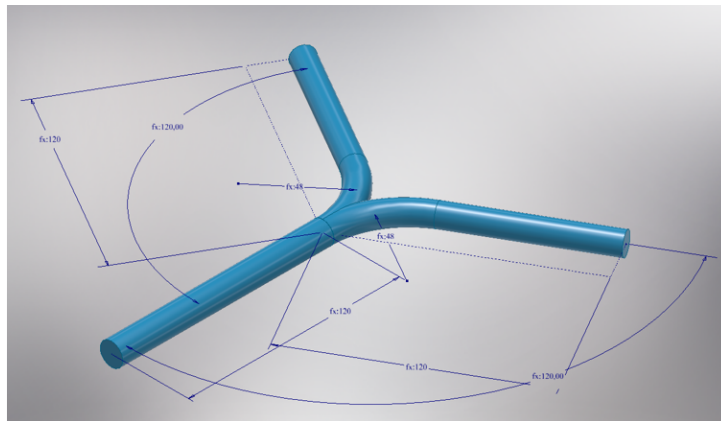
Wszystkie wprowadzane modyfikacje są za każdym razem wdrażane do modelu i zostają przeprowadzane na geometriach tętnic rzeczywistych pacjentów otrzymanych w postaci plików DICOM od neurochirurgów i chirurgów naczyniowych. Model trójwymia-

rowy jest uzyskiwany metodą segmentacji tętnicy z programie 3DSlicer oraz wygładzany powierzchniowo w programie ICEM CFD (rys. 3). Tworzenie geometrii tym sposobem jest bardzo czasochłonne, dlatego cały czas trwają poszukiwania lepszej metody obróbki geometrii. Obecnie jest tworzony artykuł, w którym na fragmencie koła Willis'a bada się wpływ mniejszych tętniczek na przepływ (co w rozprawie doktorskiej posłuży jako uzasadnienie pominięcia niektórych mniejszych tętnic występujących w rzeczywistych warunkach).



Rysunek 3: Proces tworzenia geometrii

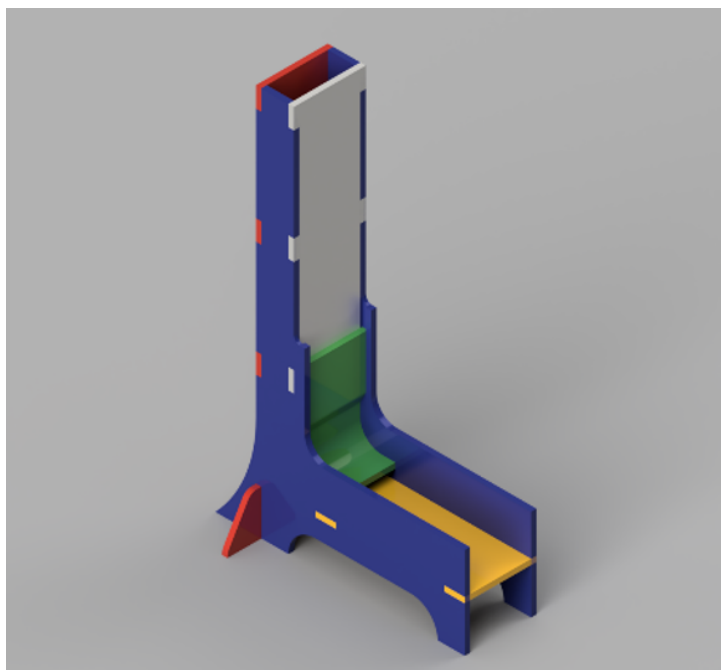
Rozpoczęto również prace na stworzeniem modelu bifurkacyjnego tętnicy szyjnej. Obecnie stworzony model geometryczny (w programie Inventor, rys. 4) jest w pełni sparametryzowany: można zmieniać poszczególne wartości średnic tętnic, ich długości oraz kąty rozgałęzienia. Obecnie trwają próby stworzenia siatki strukturalnej dla tego modelu, w celu porównania wyników obliczeń z siatką niestructuralną (wyniki tego porównania będą opisane w oddzielnym artykule).



Rysunek 4: Geometryczny model rozgałęzienia

Zadania na przyszły rok obejmują bardziej zaawansowane prace: nad modelem elastycznej ścianki (wymagają one dogłębnych badań w dziedzinie wytrzymałości materia-

łów) i stworzenie stanowiska do walidacji stosowanych w modelach turbulencji (czasopisma związane stricte z numeryczną mechaniką płynów wymagają walidacji i głównie na ten cel jest tworzone stanowisko). Koncepcja stanowiska została już opracowana w programie Fusion 360 (rys. 5). Będzie ona rozwijana w drugiej połowie 2019 roku.



Rysunek 5: Koncepcja stanowiska laboratoryjnego

Ostatni rok doktoratu będzie poświęcony na symulacje FSI, tworzenie programu (głównie pod kątem jego optymalizacji i interfejsu, ponieważ części składowe będą już stworzone wcześniej) oraz pisanie rozprawy doktorskiej (jednak na tym etapie założono, że część teoretyczna doktoratu będzie już gotowa). Obrona pracy jest planowana na początek drugiej połowy 2021 roku. Otwarcie przewodu doktorskiego nastąpi we wrześniu 2018 roku. Rozprawa będzie napisana w języku angielskim.

8 Określenie metod badawczych

Badania numeryczne będą prowadzone w środowisku AnsysFluent. Na stan obecny, planuje się przeprowadzenie tych samych symulacji za pomocą oprogramowania OpenFOAM. Ansys Fluent jest oprogramowaniem płatnym, co uniemożliwia rozpowszechnienie modelu na szerszą skalę. Jest jednak bardzo dobrze zoptymalizowany i pozwala

uzyskać miarodajne rezultaty bez potrzeby wdrażania skomplikowanych procedur numerycznych. Model ten zostanie później "przeniesiony" do OpenFOAM'a i za pomocą modyfikacji kodu zostanie podjęta próba uzyskania wyników symulacji podobnych do tych, jakie uzyskano za pomocą Fluenty.

9 Spodziewane wyniki i rezultaty

Stworzony model będzie w możliwie jak największym stopniu odzwierciedlał warunki rzeczywiste. Oczywiście jest, że nie jest realne, by jakikolwiek model w pełni odzwierciedlał rzeczywisty przepływ krwi. Rezultatem pracy ma być uzyskanie modelu, którego stopień dokładności będzie wystarczający dla chirurgów do diagnozy i przewidywania rozwoju schorzeń.

Oprogramowanie będzie mogło być wykorzystywane w trzech (lub czterech) zasadniczych celach:

- przewidywanie czasu wzrostu złożeń do poziomu niebezpiecznego,
- klasyfikacja pacjentów do grupy ryzyka poprzez genetycznie uwarunkowaną niekorzystną geometrię tętnicy szyjnej,
- dostosowanie geometrii łatki operacyjnej wszywanej w miejsce rozcięcia tętnicy.

Czwartym zastosowaniem modelu byłaby możliwość przewidywania wzrostu i ewentualnego pęknięcia tętniaka. Jednak na tym etapie prac nie jest pewne, czy badania daną spodziewany efekt i czy nie będzie wymagane wdrożenie dodatkowych zagadnień i parametrów. Dlatego nie jest to obecnie zaliczane do „pewnych” wyników uzyskanych w rozprawie doktorskiej. Jeśli model nie będzie spełniał wymagań odnośnie symulowania wzrostu tętniaków, w rozprawie zostaną opisane dotychczas uzyskane rezultaty i plan rozwoju tych badań w przyszłości.

Istotną zaletą stworzonego modelu będzie jego dostępność. Będzie on rozpowszechniony w postaci oprogramowania open-source'owego, z którego każdy będzie mógł korzystać, ulepszać i modyfikować wg własnych potrzeb. Zostanie również on przetestowany przez nie tylko chirurgów, z którymi została nawiązana współpraca, ale też ludzi zajmujących się biomechaniką przepływów. Planuje się również rozszerzenie modelu (po doktoracie) do innych zagadnień związanych z chirurgią naczyniową:

- wprowadzenie parametrów pozwalających na symulację przepływu w tętnicy udowej,

- implementacja stentów w tętnicy i badania zaburzeń przepływu pod wpływem ich wprowadzenia,
- symulacja wzrostu tętniaków w tętnicy udowej i ich ewentualnych nieszczelności poprzez zjawisko przesączania,
- wprowadzenie możliwości „sztucznego” osłabiania ścianki w miejscach, w których często dochodzi do tworzenia tętniaków.