

Politechnika Poznańska
Wydział Budowy Maszyn i Zarządzania



Modelowanie i symulacja zagadnień biomedycznych

Analiza przepływu krwi przez aortę brzuszną z tętniakiem

Daria Kandel
Roksana Niewińska
Katarzyna Pilczuk

Poznań 2016

Spis treści

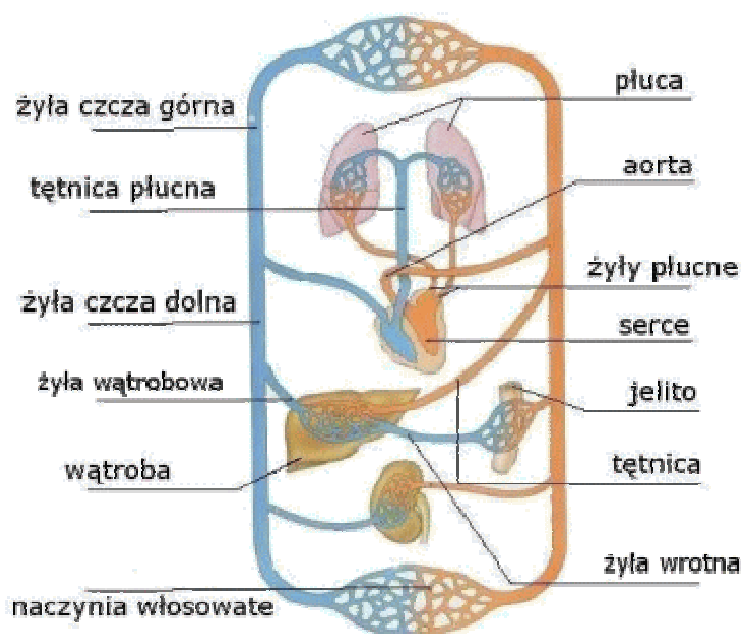
1. Wstęp teoretyczny	2
1.1. Układ krwionośny	2
1.1.1. Naczynia	3
1.1.2. Krew	4
1.2. Tętniak aorty brzusznej	6
1.3. Przepływ krwi.....	7
1.4. Równanie Naviera – Stokesa	10
1.5. Metody elementów skończonych	11
2. Modelowanie	13
2.1. Model zdrowej aorty brzusznej	13
2.2. Model aorty brzusznej z tętniakiem.....	15
3. Założenia symulacji	17
3.1. Właściwości materiałowe	18
3.2. Warunki brzegowe.....	19
3.3. Siatka	21
4. Analiza i symulacja przepływu krwi	23
4.1. Zdrowa aorta brzuszna.....	23
4.2. Aorta brzuszna z tętniakiem	28
5. Podsumowanie i wnioski	34
6. Bibliografia	35

1. Wstęp teoretyczny

1.1. Układ krwionośny

Układ krążenia zbudowany jest z zamkniętego systemu naczyń krwionośnych, które pod wpływem rytmicznych impulsów serca transportują nieustannie przez organizm krew [2]. Narządem, który spełnia najważniejszą funkcję w układzie krążenia jest serce. Pełni ono rolę pompy tłoczącej krew do tętnic, których zadaniem jest rozprowadzanie krwi do tkanek i narządów.

Przepływ krwi uwarunkowany jest istnieniem różnicy ciśnień na obu końcach układów. Źródłem energii dla podtrzymania gradientu ciśnieniowego jest praca serca, a dokładniej skurcz komór. Każda z komór otrzymuje krew z przedsionka jednego z dwu obiegów: małego i dużego. Dzięki temu krążenie płucne (krążenie małe) i krążenie duże są ze sobą połączone przez serce. Oznacza to, że objętość krwi przepływającej w krwioobiegu małym i dużym jest taka sama w jednostce czasu. Wielkość gradientu ciśnieniowego jest różna dla obu obiegów. W krążeniu małym wynosi 5-8 mm Hg (0,8 kPa), a w dużym 90 mm Hg (12 kPa) [1].



Rys. 1. Budowa układu krążenia [1]

1.1.1. Naczynia

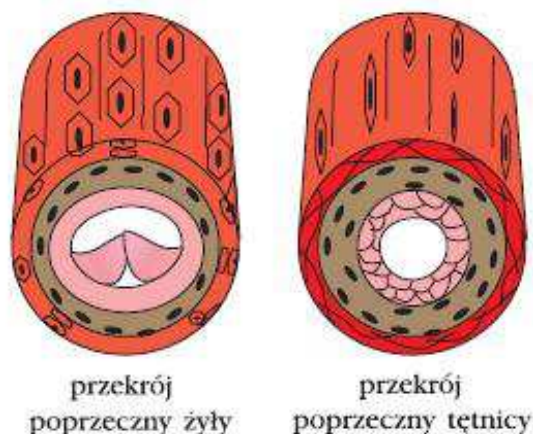
Tętnice są naczyniami o grubych, elastycznych ściankach i niewielkiej średnicy. Krew płynie w nich pod większym ciśnieniem niż w żyłach, dlatego ich wytrzymałość musi być znacznie większa. Mogą kurczyć się i rozkurczać, co zapewnia jednolity przepływ krwi.

Tętnice składają się z trzech warstw:

- zewnętrznej, którą stanowi tkanka łączna z włóknami sprężystymi, nerwami i naczyniami krwionośnymi,
- środkowej, utworzonej z mięśni gładkich,
- wewnętrznej, którą buduje jednowarstwowy nabłonek [4].

Krew w **żyłach** płynie pod mniejszym ciśnieniem niż w tętnicach, dlatego ich ścianki są znacznie niej elastyczne oraz cieńsze. Mają podobną budowę co tętnice, również składają się z trzech warstw. W żyłach znajdują się zastawki, które zapobiegają cofaniu się krwi (krew płynie przeciwnie do siły ciężkości [4]).

Zasadniczym różnicami pomiędzy żyłami i tętnicami są ich funkcje. Żyły doprowadzają krew do serca z narządów i tkanek ciała, podczas gdy tętnice odprowadzają krew z serca do narządów i tkanek ciała. W tętnicach panuje znacznie wyższe ciśnienie niż w żyłach. Żyły i tętnice różnią się od siebie również grubością ścianek i średnicą; ściany żył są cienkie, a ich średnica jest większa od średnicy tętnic. Tętnice są z kolei grube i mają niewielką średnicę.



Rys. 2. Przekroje poprzeczne przez żyłę i tętnicę. [3]

Przepływ krwi w układzie żylnym różni się znacząco od przepływu w układzie tętniczym. Wielkość ciśnienia w tętnicach zależy od ilości dopływającej krwi i odpływu krwi ze zbiornika tętniczego. W zależności od fazy cyklu serca, wartość ciśnienia w układzie tętniczym ulega znacznym wahaniom. Ciśnienie tętnicze jest najwyższe podczas wyrzutu krwi z lewej komory serca i wynosi ok. 16 kPa, natomiast podczas napełniania komór krwią z przedsionków jest najniższe i wynosi ok. 12 kPa.

1.1.2. Krew

Krew to tkanka płynna, krążąca w układzie krwionośnym zamkniętym (naczyniach krwionośnych) oraz w układzie krwionośnym otwartym (jama ciała). Krew składa się z osocza i elementów morfotycznych:

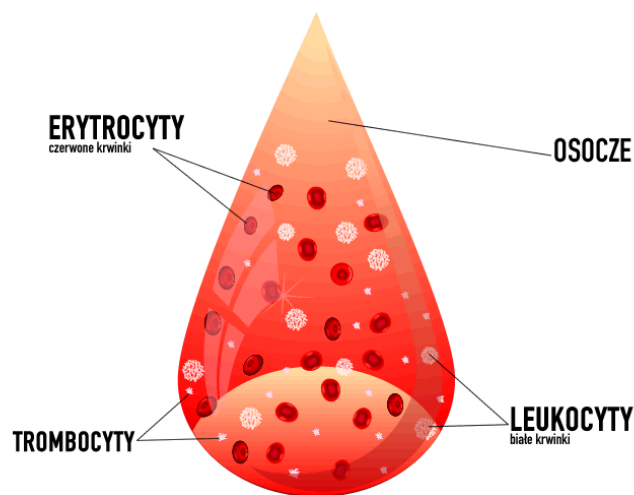
- erytrocytów,
- leukocytów
- trombocytów.

Głównym składnikiem osocza jest woda, która stanowi 91-92% składu. Pozostałe składniki to białka takie jak albuminy, globuliny α , β , γ oraz fibrynogen. Inne substancje występujące w osoczu to jony (Na^+ , K^+ , Ca^{++} , Mg^{++} , Cl^-), substancje odżywcze, substancje regulujące czy produkty przemiany materii. Osocze krwi wraz z płynem pozakomórkowym, pozanaczyniowym i limfą jako środowisko wewnętrzne ma właściwości homeostatyczne. Niezmiennosc składu i objętości tych płynów oznacza, że pomimo różnorodnych procesów przemian i reakcji, czynności fizjologiczne pozostają praktycznie niezachwiane, zwłaszcza równowaga kwasowo-zasadowa (pH krwi), ciśnienie osmotyczne, ciśnienie onkotyczne oraz skład jonowy [1].

Dojrzałe erytrocyty są okrągłymi, bezjądrzastymi, dwuwklęsłymi dyskami o średnicy 7-7,5 mikrometra. Ich budowa jest dostosowana do przenikania przez wąskie kapilary. Zadaniem krwinek czerwonych jest wiązanie tlenu i dostarczanie go tkankom, a także transport dwutlenku węgla z tkanek do płuc.

Leukocyty, czyli białe krwinki, wraz z narządami limfatycznymi i specjalnymi białkami tworzą układ immunologiczny. Ich zadaniem jest ochrona organizmu przed patogenami, takimi jak wirusy i bakterie. Liczba leukocytów w organizmie waha się od 4–10 tys./mm³.

Trombocyty to bezjądrowe fragmenty komórek funkcjonalnych. Powstają w szpiku kostnym, ich liczba w organizmie ludzkim wynosi 150-400 tys./μl, a ich żywotność wynosi około 10 dni. Główną rolą płytek krwi jest udział w procesach krzepnięcia. Gdy dochodzi do przerwania ciągłości tkanki, trombocyty natychmiast osiadają na macierzy podściółkowej, gdzie tworzą czop płytkowy.



Rys. 3. Budowa krwi [1]

Krew pełni funkcję transportową, odpornościową oraz termoregulacji. W funkcji transportowej jej głównym zadaniem jest przenoszenie tlenu do tkanek oraz odprowadzanie z nich dwutlenku węgla. Ponadto ważną rolę pełni zarówno przy zaopatrywaniu komórek w substancje odżywcze np. glukozę, kwasy tłuszczowe, aminokwasy czy witaminy, jak i przy usuwaniu produktów przemiany materii.

Krew pod kątem mechaniki płynów, nie jest płynem spełniającym warunki Newtona. Jest to płyn plastyczno-lepki, a jego lepkość zależy od:

- hematokrytu (stosunek objętości krwinek do objętości krwi),
- temperatury,
- przekroju naczynia.

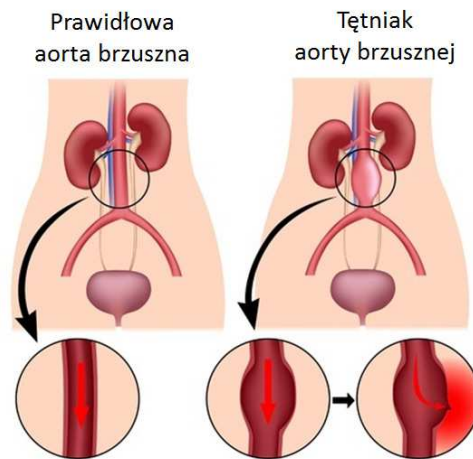
1.2. Tętniak aorty brzusznej

Tętniak jest chorobą tętnic, która objawia się wypukleniem tętnicy w miejscu gdzie doszło do uszkodzenia ściany. Najczęstszą lokalizacją występowania patologii jest odcinek poniżej odejścia tętnic nerkowych. W worku tętniaka zazwyczaj znajduje się skrzeplina, która może być źródłem zatorów obwodowych.

Tętniakiem nazywamy odcinkowe poszerzenie aorty powyżej 50% średnicy odpowiedniej dla wieku chorego. Ściana aorty zbudowana jest z trzech warstw. Jeśli rozszerzenie dotyczy wszystkich warstw, a ściana naczynia pozostaje nienaruszona, mówimy o tętniaku prawdziwym. Ścianę tętniaka rzekomego tworzy natomiast wyłącznie przydanka oraz otaczające tkanki. Inne podziały opierają się na lokalizacji zmiany (tętniaki aorty piersiowej i brzusznej) oraz na kształcie tętniaka (tętniaki wrzecionowate i workowate).

Tętniaki aorty brzusznej najczęściej występują u osób cierpiących na nadciśnienie tętnicze, chorobę niedokrwienną serca oraz przewlekłe niedokrwienie kończyn dolnych. Badaniem, które pozwala rozpoznać tętniaki jest USG jamy brzusznej. Pozwala ono nie tylko stwierdzić samo istnienie tętniaków, ale również określić ich wielkość, usytuowanie w stosunku do tętnic nerkowych. Gdy USG nie daje jednoznacznej odpowiedzi wykonuje się tomografię komputerową.

Pęknięcie tętniaka aorty wiąże się z wystąpieniem bardzo silnego bólu oraz objawów wstrząsu (bładość skóry, przyspieszenie tętna i oddechu, spadek ciśnienia, poty, zaburzenia świadomości). W zależności od tego, gdzie gromadzi się wynaczyniona krew, mogą wystąpić również takie objawy, jak powiększenia obwodu brzucha, krwiak okolicy krocza i moszny, krwista biegunka lub krwawe wymioty.



Rys. 4. Porównanie prawidłowej aorty brzusznej z tętniakiem aorty.[5]

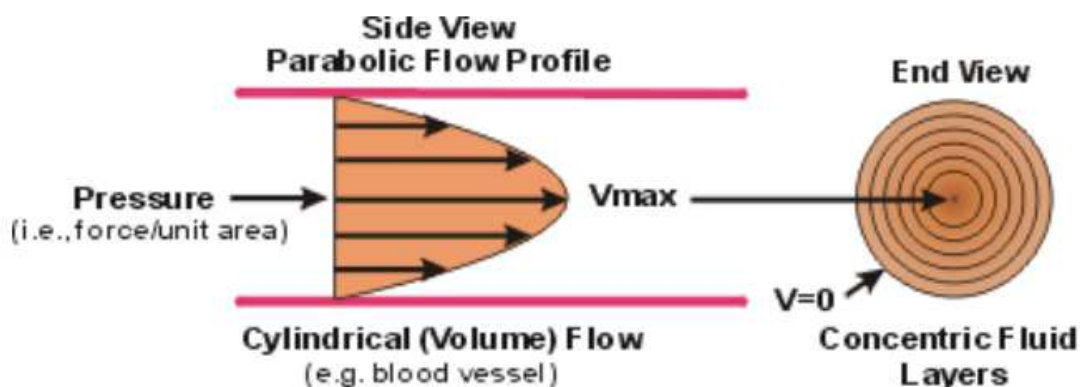
1.3. Przepływ krwi

Krew w układzie krążenia wprowadzana jest w ruch siłą, wytwarzaną przez gradient ciśnienia, zwany ciśnieniem napędowym. Gradient ciśnienia, w krążeniu systemowym, jest różnicą ciśnienia pomiędzy początkiem tego krążenia w aorcie, a jego końcem w prawym przedsionku i utrzymywany jest dzięki nieustannej pracy serca. Średnie ciśnienie krwi w aorcie wynosi ok. 100 mmHg, w prawym przedsionku ok. 5 mmHg, wartość gradientu ciśnienia w dużym krążeniu wynosi więc 95 mmHg. Ciśnienie napędowe przewyższa tarcie i nadaje ruch krwi.

Przy założeniu nieodkształcalnych ścian naczyń krwionośnych, przepływ możliwy jest tylko wówczas, gdy występuje ciśnienie napędowe. W momencie ustania pracy pompy (serca), gdy ciśnienie napędowe spada do zera, ustaje także przepływ. Natomiast w naczyniach krwionośnych, dzięki sprężystym właściwościom naczyń, przepływ możliwy jest również w czasie przerwy występującej między skurczami serca.

Przepływ krwi w układzie krążenia jest na ogół przepływem laminarnym. Charakteryzuje się on występowaniem koncentrycznych warstw krwi przepływającej wzdłuż naczyń. Największa prędkość przepływu (V_{max}) obserwowana jest w centrum naczynia. Najniższa prędkość przepływu ($V=0$) obserwowana jest przy ścianie naczynia. Profil rozkładu wektorów prędkości przepływu ma kształt paraboliczny.

Przepływ laminarny zachodzi wzdłuż długich i prostych naczyń krwionośnych w warunkach przepływu stacjonarnego.



Rys.5. Przepływ laminarny

Przepływ burzliwy (turbulentny) kojarzony jest głównie z aortą i rozgałęzieniem dużych tętnic. Występuje gdy prędkość cieczy przekroczy wartość krytyczną określoną przez liczbę Reynoldsa.

$$Re = \frac{\rho dv}{\eta}$$

gdzie:

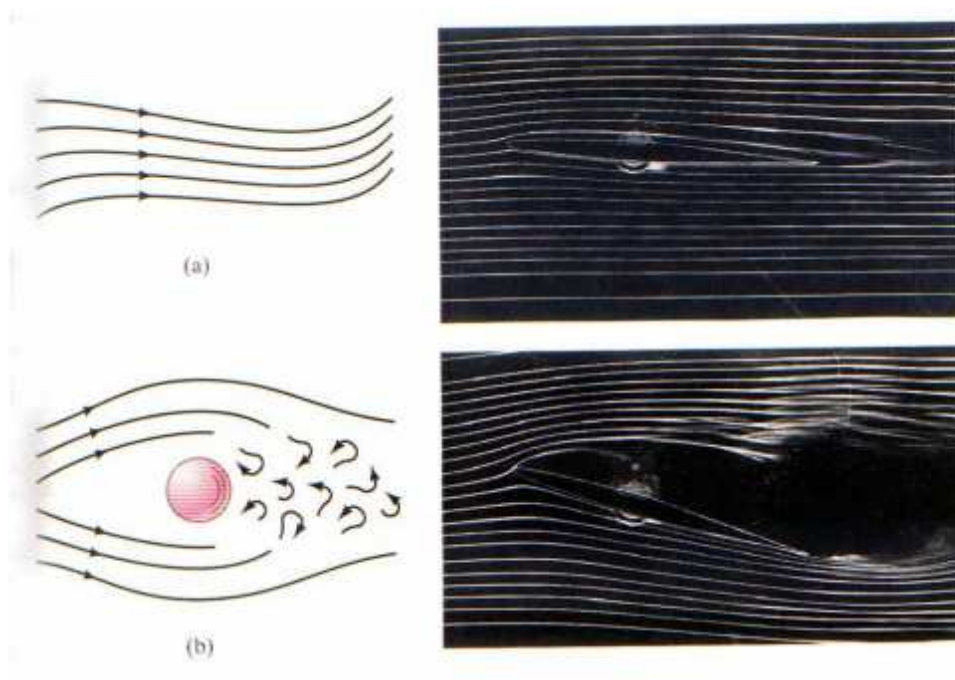
ρ – gęstość cieczy,

d – średnica rurki,

v – prędkość cieczy,

η – lepkość.

Gdy $Re < 2300$ to przepływ jest laminarny, dla $Re > 3000$ przepływ jest burzliwy. Pomiędzy $2300 < Re < 3000$ mamy do czynienia ze stanem niestacjonarnym (niestabilnym).



Rys. 6. (a) przepływ laminarny (b) przepływ turbulentny

Istnieje również inne prawo opisujące przepływ cieczy, łączące ciśnienie, lepkość oraz wymiary naczynia. Prawo Hagen-Poiseulle'a wyrażone jest w postaci:

$$F = \Delta P \frac{\pi}{8} \frac{1}{\eta} \frac{r^4}{L}$$

Gdzie:

r- promień naczynia,

L- długość naczynia,

η - lepkość cieczy,

ΔP - różnica ciśnień (ciśnienie napędowe)

1.4. Równanie Naviera – Stokesa

Równanie Naviera-Stokesa opisuje zasadę zachowania pędu dla poruszającego się płynu. Według niego zmiany pędu elementu płynu zależą jedynie od sił masowych, zewnętrznego ciśnienia i wewnętrznych sił lepkości w płynie. Postać równania użyta w symulacji:

$$\underbrace{\rho \left(\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} \right)}_1 = \underbrace{-\nabla p}_2 + \underbrace{\nabla \cdot (\mu(\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T) - \frac{2}{3}\mu(\nabla \cdot \mathbf{u})\mathbf{I})}_3 + \underbrace{\mathbf{F}}_4$$

Gdzie:

ρ – gęstość płynu

$\mathbf{u}$ – prędkość płynu

p – ciśnienie płynu

μ – lepkość dynamiczna płynu

T – temperatura

To równanie można podzielić na pewne części. Część (1) opisuje siły wewnętrzne w płynie, część (2) siły pochodzące od ciśnienia, część (3) siły wynikające z lepkości oraz część (4) wszystkie siły zewnętrzne działające na płyn.

Dla płynów nieściśliwych można pominąć człon:

$$-\frac{2}{3}\mu(\nabla \cdot \mathbf{u})\mathbf{I}$$

Powyższe równanie bilansu pędu występuje zawsze w parze z równaniem zachowania masy. Dla płynów nieściśliwych:

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0$$

1.5. Metody elementów skończonych

MES (Metoda Elementów Skończonych) to metoda stosowana do przeprowadzania obliczeń inżynierskich oraz prowadzenia badań naukowych. Jest to metoda aproksymacji równań różniczkowych cząstkowych. Zjawiska fizyczne lub procesy mogą zostać opisane za pomocą parametrów, będących funkcjami położenia i czasu. Rozwiązanie układu równań różniczkowych cząstkowych polega na znalezieniu funkcji niewiadomych dla danego zagadnienia.

Wykorzystanie metody elementów skończonych przy rozwiązywaniu konkretnego zadania wymaga dwóch etapów:

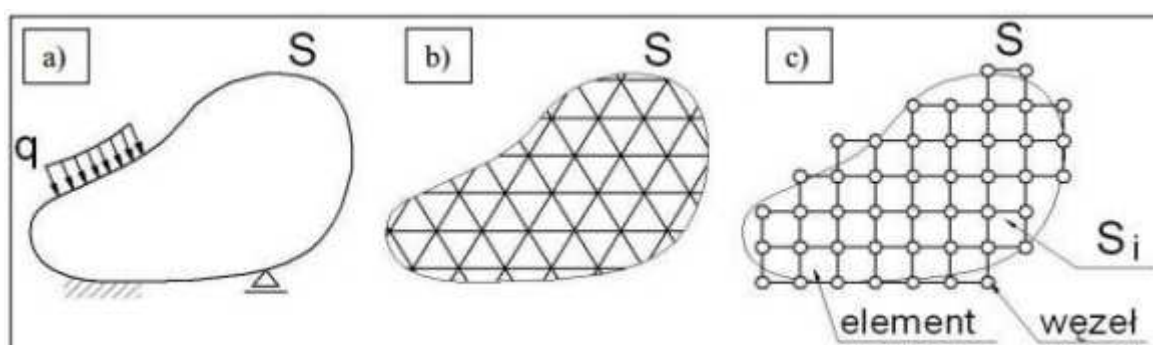
- stworzenia modelu obliczeniowego
- rozwiązania równań za pomocą uzyskanego modelu.

Należy w sposób matematyczny zapisać model zagadnienia. Następnie ulega on przekształceniu do równania całkowego związanego z równaniami różniczkowymi cząstkowymi. Należy również zdefiniować grupę funkcji, z których będzie aproksymowane rozwiązanie. Zadanie metody elementów skończonych określane jest dla obiektów fizycznych lub grupy takich obiektów znajdujących się w przestrzeni. Ta przestrzeń stanowi przestrzeń obliczeniową – obszar, w którym zdefiniowane są równania różniczkowe cząstkowe. Jest on skończony – posiada brzeg. Na nim zdefiniowane są dodatkowe równania określające zachowanie funkcji niewiadomych, które stanowią tak zwane warunki brzegowe. Istotą tej metody jest sposób aproksymacji rozwiązań równań różniczkowych polegający na stworzeniu małych podobszarów z całego obszaru obliczeniowego.

W elementach skończonych definiowane są funkcje kształtu. Najczęściej są to funkcje liniowe lub wielomianowe o niskim stopniu. Z tych funkcji określonych na pojedynczych elementach konstruowane są funkcje określone na całym obszarze obliczeniowym – funkcje bazowe. W metodzie elementów skończonych należy zdefiniować jakie zachodzą zależności pomiędzy rozwiązaniem, a funkcjami bazowymi. Przyjęto zasadę, że rozwiązania przybliżone są sumą liniową funkcji bazowych. Dzięki znajomości definicji funkcji bazowych oraz wartości współczynników można określić

rozwiązanie w dowolnym punkcie obszaru obliczeniowego. Najczęściej w metodzie elementów skończonych zbiór rozwiązań (wartości współczynników) to zbiór wartości w wybranych punktach obszaru – tak zwanych węzłach. W pozostałych punktach wartości są interpolowane przy użyciu funkcji bazowych i wartości w węzłach.

Równanie całkowe zostaje przetransformowane do postaci układu równań liniowych. Tworzona jest macierz układu równań liniowych (zwyczajowo macierzy sztywności), w której każdy współczynnik jest sumą całek. Te całki są określone na całym obszarze obliczeniowym oraz stanowią sumę całek po elementach skończonych. Przy odpowiednim zdefiniowaniu funkcji bazowych, można określić, które elementy macierzy będą zerami.



Rys. 7. Schemat przedstawiający przebieg dyskretyzacji elementu ciągłego.

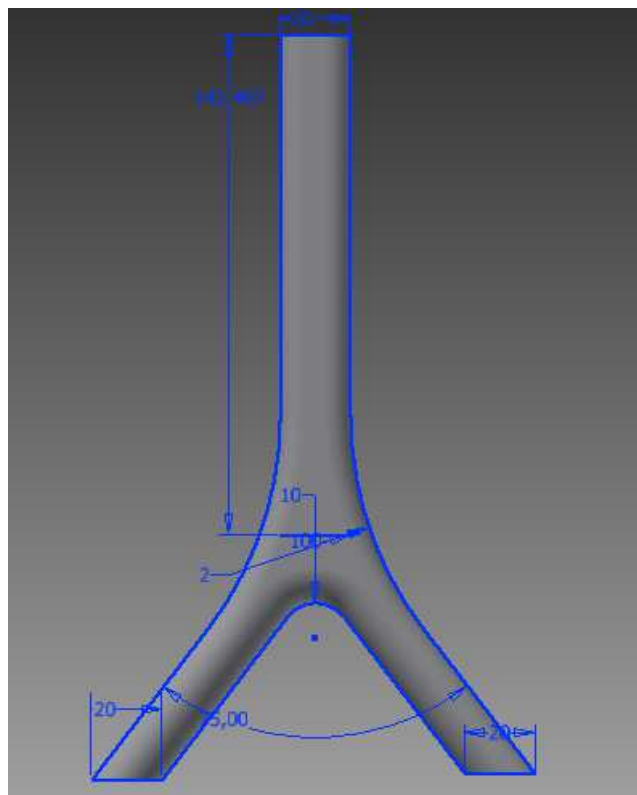
2. Modelowanie

Wykonane modele są jedynie uproszczeniem modeli aorty. Wykonane zostały w programie Inventor. Aby uzyskać lepsze modele, ukazujące bardziej rzeczywiste kształty oraz wymiary należałoby poddać obróbce zdjęcia diagnostyczne.

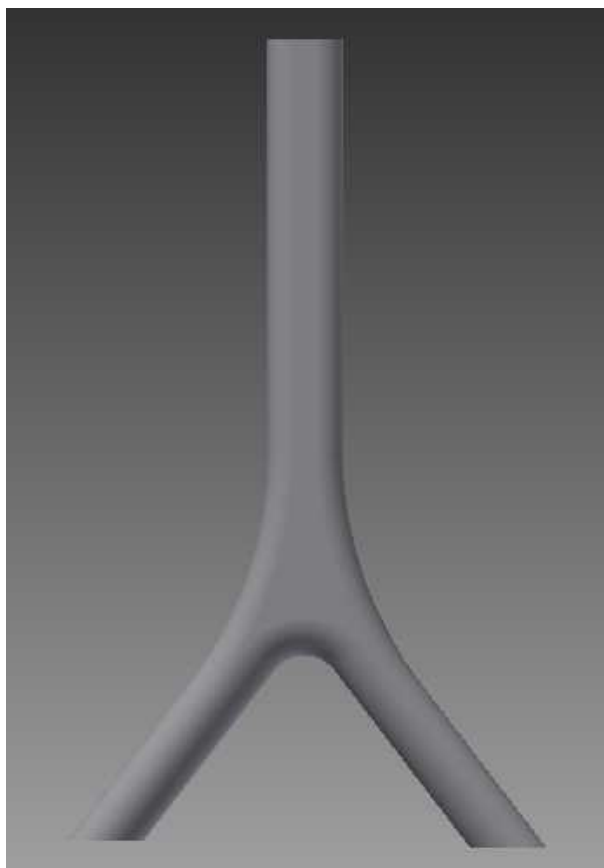
W tej pracy użyto modeli poglądowych, schematycznych. W pierwszym etapie zajęto się naszkicowaniem modelu 2D, następnie użyto wyciągnięć i zaokrągleń, aby uzyskać model 3D.

Model przedstawia aortę brzuszną w miejscu rozwidlenia na dwie tętnice biodrowe. W przypadku chorej aorty występuje niesymetryczny tętniak, przedstawiony w modelu jako wybrzuszenie.

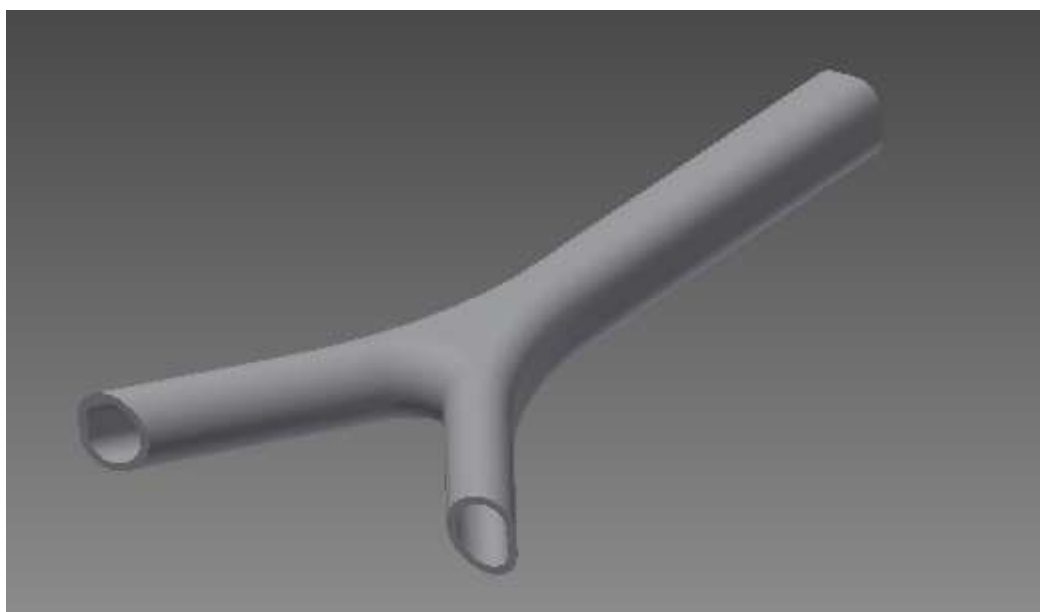
2.1. Model zdrowej aorty brzusznej



Rys. 8. Model zdrowej aorty brzusznej z nałożonym szkicem 2D oraz wymiarami

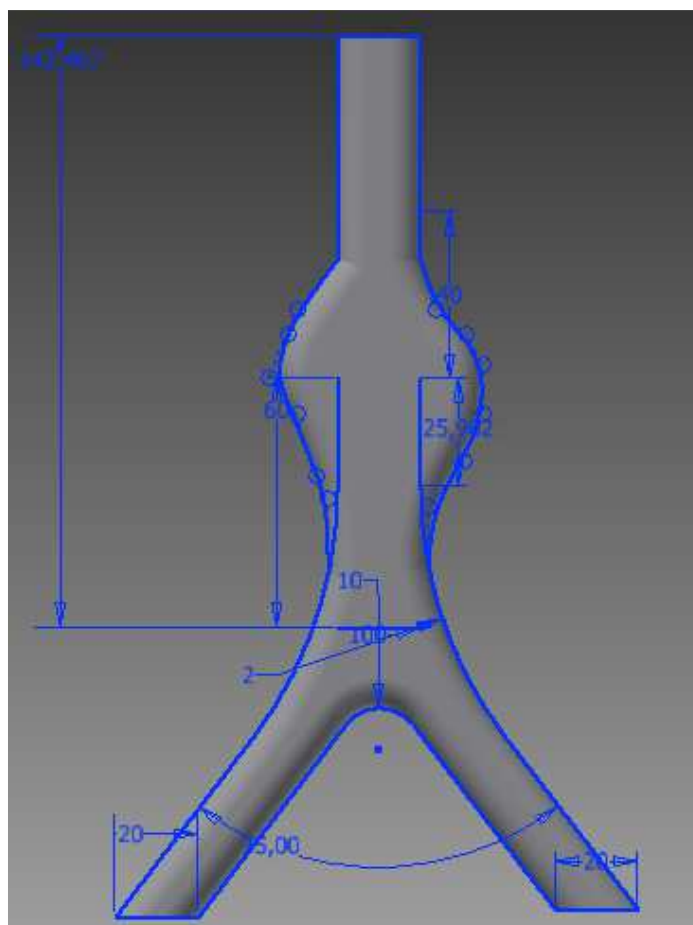


Rys. 9. Model zdrowej aorty brzusznej, widok z przodu



Rys. 10. Model zdrowej aorty brzusznej, widok z boku

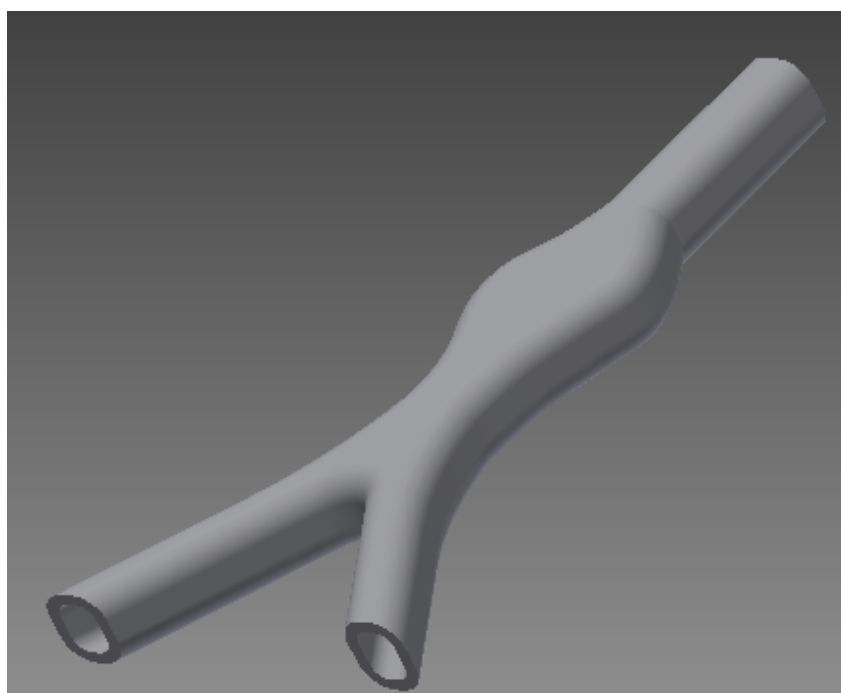
2.2. Model aorty brzusznej z tętniakiem



Rys. 11. Model aorty brzusznej z tętniakiem z nałożonym szkicem 2D oraz wymiarami



Rys. 12. Model aorty brzusznej z tętniakiem, widok z przodu



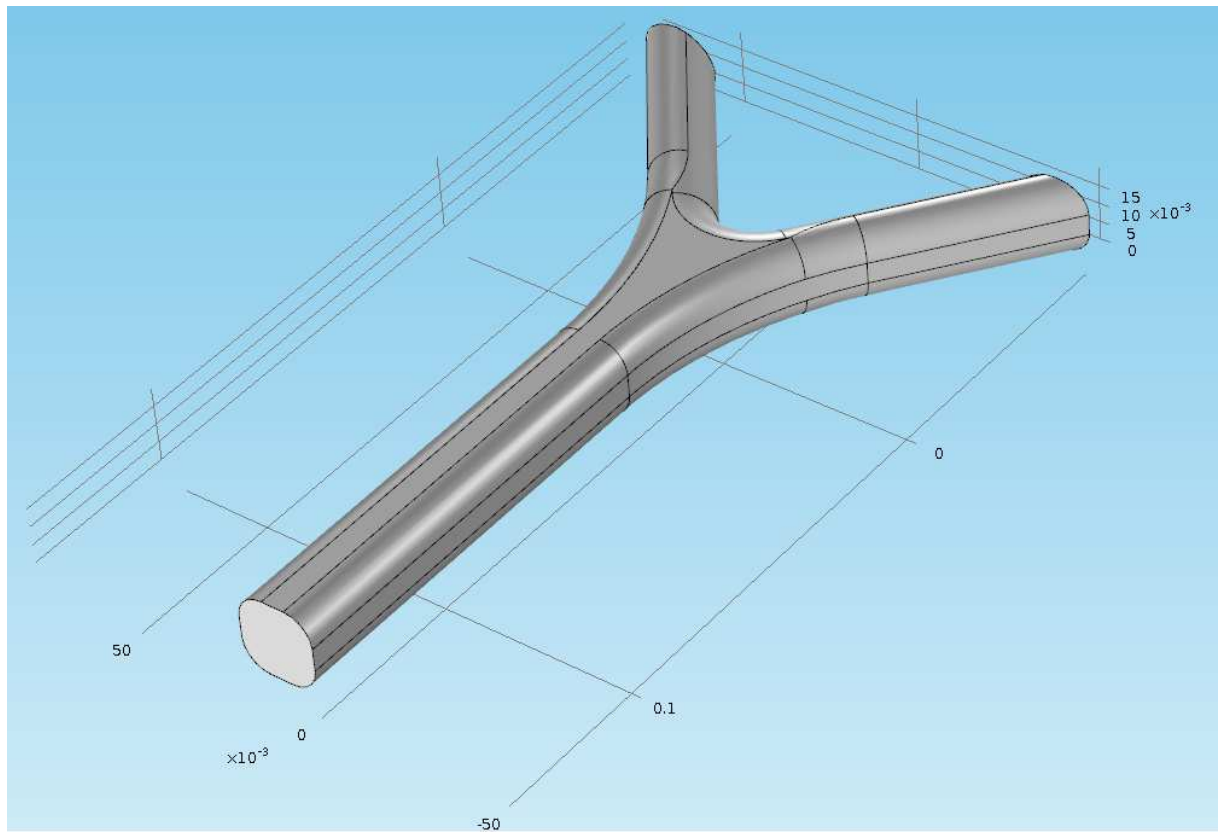
Rys. 13. Model aorty brzusznej z tętniakiem, widok z boku

3. Założenia symulacji

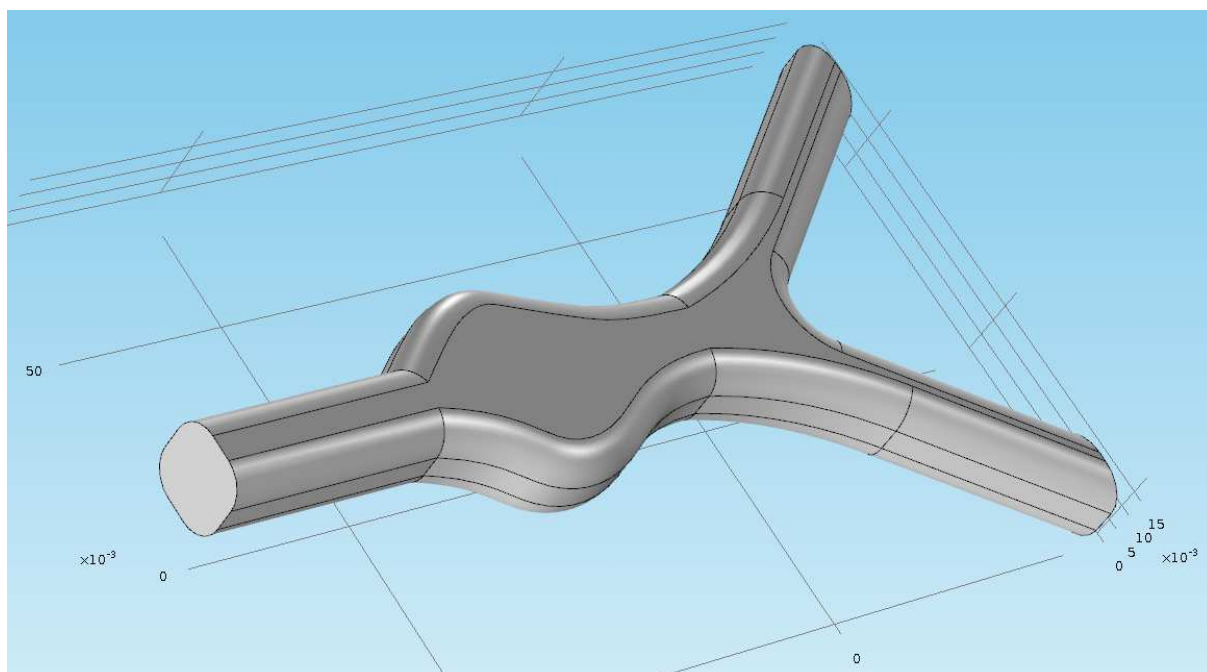
Do symulacji przepływu krwi przez naczynie potrzebujemy modelu zamkniętego. Wcześniejszy model zaprojektowany w programie Inventor jest pusty w środku, otoczony ściankami naczynia. Aby poddać go analizie, wypełniono model. W ten sposób badamy przepływ we wnętrzu naczynia, nie biorąc pod uwagę ścian i otoczenia miejsca przepływu.

Symulacja odbywa się w programie COMSOL Multiphysics 4.3. Wykonany model należało eksportować do pliku z rozszerzeniem, który jest obsługiwany w programie do analizy, w tym przypadku jest to rozszerzenie *.stp.

Poniższe obrazy przedstawiają modele wgrane w programie COMSOL.



Rys. 14. Model zdrowej aorty brzusznej w programie COMSOL



Rys. 15. Model aorty brzusznej z tętniakiem w programie COMSOL

3.1. Właściwości materiałowe

Oprogramowanie Comsol nie posiada w swojej bazie materiałów biologicznych, uwzględniających właściwości istotne z punktu widzenia mechaniki płynów oraz mechaniki ciała stałego. Bazując na danych literaturowych przyjęto następujące właściwości dla krwi:

- Gęstość – 1065 kg/m^3
- Współczynnik lepkości dynamicznej – $0,0035 \text{ Pa}\cdot\text{s}$

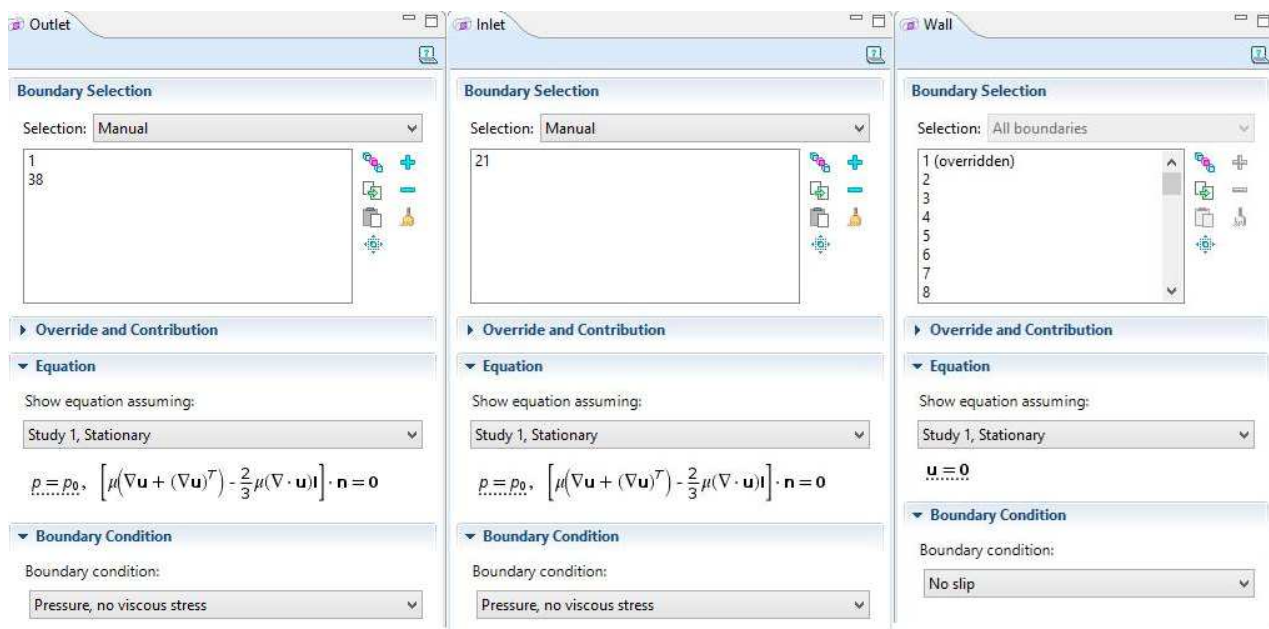
▼ Material Contents					
	Property	Name	Value	Unit	Property grc
✓	Dynamic viscosity	mu	0.0035	Pa*s	Basic
✓	Density	rho	1065	kg/...	Basic
	Ratio of specific heats	gam...	1.0	1	Basic
	Electrical conductivity	sigma	5.5e-6[...	S/m	Basic
	Heat capacity at constant pr...	Cp	Cp(T[1...	J/(kg...	Basic
	Thermal conductivity	k	k(T[1/...	W/(...	Basic
	Speed of sound	c	cs(T[1/...	m/s	Basic

Rys. 16. Ustawienia danych materiałowych

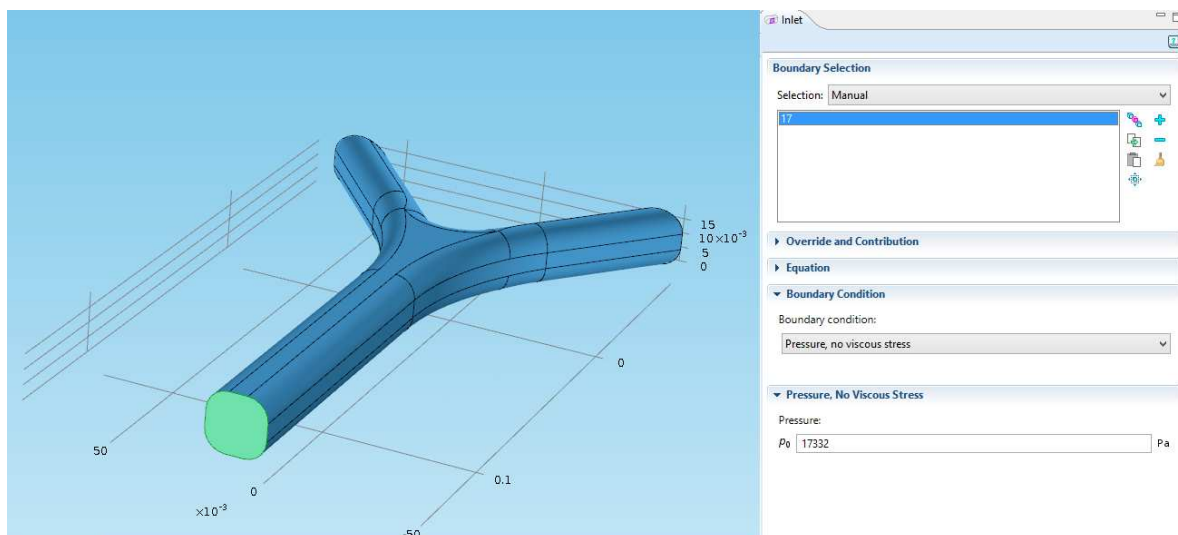
3.2. Warunki brzegowe

Do rozwiązania układu równań różniczkowych należy przyjąć pewne wartości na brzegach. W przypadku modelu aorty i nadaniu jej właściwości krwi, przyjęto następujące warunki brzegowe:

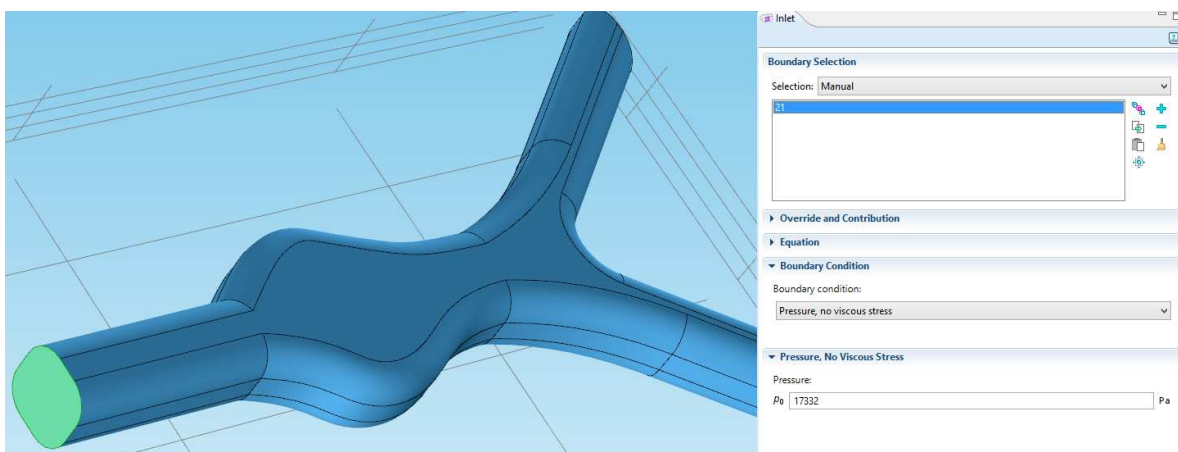
- Wlot (*inlet*) znajduje się na górnej powierzchni modelu. Warunkiem brzegowym jest tu ciśnienie 130 mmHg = 17332 Pa.
- Wylot (*outlet*) znajduje się na powierzchniach przekrojów poprzecznych tętnic biodrowych, czyli za rozgałęzieniem. Ustalony warunek brzegowy to ciśnienie o wartości 0 Pa.
- Na wszystkich ściankach (poza *inlet* i *outlet*) zastosowano warunek Wall No-Slip.



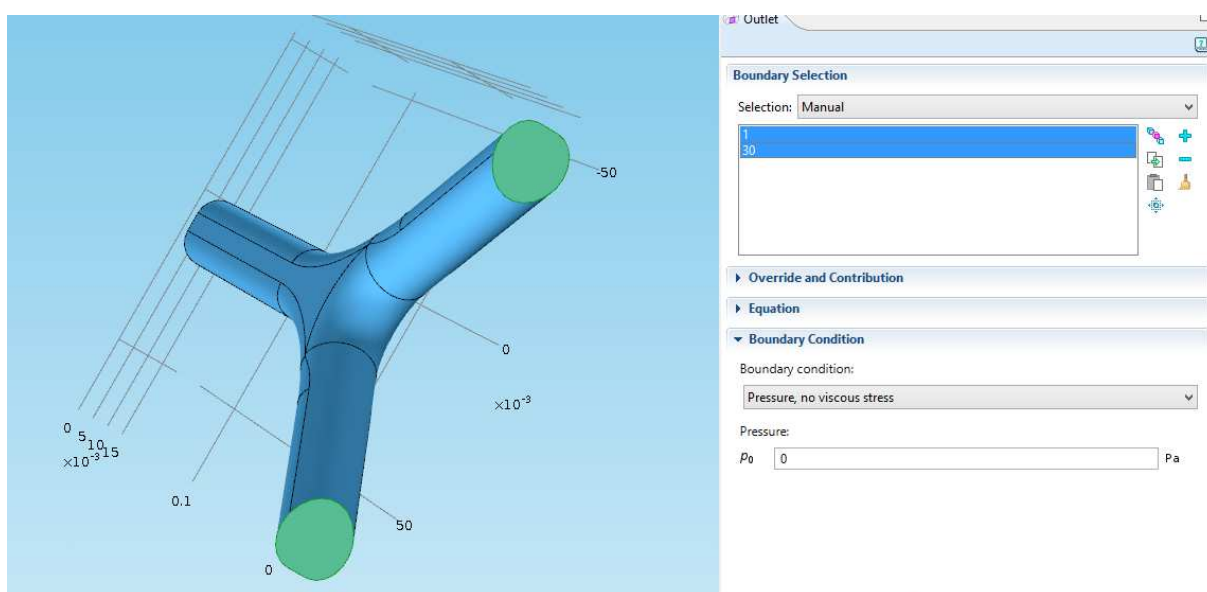
Rys. 17. Równania różniczkowe przyjęte w analizie dla wylotu, wlotu oraz ścianek



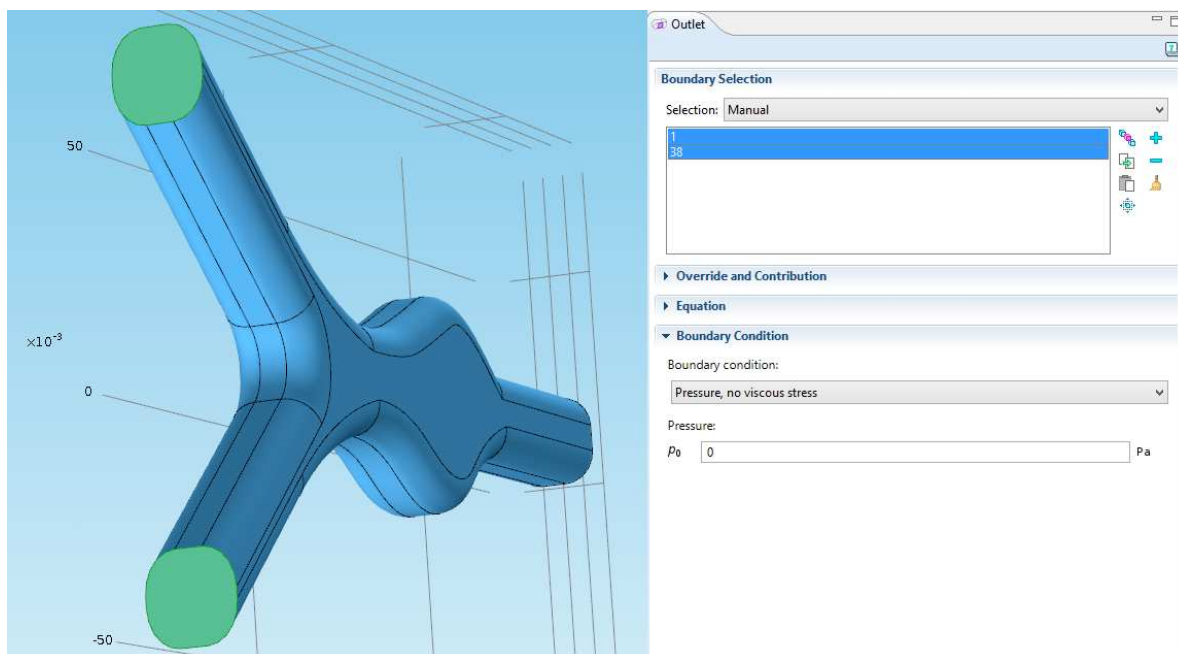
Rys. 18. Ustawienia warunków brzegowych dla zdrowej aorty – Inlet



Rys. 19. Ustawienia warunków brzegowych dla aorty z tętniakiem – Inlet



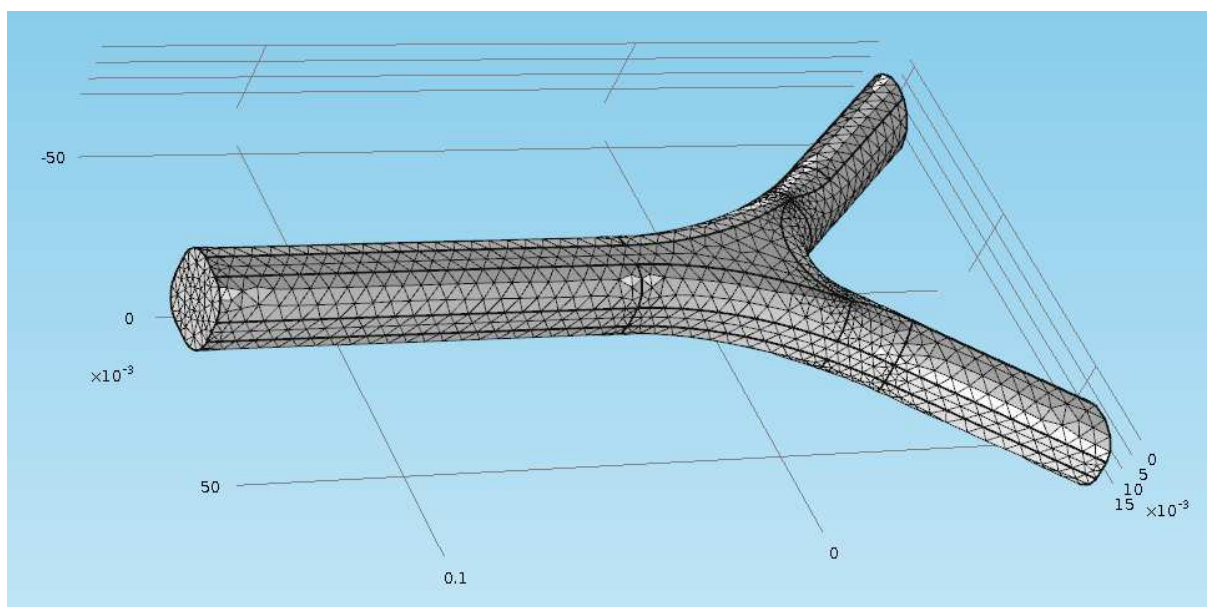
Rys. 20. Ustawienia warunków brzegowych dla zdrowej aorty – Outlet



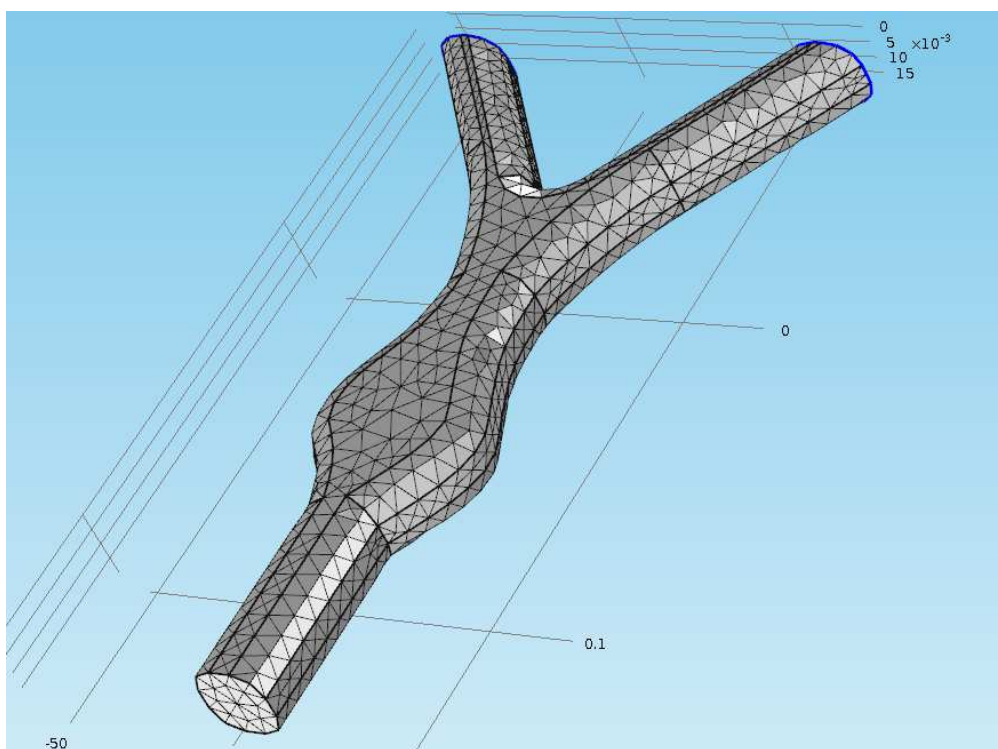
Rys. 21. Ustawienia warunków brzegowych dla aorty z tętniakiem – Outlet

3.3. Siatka

Kolejnym etapem potrzebnym do przeprowadzenia analizy było utworzenie siatki na modelach. W programie użyto siatki Free Tetrahedral, ponieważ tylko ona pozwala na wykonanie obliczeń dla tych modeli.



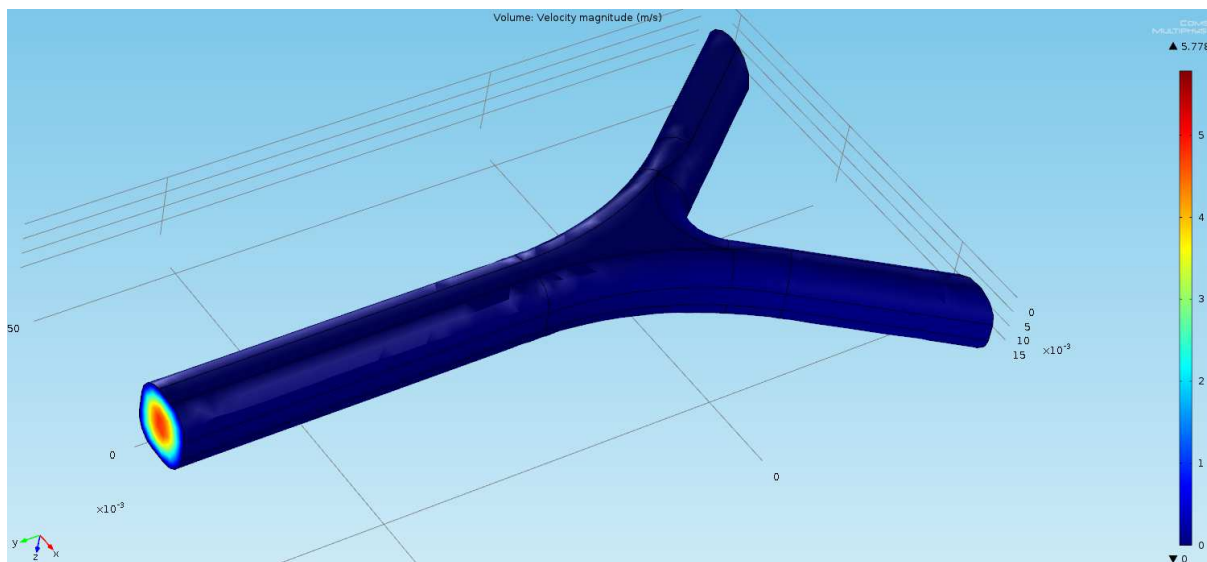
Rys. 22. Siatka modelu zdrowej aorty brzusznej



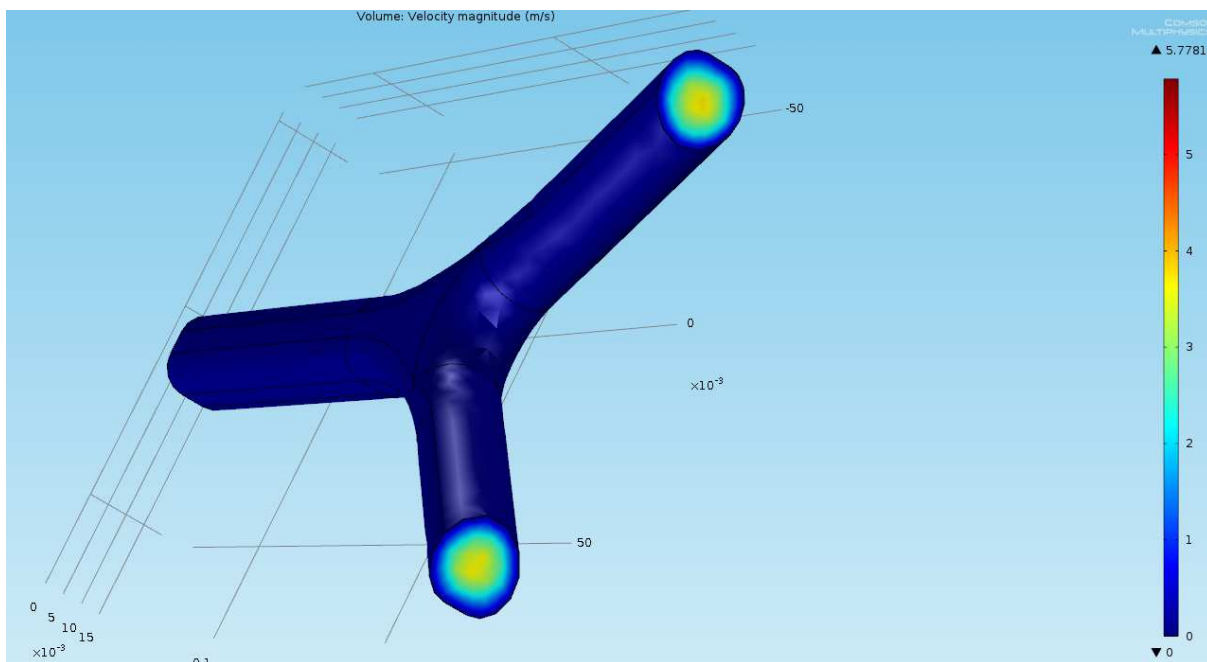
Rys. 23. Siatka modelu aorty brzusznej z tętniakiem

4. Analiza i symulacja przepływu krwi

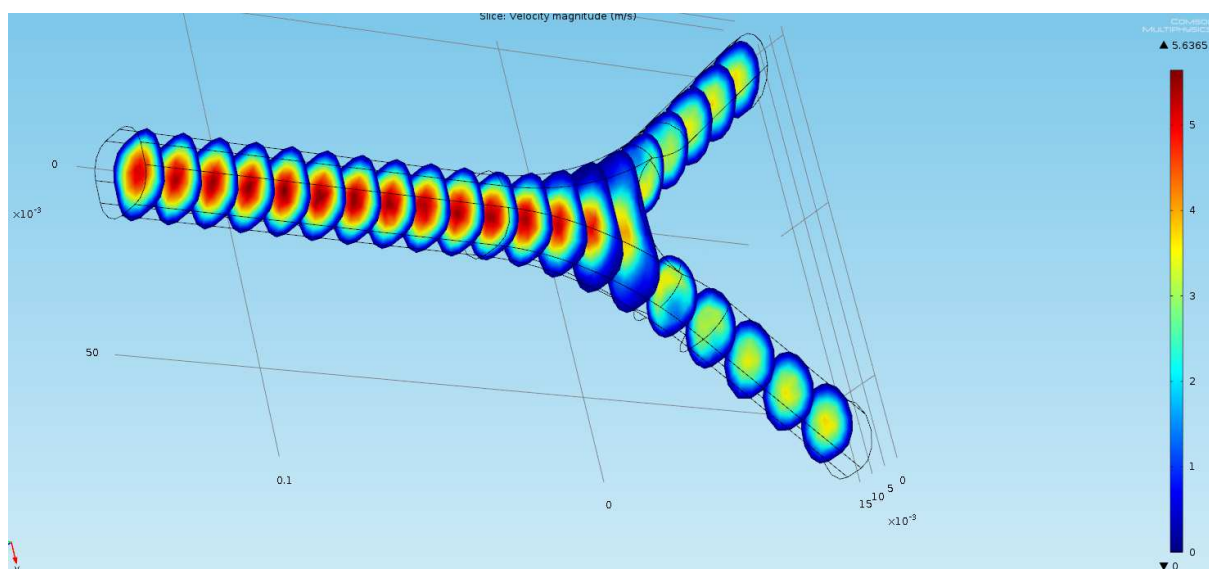
4.1. Zdrowa aorta brzuszna



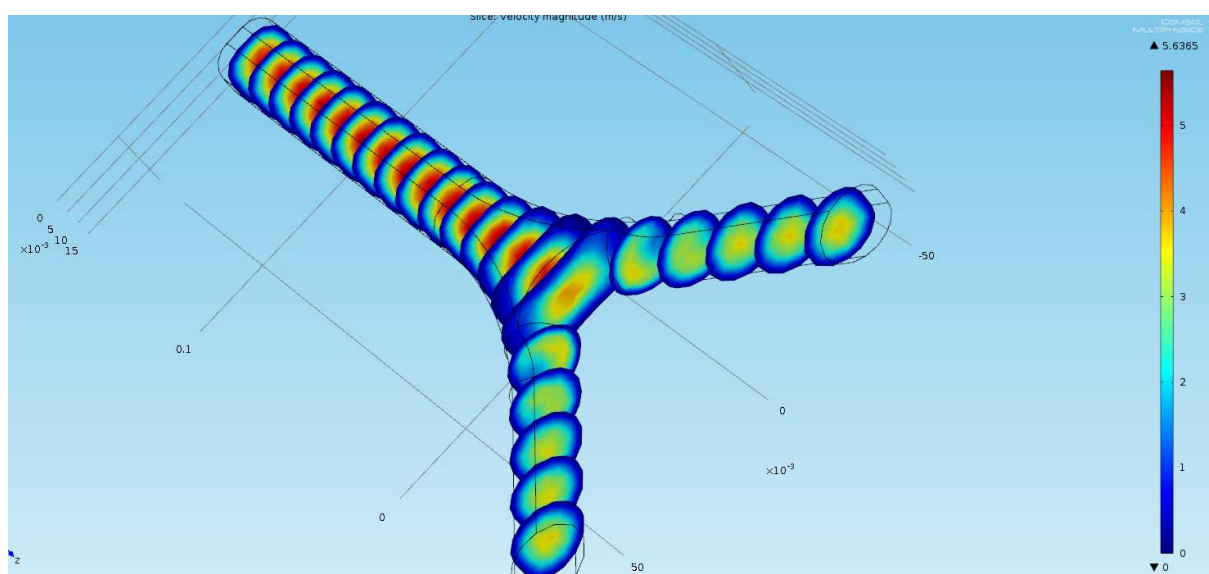
Rys. 24. Wykres objętościowy prędkości (widok na wlot) – zdrowa aorta brzuszna



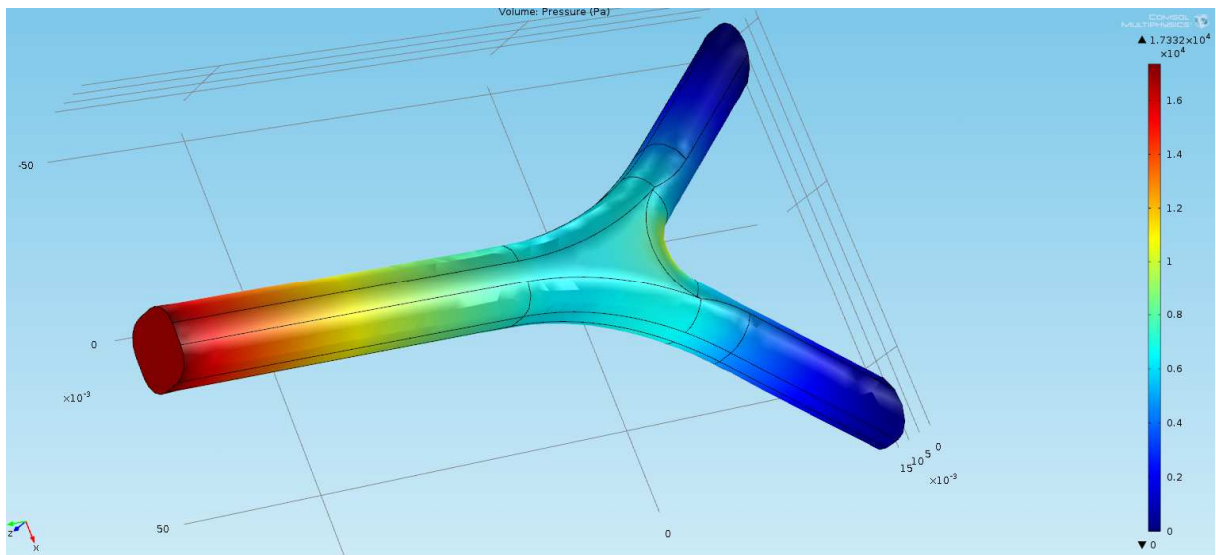
Rys. 25. Wykres objętościowy prędkości (widok na wyloty) – zdrowa aorta brzuszna



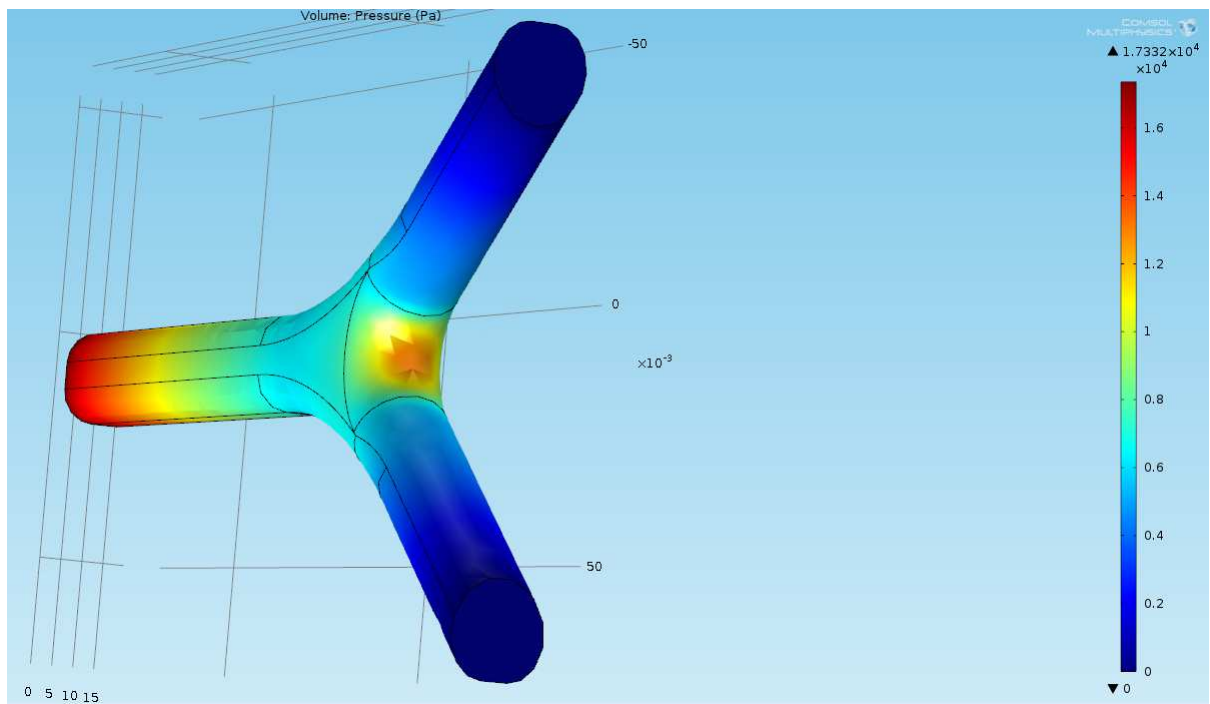
Rys. 26. Wykres przekrojowy prędkości (widok z boku) – zdrowa aorta brzuszna



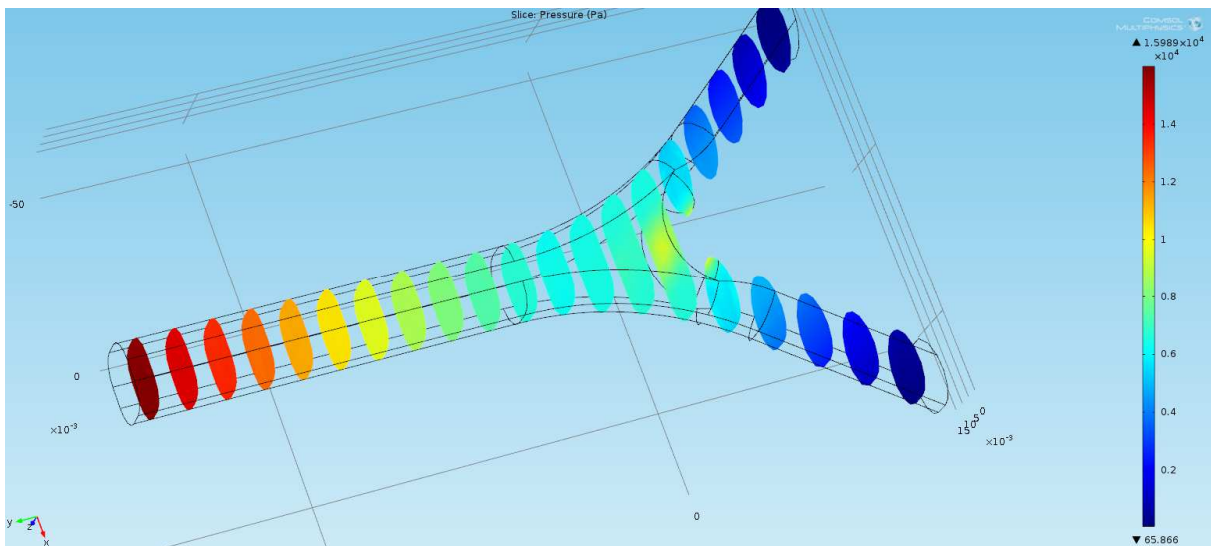
Rys. 27. Wykres przekrojowy prędkości (widok od strony wylotów) – zdrowa aorta brzuszna



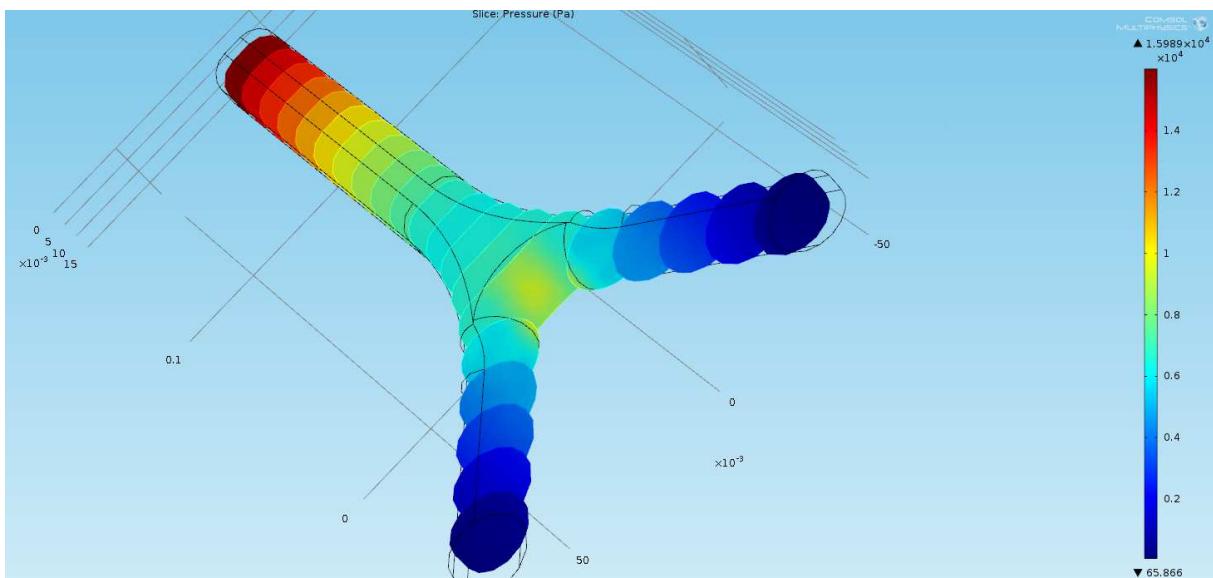
Rys. 28. Wykres objętościowy ciśnienia (widok z boku) – zdrowa aorta brzuszna



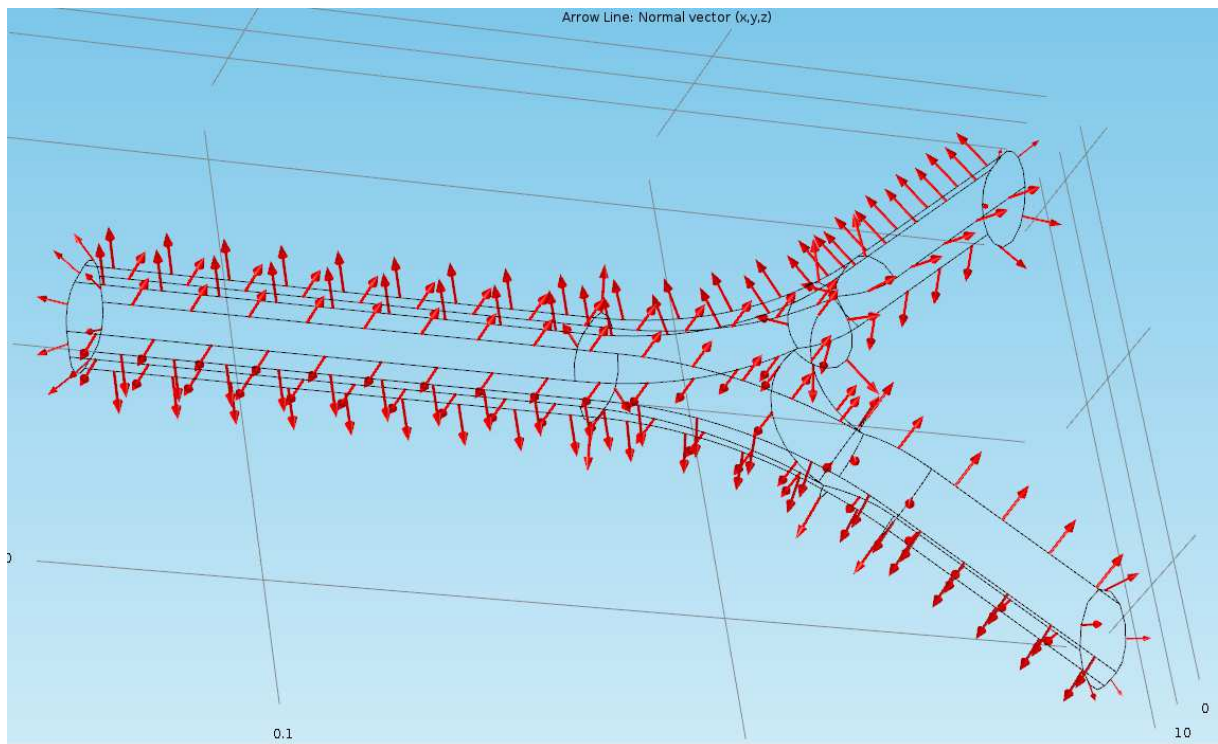
Rys. 29. Wykres objętościowy ciśnienia (widok na rozgałęzienie) – zdrowa aorta brzuszna



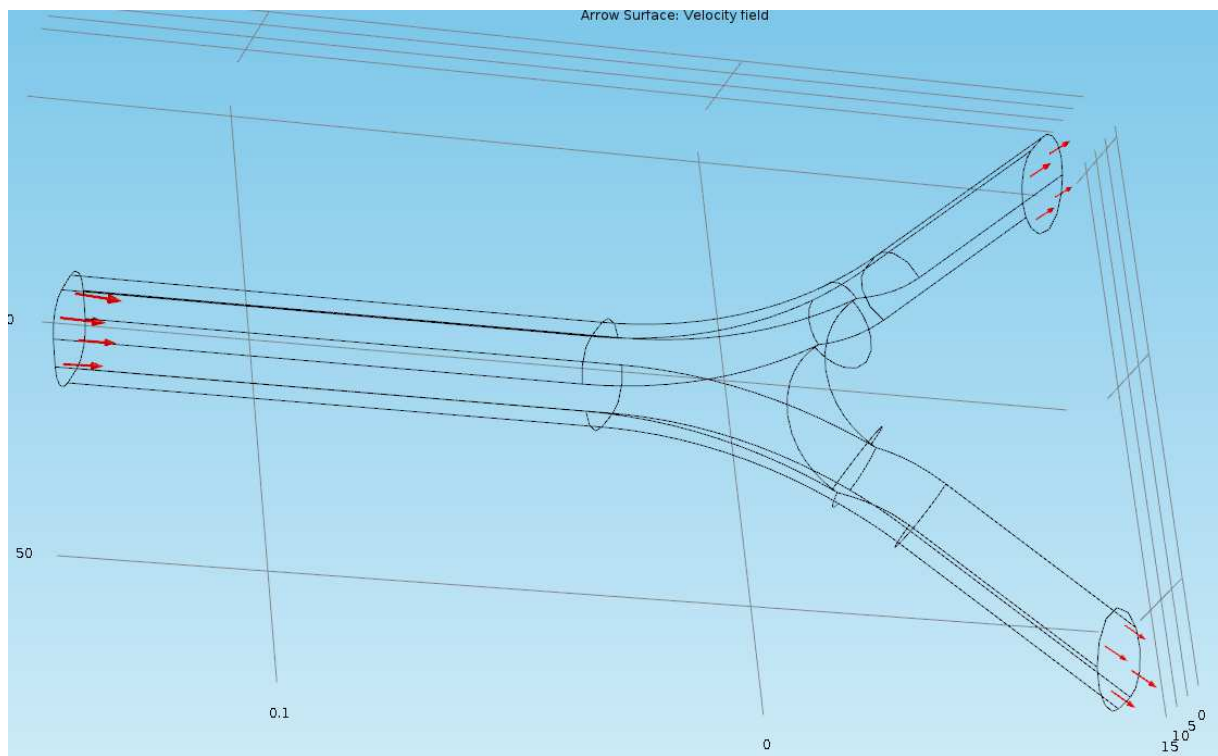
Rys. 30. Wykres przekrojowy ciśnienia (widok z boku) – zdrowa aorta brzuszna



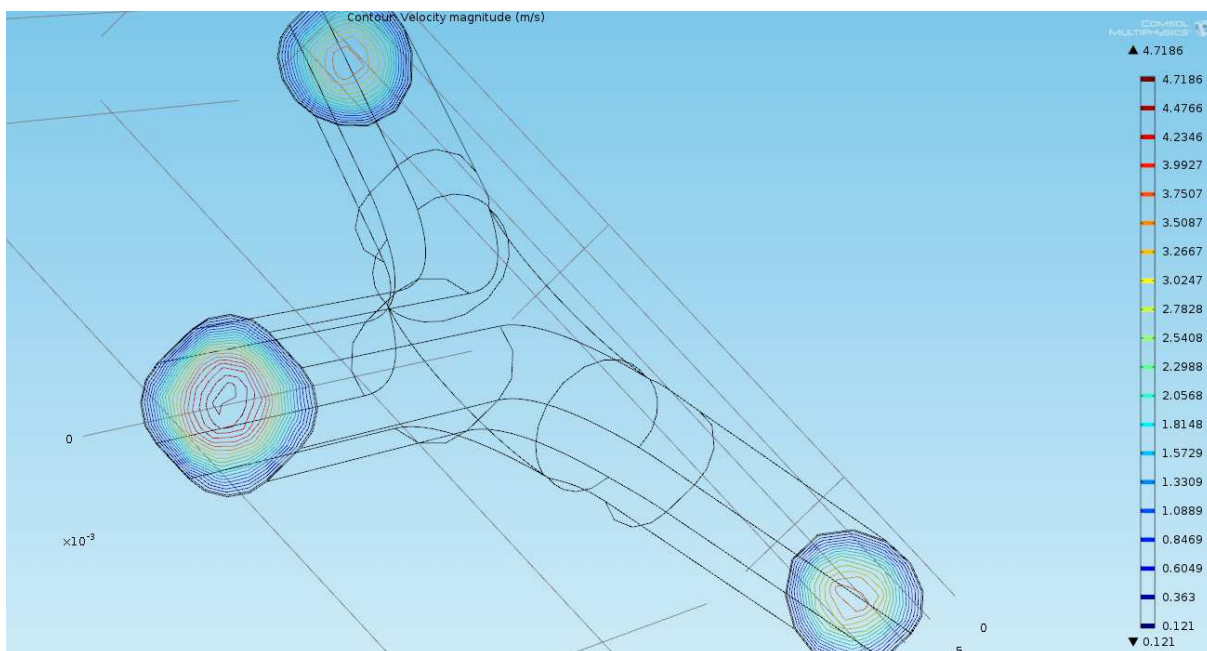
Rys. 31. Wykres przekrojowy ciśnienia (widok na rozgałęzienie) – zdrowa aorta brzuszna



Rys. 32. Wykres wektorów normalnych – zdrowa aorta brzuszna

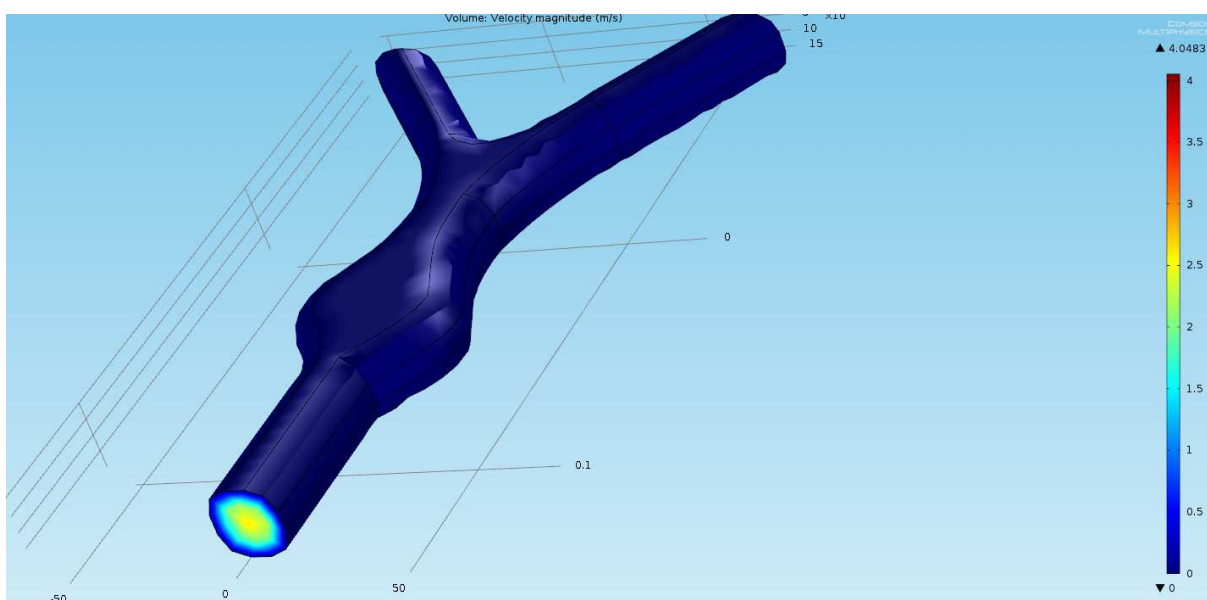


Rys. 33. Wykres pola prędkości – zdrowa aorta brzuszna

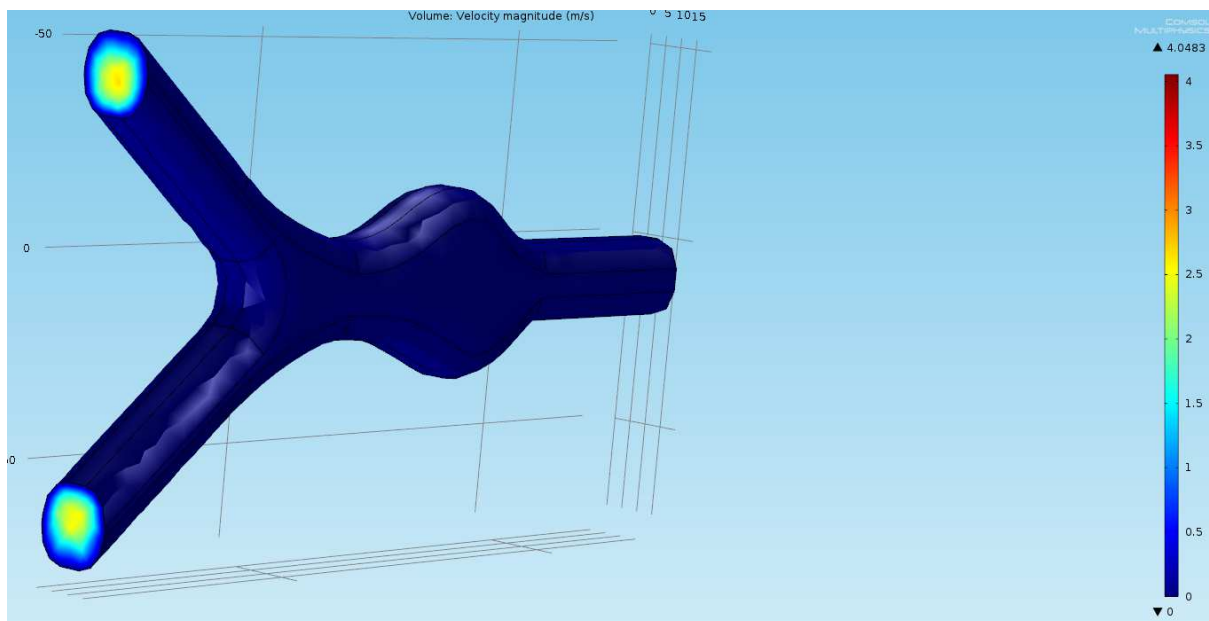


Rys. 34. Wykres modułu prędkości – zdrowa aorta brzuszna

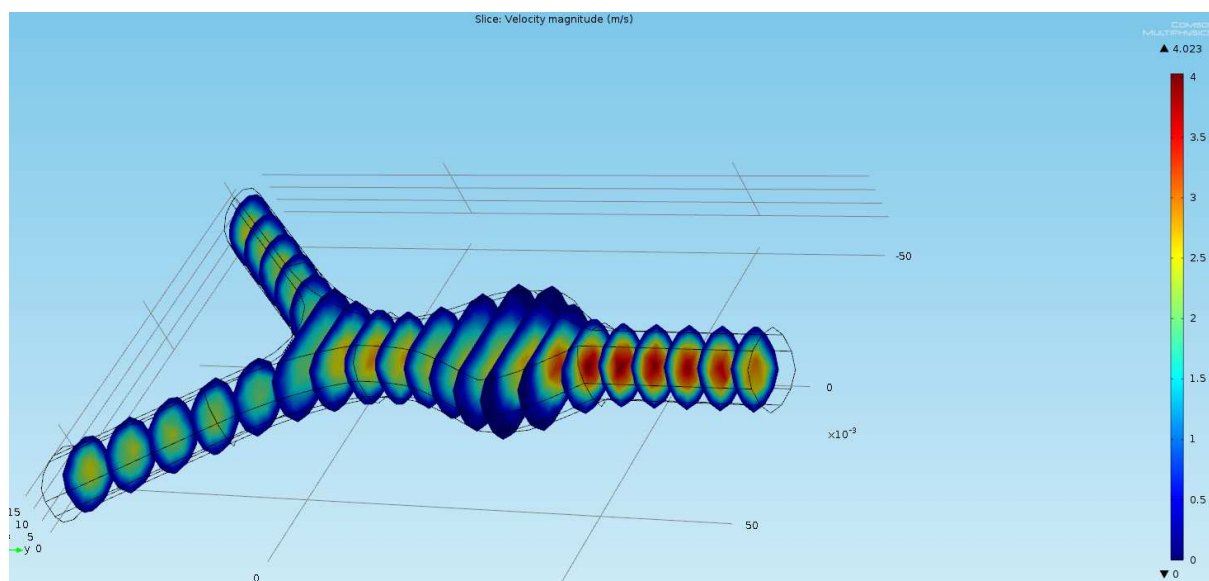
4.2. Aorta brzuszna z tętniakiem



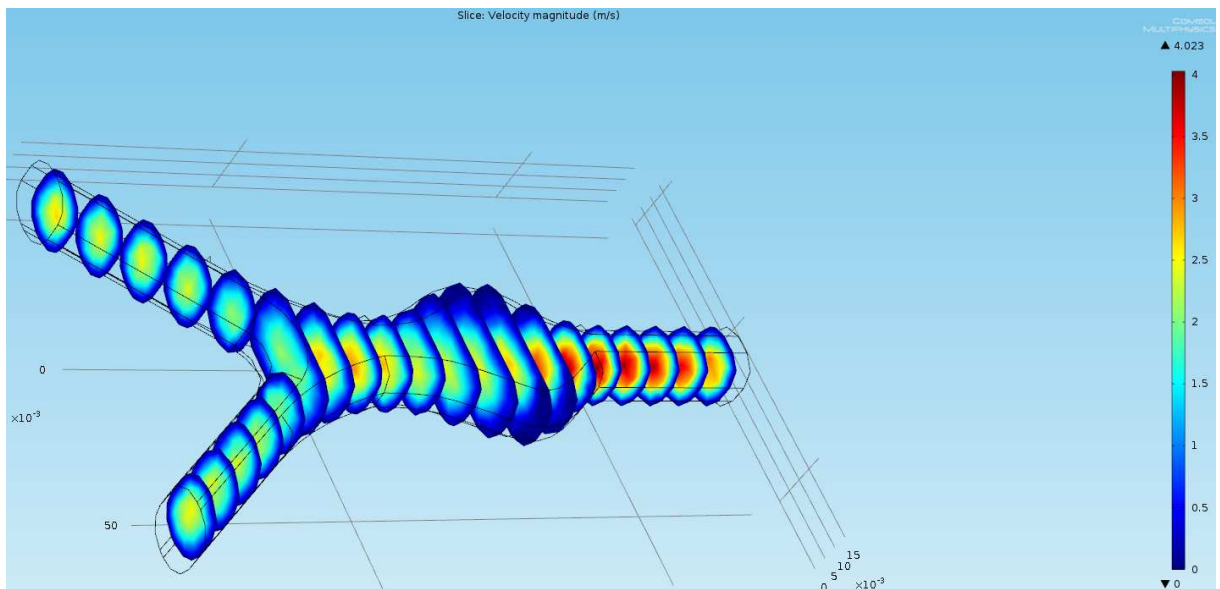
Rys. 35. Wykres objętościowy prędkości (widok na wlot) – aorta brzuszna z tętniakiem



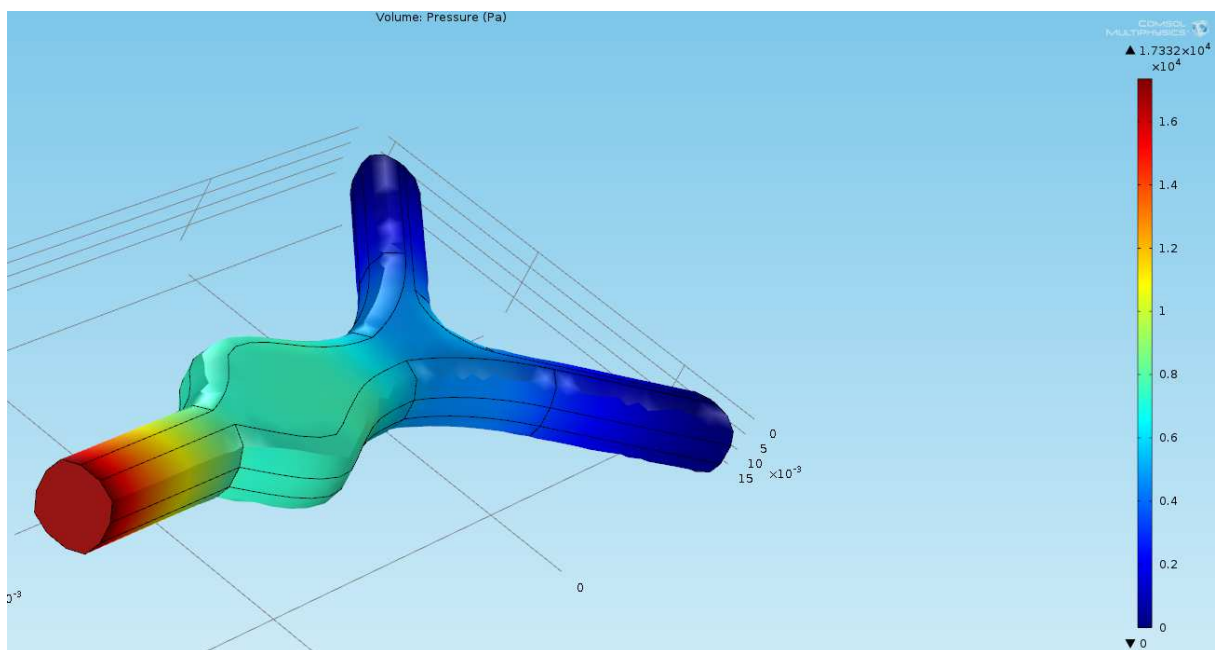
Rys. 36. Wykres objętościowy prędkości (widok na wyloty) – aorta brzuszna z tętniakiem



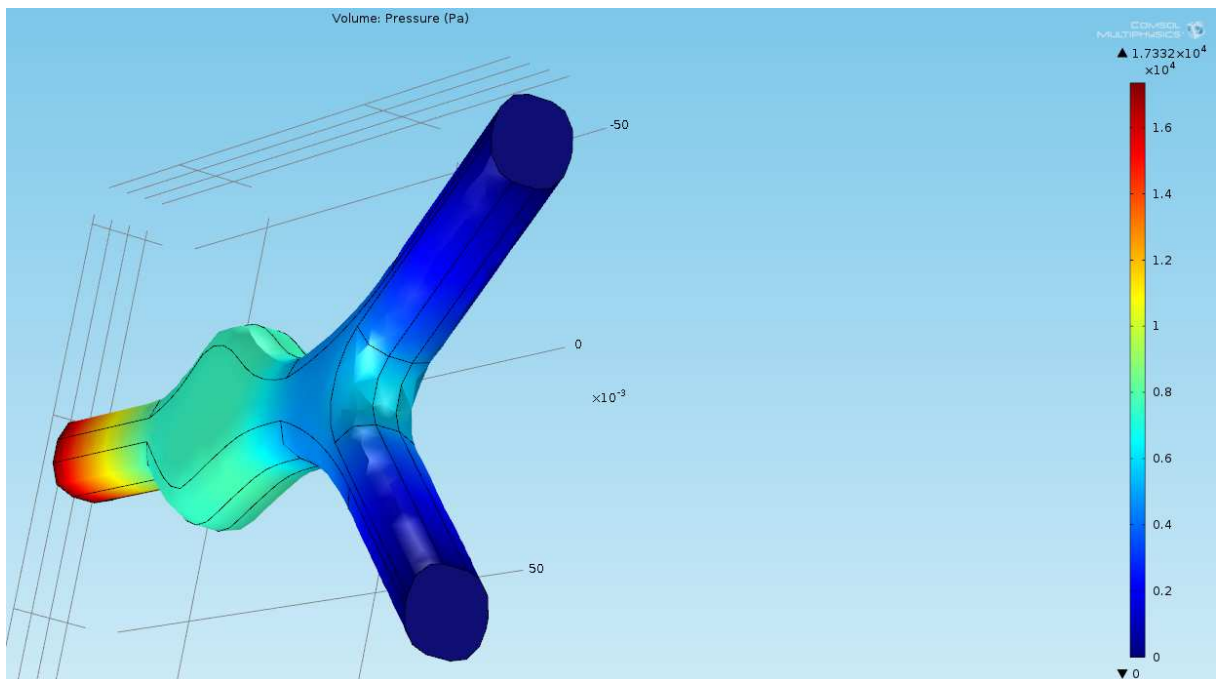
Rys. 37. Wykres przekrojowy prędkości (widok z boku) – aorta brzuszna z tętniakiem



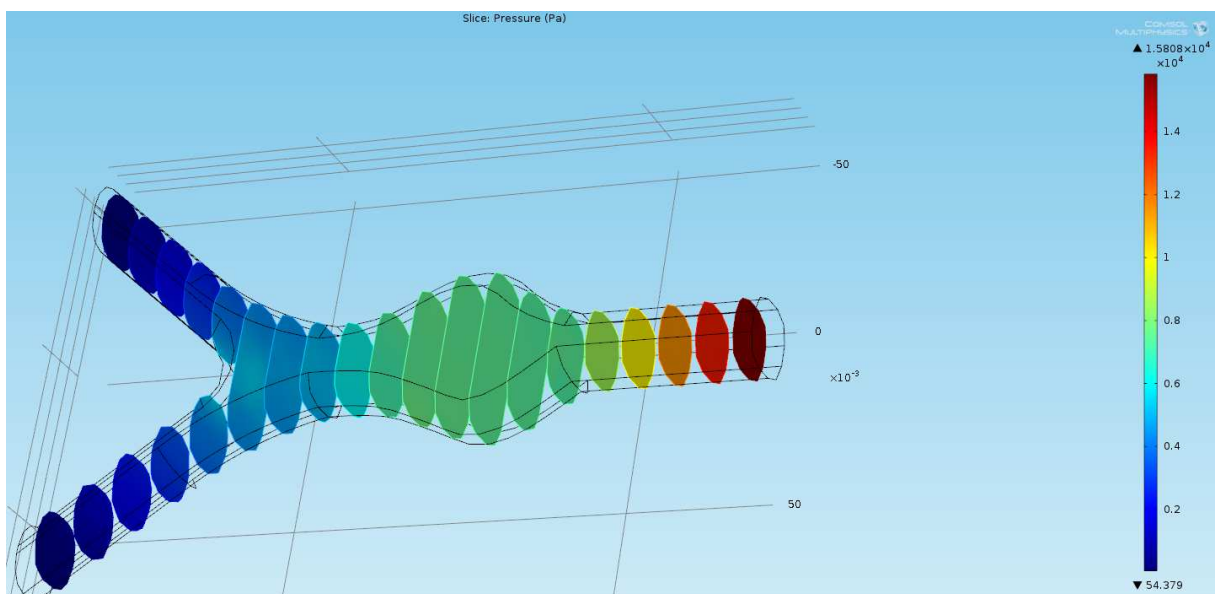
Rys. 38. Wykres przekrojowy prędkości (widok od strony wylotów) – aorta brzuszna z tętniakiem



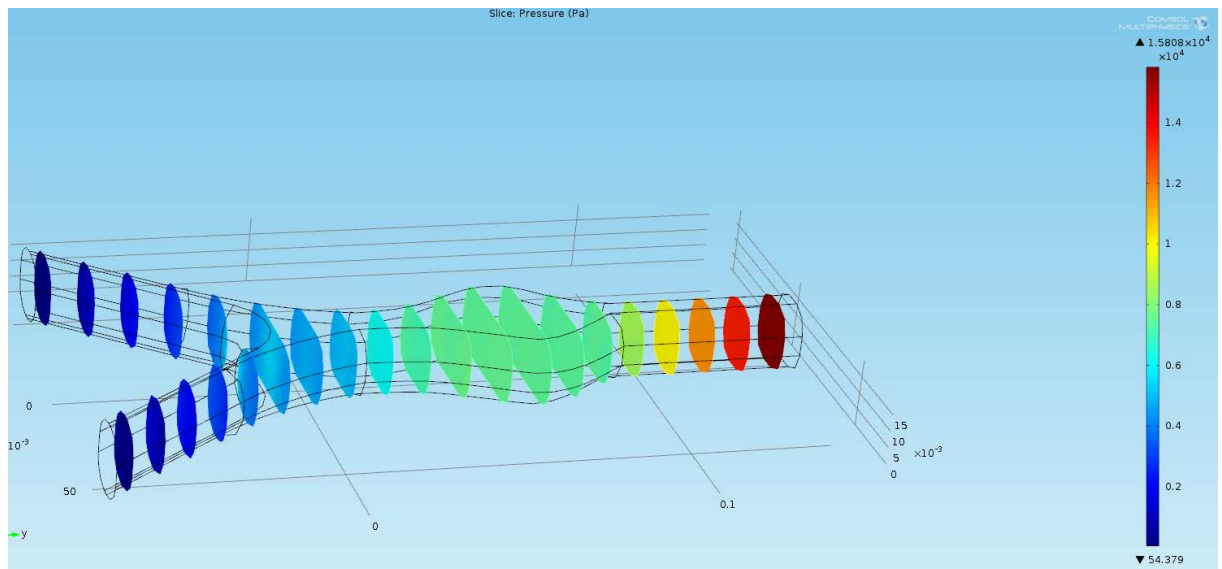
Rys. 39. Wykres objętościowy ciśnienia (widok z boku) – aorta brzuszna z tętniakiem



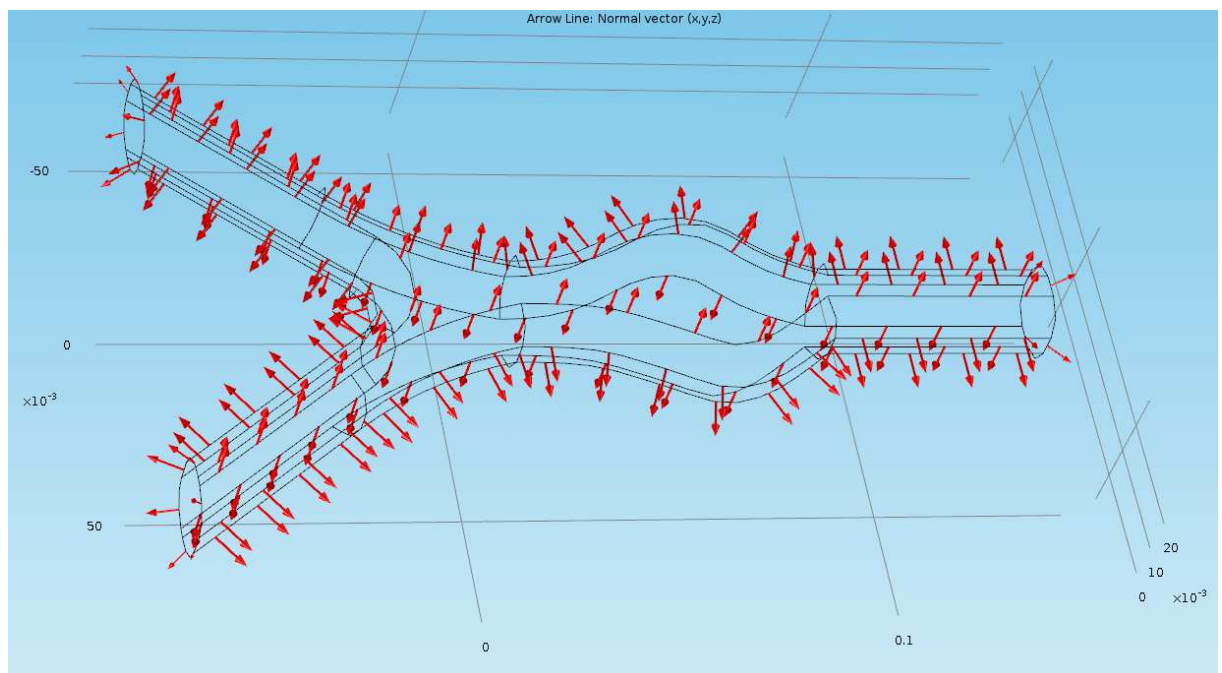
Rys. 40. Wykres objętościowy ciśnienia (widok na rozgałęzienie) – aorta brzuszna z tętniakiem



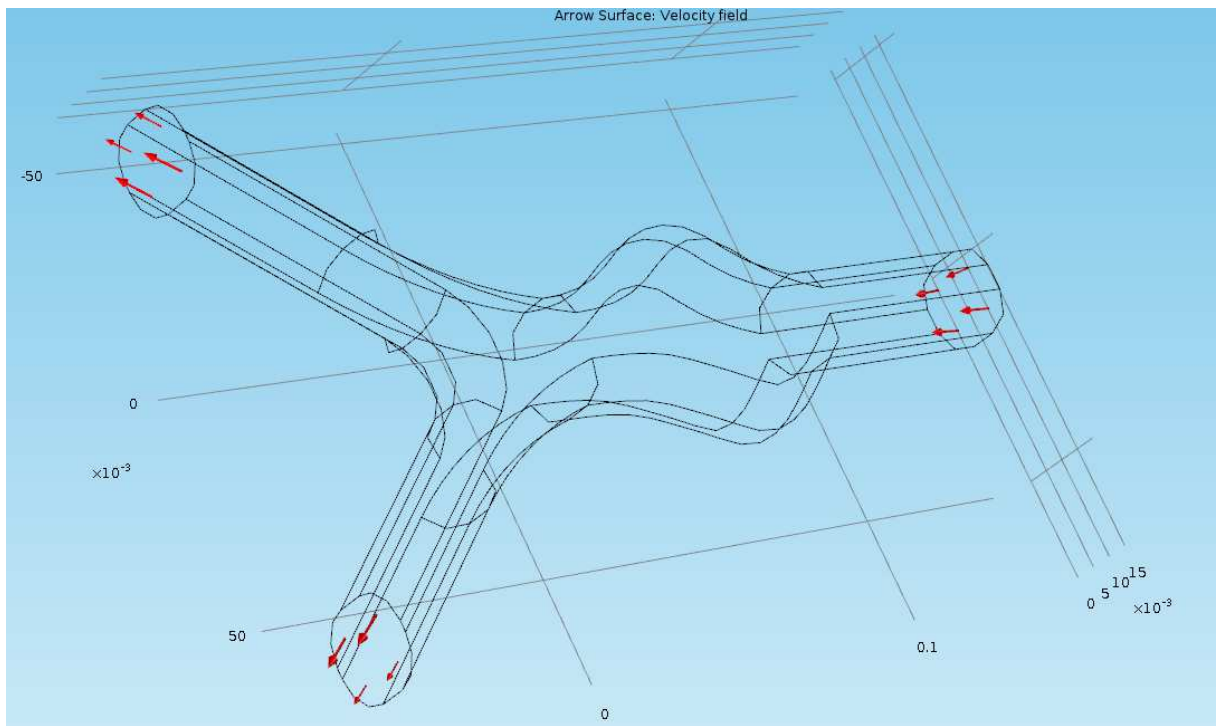
Rys. 41. Wykres przekrojowy ciśnienia (widok z boku) – aorta brzuszna z tętniakiem



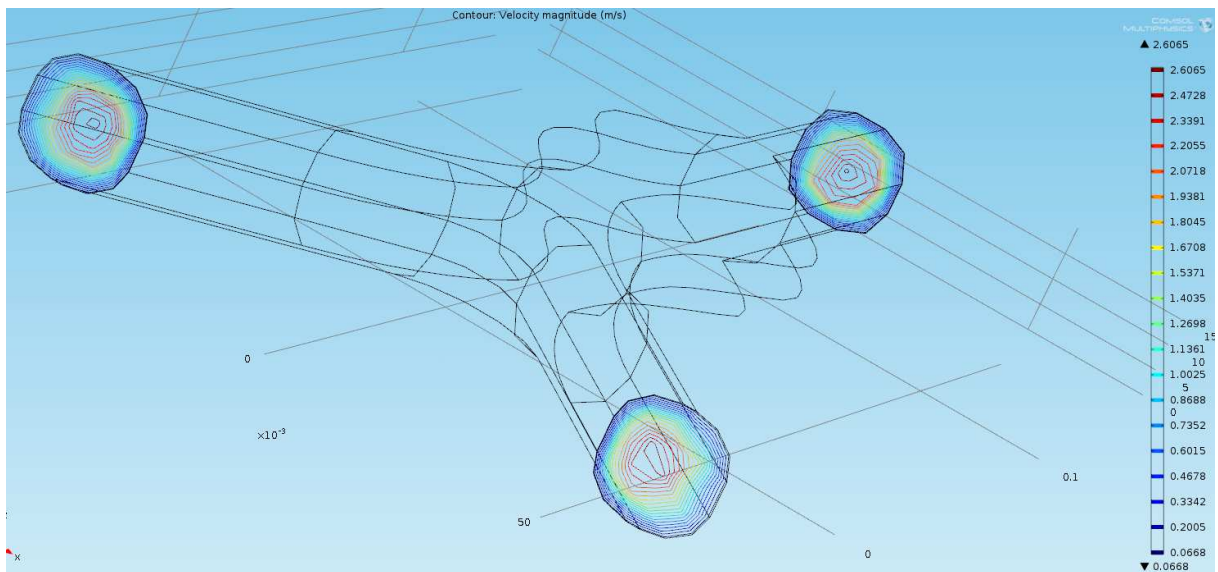
Rys. 42. Wykres przekrojowy ciśnienia (widok z boku) – aorta brzuszna z tętniakiem



Rys. 43. Wykres wektorów normalnych – aorta brzuszna z tętniakiem



Rys. 44. Wykres pola prędkości – aorta brzuszna z tętniakiem



Rys. 45. Wykres modułu prędkości – aorta brzuszna z tętniakiem

5. Podsumowanie i wnioski

Analizując przepływ krwi przez aortę brzuszną zauważyć można, że prędkość przepływu krwi jest największa w najgłębszej części przekroju, natomiast najmniejsza przy ścianach naczyń. Ciśnienie rozkłada się natomiast wzdłuż naczyń, im dalej od wejścia tym ciśnienie jest mniejsze, jest to wynikiem określenia warunków brzegowych. W aorcie brzusznej występuje najwyższe ciśnienie, z kolei w tętnicach biodrowych ciśnienie zmniejsza się. W miejscu rozgałęzienia pojawia się podwyższone ciśnienie.

W obu modelach rozkład ciśnień i prędkości jest podobny. Różnią się one wartościami. W przypadku tętniaka, tętnice dostają krew z mniejszym ciśnieniem przepływu krwi, może to prowadzić do niedokrwienia kończyn, co jest objawem tętniaka aorty brzusznej. Tętniak aorty brzusznej w większości przypadków nie wywołuje żadnych objawów. Dlatego też ciężko podejrzewać jego występowanie. Może on powodować bóle okolicy pleców i kręgosłupa, a także bóle brzucha. W rzadkich przypadkach jednym z objawów tętniaka jest "objaw niebieskiego palucha", powstaje on gdy z tętniaka odrywają się drobne skrzepliny i powodują zatory i zasinienie palców stopy.

Analiza pokazuje, że w miejscu tętniaka prędkość przepływu i ciśnienie rozkładają się równomiernie, tak jak jest w przypadku zdrowej aorty. Wiadomo, że w miejscu powstania tętniaka pojawiają się wiry, jest to także większa średnica przepływu przez to występuje większy nacisk na ścianki naczyń. Naczynie jest w tym miejscu osłabione i narażone na pęknięcie. Niestety nie udało się wykonać obliczeń dla modelu, w którym występują ściany i możliwe byłoby obliczenie naprężeń i nacisków krwi na naczynie w miejscu wystąpienia tętniaka.

W przeprowadzonych analizach zastosowano modele uproszczone, co mogło wpłynąć na poprawność wyników. Błędy mogą wynikać również z założeń przybliżonych oraz z nieuwzględnienia obecności ścian, ich grubości.

6. Bibliografia

1. http://www.anatomia.gmo.pl/ukl_kra.html [dostęp: 16.06.2016]
2. Ewa Ziółko, *Podstawy fizjologii człowieka*, Oficyna Wydawnicza PWSZ w Nysie, NYSZA 2006
3. http://portalwiedzy.onet.pl/142102,...,uklad_krwionosny_i_limfatyczny_czlowieka_haslo.html [dostęp: 16.06.2016]
4. <http://espz.pl/materialy/uklkrwionosny.pdf> [dostęp: 16.06.2016]
5. <http://www.kardiolog-jarocin.pl/wp-content/uploads/2014/02/tetniak-aorty.jpg> [dostęp: 16.06.2016]
6. http://bieganie.pl/img/zdrowie/budowa_krwi.png [dostęp: 16.06.2016]
7. Gryboś R., *Mechanika płynów*. Gliwice : Oficyna Wydawnicza Politechniki Śląskiej, 1991.
8. Zienkiewicz O.C., Taylor R.L., *The Finite Element Method: Fluid Dynamics*. Woburn : Butterworth-Heinemann, 2000. Tom III.