

Politechnika Poznańska  
Wydział Budowy Maszyn i Zarządzania



Modelowanie i symulacja zagadnień biomedycznych

## **Analiza przepływu krwi przez żyłę z niewydolnością naczyniową**

Karolina Pawlicka

Agata Anaszewicz

Poznań 2017

## Spis treści

<b>1. Wstęp teoretyczny.....</b>	<b>2</b>
1.1. Budowa i funkcje żył.....	2
1.2. Żyłki.....	2
1.3. Krew.....	3
<b>2. Modelowanie.....</b>	<b>4</b>
2.1. Równanie Naviera- Stoakes'a.....	4
2.2. Założenia symulacji.....	5
2.3. Właściwości materiałowe.....	7
2.4. Warunki brzegowe.....	8
2.5. Generowanie siatki.....	10
<b>3. Analiza i symulacja przepływu krwi.....</b>	<b>11</b>
<b>4. Podsumowanie i wnioski.....</b>	<b>13</b>
<b>5. Bibliografia.....</b>	<b>14</b>

## 1. Wstęp teoretyczny

W poniższym projekcie została przeprowadzona analiza wytrzymałościowa przepływu krwi w żyłę zdrowej i w żyłę rozszerzonej, tzw. żylaku. Analizy dokonano przy pomocy programu *COMSOL Multiphysics 3.4*.

### 1.1. Budowa i funkcje żył

Żyła jest to naczynie krwionośne, które jest częścią układu krążenia. Naczynia krwionośne, na które składają się tętnice, naczynia włosowate i żyły właśnie są poniekąd przewodami, które transportują krew, ale ich funkcja nie ogranicza się tylko do tej. Biorą one udział w regulacji krążenia i ciśnienia krwi, a także biorą udział w regulowaniu temperatury ciała. Żyły to wszelkie naczynia, które prowadzą krew do serca. Jest to przeważnie krew odtlenowana [2]. Mają one bardzo cienką warstwę mięśniówki gładkiej, ściany wiotkie a to sprawia, że ich przekrój jest owalny. Żyły posiadają zastawki, które zapobiegają cofaniu się (refluksom) krwi. W wyniku dysfunkcji zastawek dochodzi do schorzenia, jakim są żylaki. Żyły mają większe światło niż tętnice, a warstwy ich ścian mają więcej elementów łącznotkankowych niż mięśniowych [3]. Krew prowadzona przez żyły do prawego przedsionka ma kolor ciemnowiśniowy, czego przyczyną jest fakt, iż jest ona uboższa w tlen i bogata w produkty przemiany materii, natomiast krew prowadzona do lewego przedsionka jest jaśniejsza, ponieważ jest ona bogata w tlen [2].

### 1.2. Żylaki.

Żylak jest to widoczne, trwałe, odcinkowe rozszerzenie żyły lub żył układu powierzchniowego. Jest to zjawisko bardzo popularne, jedno z najczęstszych w Polsce i na świecie. Wieloletnie badania pozwoliły na wyszczególnienie wielu czynników ryzyka rozwoju tego schorzenia. Należą do nich między innymi czynniki genetyczne, ciąża, rodzaj wykonywanej pracy i wiele innych. Poza wyodrębnieniem źródeł ryzyka powstania, powstał również podział żylaków. Możemy je podzielić na pierwotne i wtórne [1].

Pierwsza grupa powstaje samoistnie. Przyczyną ich powstania są czynniki genetyczne, styl życia, rodzaj wykonywanej pracy (z przeważającą pozycją stojącą lub siedzącą, a co za tym idzie powstawanie zastoju żylnego), nadmierny wysiłek fizyczny. Związane są z mniejszą zawartością tkanki sprężystej w ścianach żylnych. Jest to jednoznaczne z ich mniejszą odpornością na rozciąganie. W związku z tym światło takiej żyły wciąż się rozszerza, a to prowadzi do niewydolności zastawek żylnych. To natomiast umożliwia cofanie się (tzw. refluks) krwi i jej zaleganie, a w rezultacie dalsze poszerzanie się światła żyły. W celu zapobiegania powstania tego rodzaju żylaków wskazane jest noszenie elastycznych pończoch, opasek oraz gimnastykowanie kończyn. Dzięki aktywności sportowej uruchamiana zostaje pompa mięśniowa, która skutecznie zapobiega powstaniu żylaków pierwotnych dzięki ułatwieniu odpływu krwi i niwelowaniu zastoju żylnego.

Druga grupa żylaków – żylaki wtórne powstaje w wyniku przebycia lub w trakcie stanów chorobowych toczących się w organizmie człowieka, które powodują

permanentny zastój krwi w układzie żylnym. Głównym powodem powstania tego rodzaju żylaków jest przebyte zapalenie żył głębokich, w następstwie, którego powstaje zespół pozakrzepowy charakteryzujący się nie tylko żylakami, ale również obrzękami, zmianami troficznymi skóry oraz nawrotowymi, przewlekłymi owrzodzeniami przeważnie w okolicach kostek przyśrodkowych.

Niekiedy wyróżnia się też trzecią grupę żylaków – o rzadkiej etiologii. Spowodowane są one nabytymi lub wrodzonymi przetokami tętniczo – żylnymi (połączeniem dwóch lub więcej narządów, tj żył i tętnic w wyniku procesów patologicznych). Włączany jest do tej grupy również Zespół Klippela – Treanaunaya (zespół wad wrodzonych, związanych z malformacjami naczyniowymi, charakteryzujący się przerostem kości i tkanek miękkich, zwłaszcza w obrębie kończyn dolnych; rozległymi żylakami jednej kończyny dolnej; naczyniakami obejmującymi zmienioną chorobowo kończynę [4]) [1].

Żylaki są przyczyną wielu powodujących dyskomfort dolegliwości. Powodują skurcze, uczucie „ciężkich nóg”, obrzęki, pieczenie. Odczucia te nasilają się w ciągu dnia i ustępują po przejściu się lub po położeniu się. Schorzenie to częściej dotyka kobiet (rodzaj wykonywanej stojącej lub siedzącej pracy, wielokrotne ciążę) niż mężczyzn [1]. W celu zdiagnozowania poziomu niewydolności żylnych są próby Trendelenburga i Perthesa. Jednak jednym z najistotniejszych badań pozwalającym ustalić sposób i rodzaj leczenia jest badanie ultrasonograficzne – USG Doppler [1]. Jest to badanie, które odbywa się w pozycji stojącej. Przeprowadzający badanie lekarz obserwuje przepływ krwi w żyłach, ich anatomię i strukturę. USG Doppler jest tak istotnym rodzajem diagnostyki, ponieważ dzięki niemu możliwe jest wykrycie nawet bardzo drobnych schorzeń tętnic i żył [1].

### 1.3.Krew [5, 6]

Krew jest płynem ustrojowym. Układ krążenia umożliwia jej pełnienie funkcji transportowej oraz zapewnia komunikację między poszczególnymi układami organizmu. Jest to tkanka łączna, krążąca głównie w naczyniach krwionośnych lub w jamie ciała. Krew składa się ze specjalnych komórek (również pełniących pewne funkcje) oraz z osocza, w którym komórki te są zawieszane. Za sprawą serca możliwe jest by krew pompowana była poprzez tętnice do wszystkich narządów i by ponownie wracała do mięśnia sercowego przy pomocy żył. Układ krążenia dorosłego człowieka zawiera ok 70-80 ml krwi na kilogram masy ciała. Krew możemy podzielić ze względu na stopień utlenowania. Dzielimy ją wtedy na krew utlenowaną – płynącą w tętnicach obiegu dużego i żyłach obiegu małego, oraz na krew odtlenowaną, która jest słabiej wysycona tlenem w stosunku do wcześniej wspomnianego rodzaju krwi. Płyne ona w tętnicach obiegu małego i żyłach obiegu dużego

W skład krwi wchodzi składniki komórkowe oraz osocze, poza nimi we krwi znajdują się także hormony, rozpuszczone gazy a także substancje odżywcze (cukier, tłuszcze, witaminy), transportowane do komórek. W składzie krwi znajdują się także produkty przemiany materii (mocznik, kwas moczowy, itd.), które transportowane są do miejsc, gdzie mają być wydalone.

Z fizykochemicznego punktu widzenia krew jest zawiesiną, czyli mieszaniną cieczy i ciał stałych i zachowuje się jak płyn nienewtonowski. Krew ma lepkość większą niż osocze. Spowodowane jest to obecnością we krwi erytrocytów, które dzięki zdolności do zmiany kształtu przy większych prędkościach przepływu krwi powodują, że ma ona właściwości zbliżone raczej do emulsji niż do zawiesiny.

Współczynnik pH dla krwi waha się pomiędzy 7,35 a 7,45. Przy wartościach niższych od podanej najniższej mówi się o kwasicy, natomiast przy wyższych od podanej najwyższej o zasadowicy.

Krew i jej składniki pełnią wiele istotnych funkcji w organizmie. Mają one na celu podtrzymanie funkcji życiowych. Głównym i jednym z najważniejszych zadań jest transport tlenu i składników odżywczych do komórek i przenoszenie produktów przemiany materii z komórek do miejsca ich wydalenia. Krew transportuje również hormony zapewniające prawidłowe funkcjonowanie układów organizmu. Ponadto krew zapewnia homeostazę, czyli utrzymanie równowagi wodnej i elektrolitowej, regulację wartości pH i temperatury ciała.

Krew wchodzi w skład układu odpornościowego. Jej funkcją w tym układzie jest reakcja obronna przeciwko ciałom obcym i antygenom przy pomocy fagocytów i przeciwciał. Pełni ona również funkcję podtrzymującą, dzięki stałemu ciśnieniu oraz utrzymaniu stałej temperatury ciała i organów wewnętrznych za pomocą przepływu z żył powierzchniowych do żył głębokich.

## 2. Modelowanie

### 2.1. Równanie Naviera- Stokes'a

Modelowanie przeprowadzono w programie *COMSOL* wykorzystując układ równań opisujący zasadę zachowania pędu dla przepływu płynu z uwzględnieniem właściwości krwi, jako płynu newtonowskiego:

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

Gdzie:

$\rho$  – gęstość płynu

$\vec{u}$  – wektor prędkości płynu

$p$  – ciśnienie

$\mu$  – lepkość kinematyczna

$\lambda$  – lepkość dynamiczna (w praktyce przyjmuje się  $\lambda = -\frac{2}{3}\mu$ )

T – oznacza transpozycję macierzy

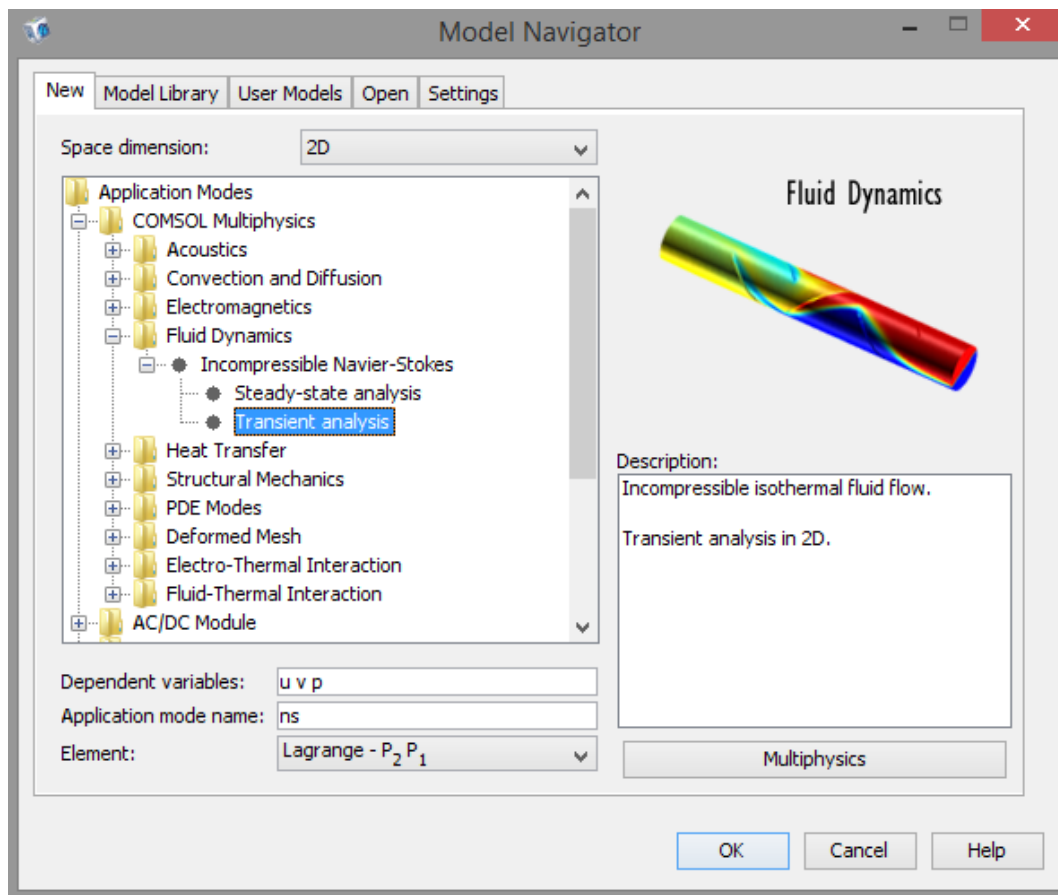
Zastosowane równanie Naviera Stokes' a można podzielić na 4 części:

1. Opis sił wewnętrznych w płynie
2. Siły pochodzące od ciśnienia
3. Siły wynikające z lepkości
4. Wszystkie siły zewnętrzne działające na płyn.

Ze względu na zależność dla płynów nieściśliwych  $\nabla \cdot \vec{u} = 0$ , człon  $\lambda(\nabla \cdot \vec{u})I$  jest pomijalny.

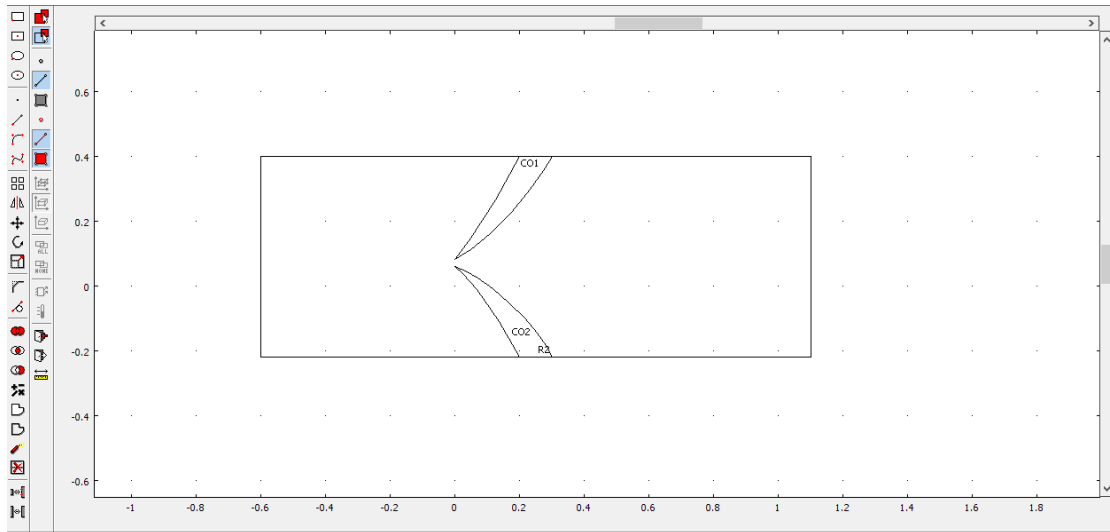
## 2.2. Założenia symulacji

W programie wybrano analizę 2D dotyczącą nieściśliwego przepływu płynów (Fluid Dynamics) opisanego równaniem Naviera Stokes'a (Incompressible Navier Stokes). Analizę przeprowadzono w funkcji czasu (Transient analysis).

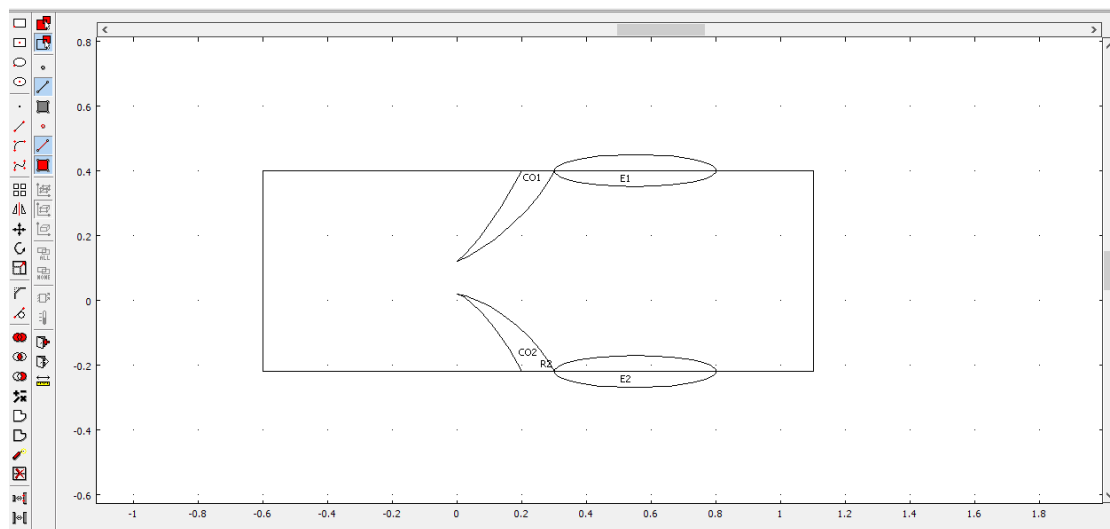


Rys. 1. Wybór modelu analizy w programie *COMSOL 3.4*.

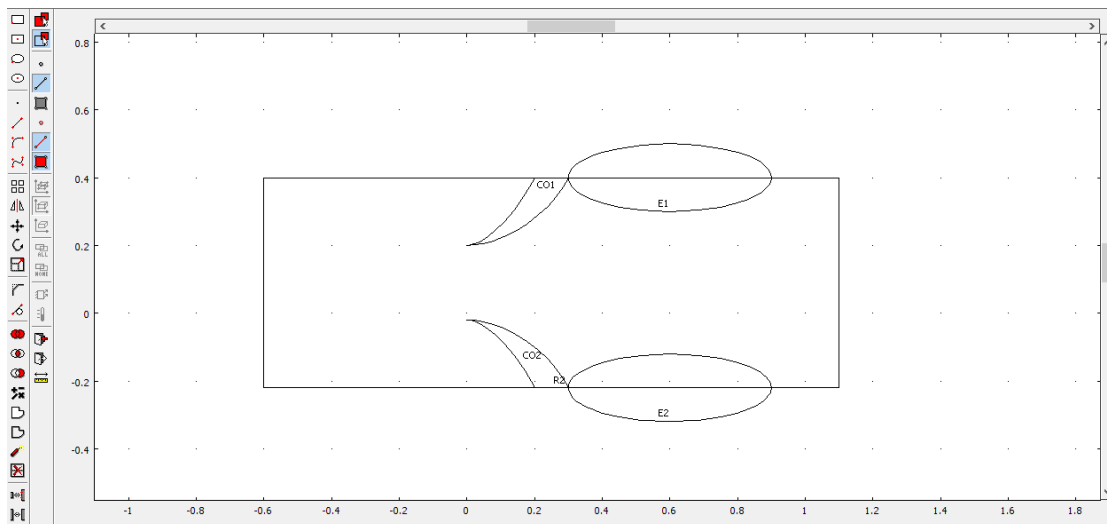
Uproszczone modele 2D żyły zdrowej oraz uszkodzonej wraz z zastawkami wykonano bezpośrednio w programie *COMSOL*.



Rys. 2. Schemat zdrowej żyły. CO1, CO2- zastawki żyłne, R2- żyła.



Rys. 3. Schemat żyły z niewydolnymi zastawkami żylnymi. CO1, CO2- zastawki żyłne, R2- żyła, E1,E2- odkształcenia naczyniowe.



Rys. 4. Schemat żyły z anomalią naczyniową (żylak). CO1, CO2- zastawki żyłne, R2- żyła, E1,E2- odkształcenia naczyniowe.

### 2.3. Właściwości materiałowe

Ze względu na brak możliwości wyboru materiału opisującego właściwości krwi, w zakładce *Options* → *Constants* przyjęto następujące stałe [Rys. 5]:

Gęstość:  $\rho_b = 1055 \text{ [kg/m}^3\text{]}$

Dynamiczny współczynnik lepkości:  $\nu_b = 0,0035 \text{ [Pa} \cdot \text{s]}$

Prędkość maksymalna przepływu krwi na brzegu:  $u_{max} = 1,2 \text{ [m/s]}$

Ciśnienie przepływu krwi:  $p_b = 1332,24 \text{ [Pa]}$

The screenshot shows the 'Constants' dialog box in COMSOL. It contains a table with four columns: Name, Expression, Value, and Description. The table is populated with the following data:

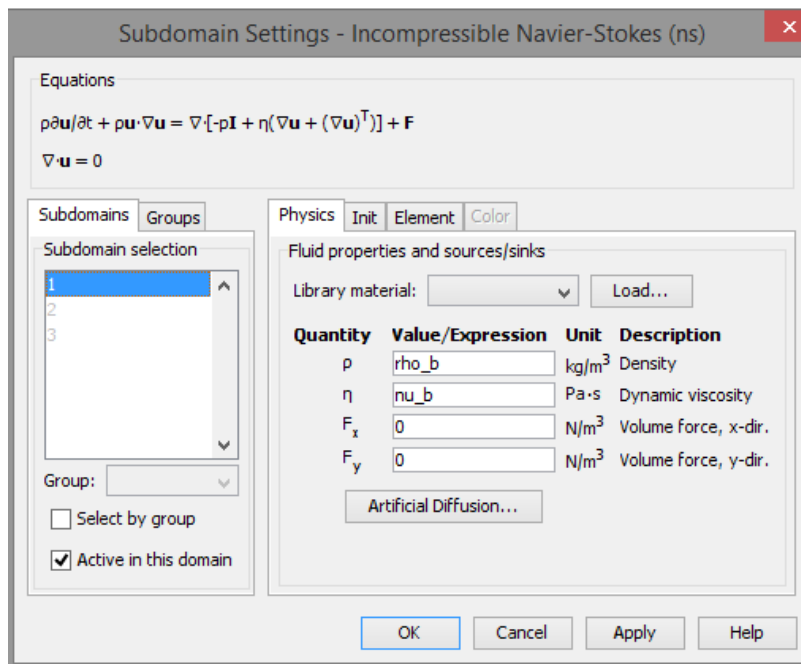
Name	Expression	Value	Description
rho_b	1055	1055	
nu_b	0.0035	0.0035	
umax	1.2	1.2	
p_b	1332.24	1332.24	

At the bottom of the dialog box, there are icons for file operations and buttons for 'OK', 'Cancel', 'Apply', and 'Help'.

Rys. 5. Przyjęte stałe w programie *COMSOL*.



W zakładce *Subdomain Settings* określono ustawienia:

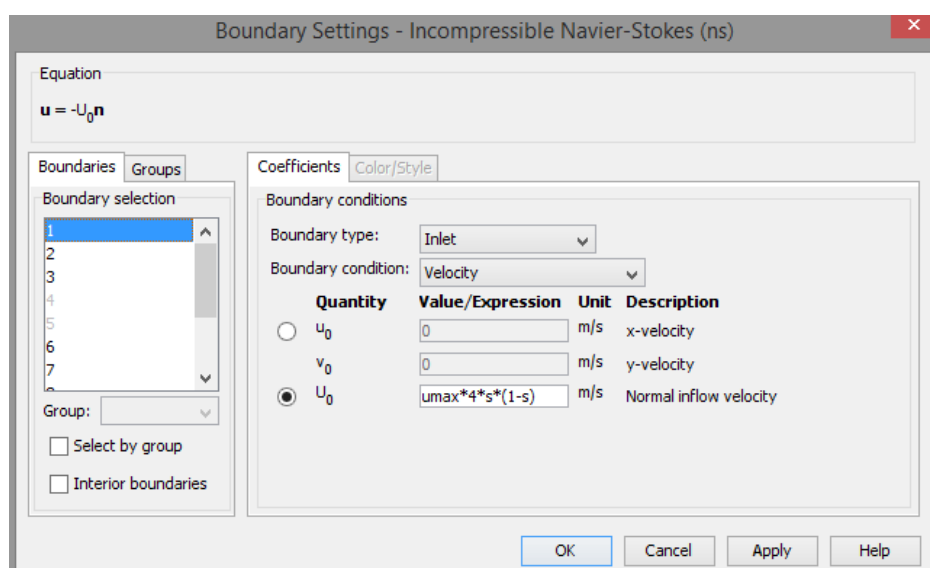


Rys. 6. Ustawienia dla miejsca przepływu krwi.

#### 2.4. Warunki brzegowe

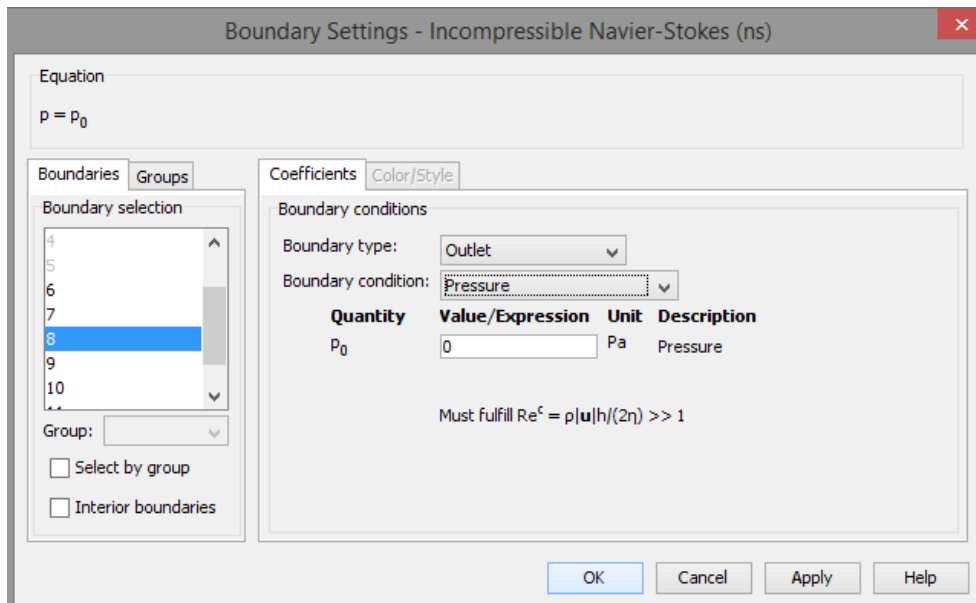
W zakładce *Physics* → *Boundary Settings* określono warunki brzegowe niezbędne do przeprowadzenia analizy przepływu krwi:

Wlot- *Inlet*; warunek brzegowy- prędkość wpływającego do kanału płynu ma kształt paraboli (opisuje to równanie:  $U_0 = u_{max} * 4 * s * (1 - s)$  [m/s] (Rys.7) )



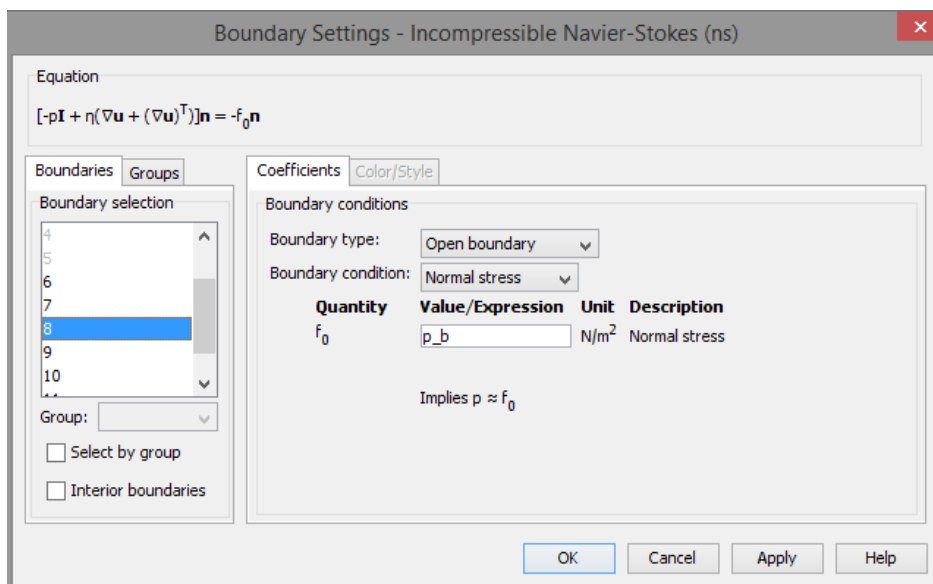
Rys. 7. Warunek brzegowy dla wlotu płynu w analizowanym przekroju.

Wylot dla żyły zdrowej- *Outlet*; warunek brzegowy: zastawki żyłne minimalnie otwarte, ciśnienie na brzegu wynosi 0 Pa.



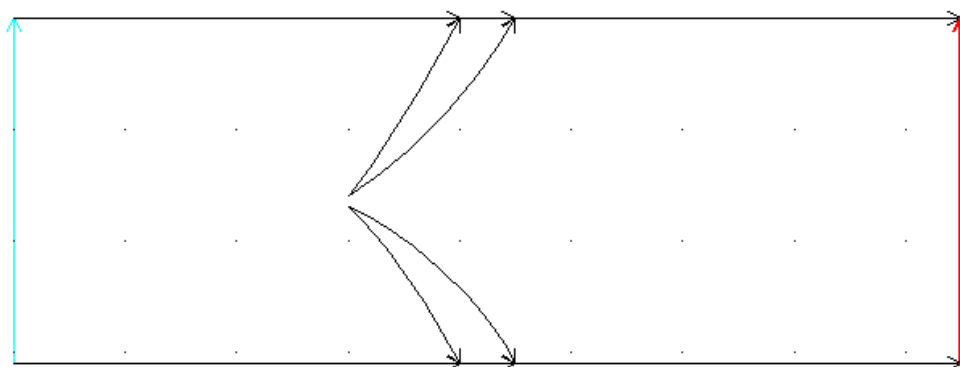
Rys. 8. Warunek brzegowy dla wylotu krwi (zdrowa żyła).

Wylot dla żyły z odkształceniem naczyniowym- *Open boundary* (krew leci z otwartej rany); warunek brzegowy: ciśnienie wywierane na brzeg wynosi  $p_b$ .



Rys. 9. Wylot płynu dla żyły z odkształceniem naczyniowym.

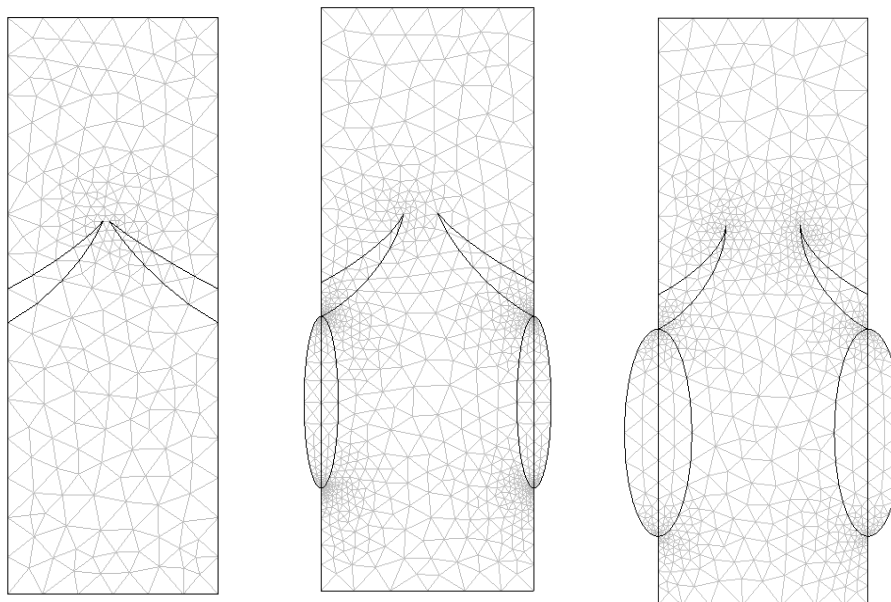
Dla pozostałych ścian wybrano warunki *Wall, No slip*.



Rys. 10. Schemat żyły z zaznaczonymi brzegami: kolorem niebieskim- wlot, kolorem czerwonym- wylot, kolorem czarnym- pozostałe ściany.

## 2.5. Generowanie siatki

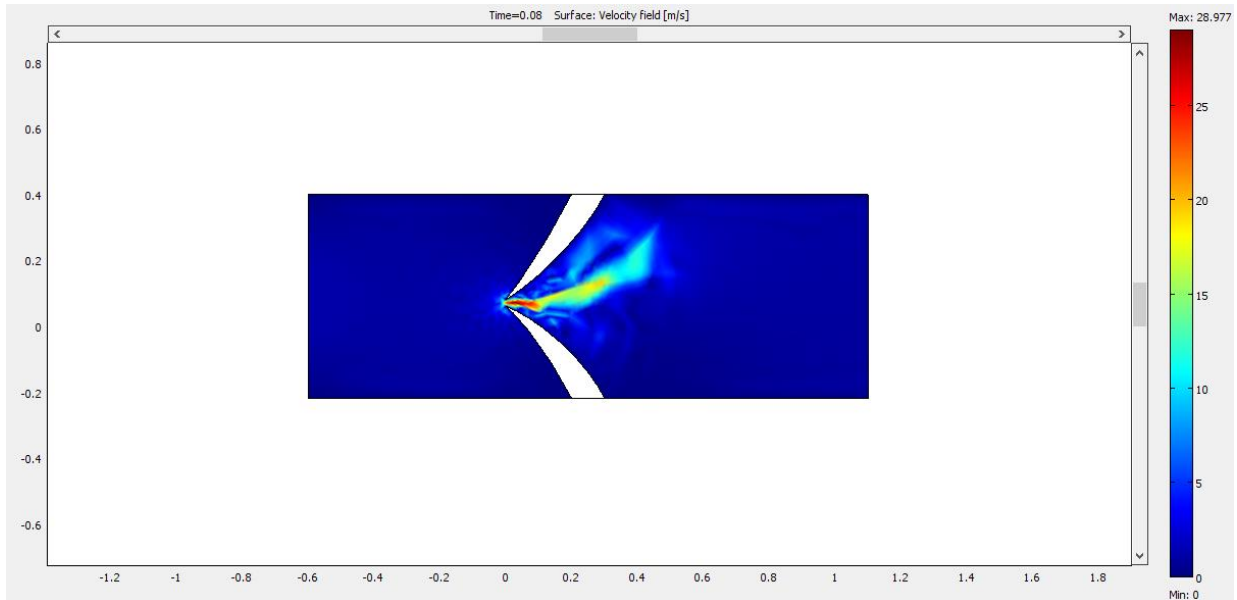
Wygenerowana siatka składała się odpowiednio dla żyły zdrowej, żyły z niewydolnymi zastawkami oraz z odkształceniem naczyniowym z 478, 1852 oraz 1564 elementów.



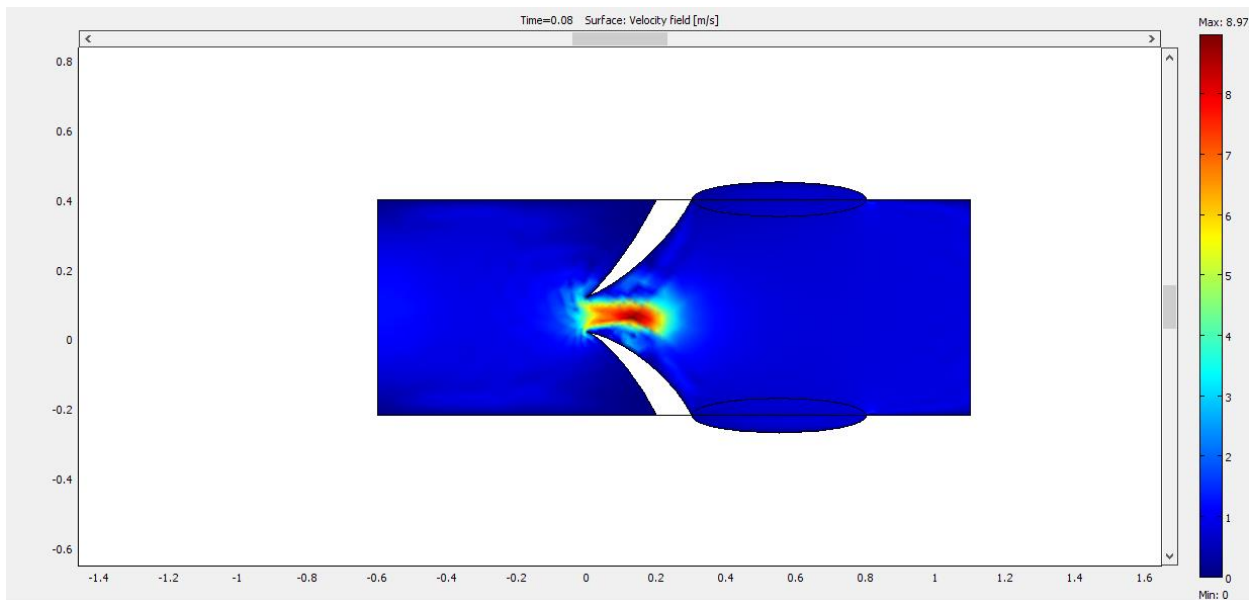
Rys. 11. Wygenerowana siatka dla analizowanych przypadków przepływu krwi.

### 3. Analiza i symulacja przepływu krwi

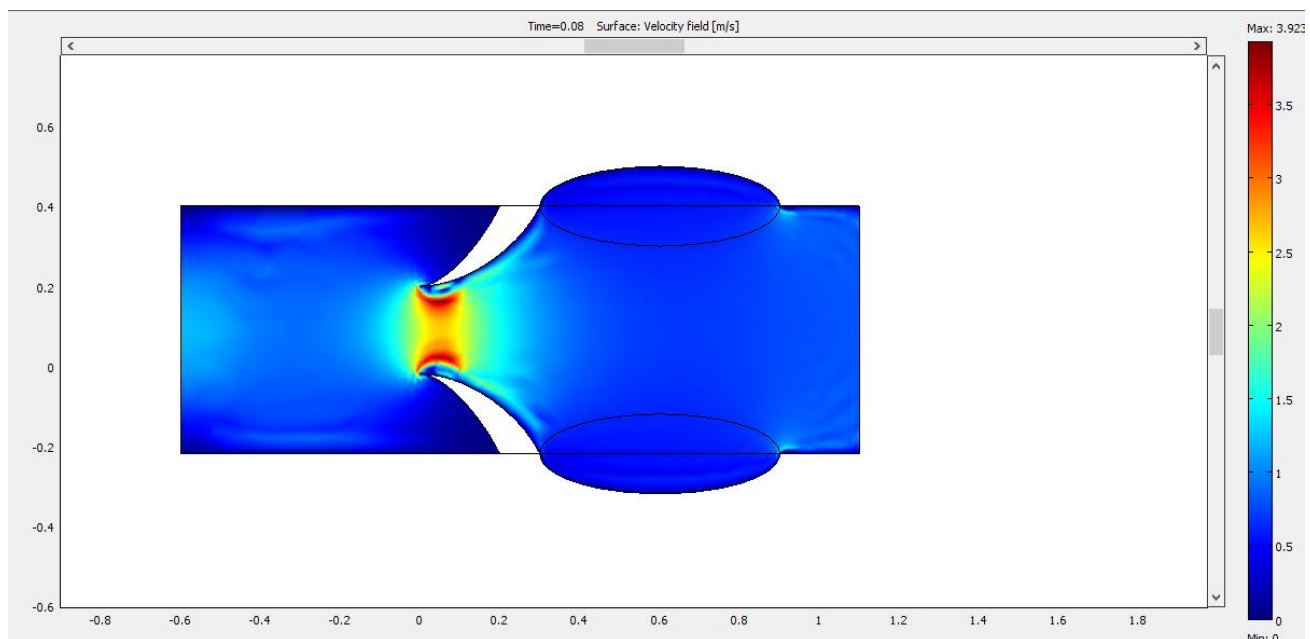
Symulację przeprowadzono w przedziale czasowym 0- 0,8 sekund. Przy dłuższym czasie wykonywania analizy program nie pracował prawidłowo (zaczynał się).



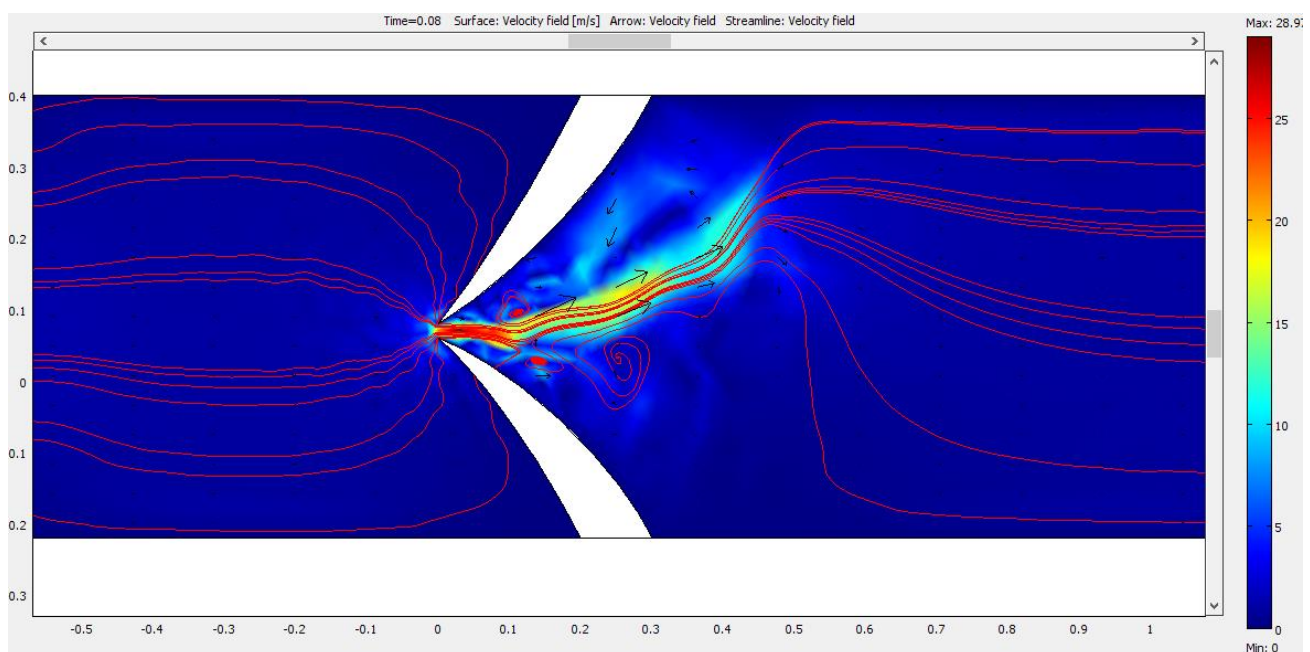
Rys. 11. Wyniki symulacji przepływu krwi w żyłę zdrowej.



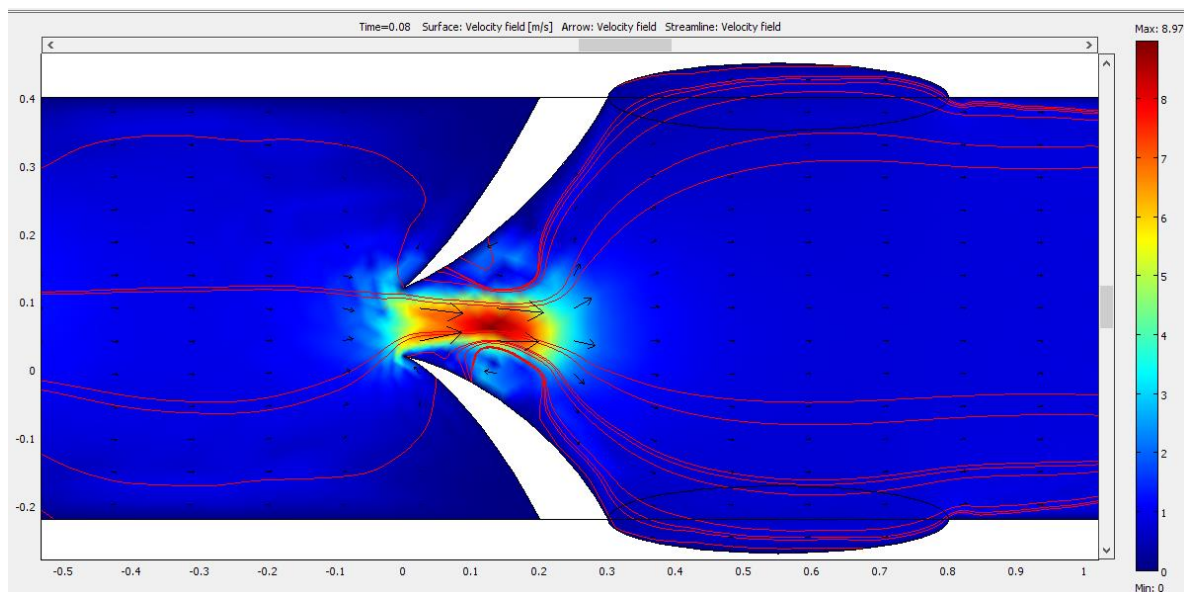
Rys. 12. Wyniki symulacji przepływu krwi w żyłę z uszkodzonymi zastawkami.



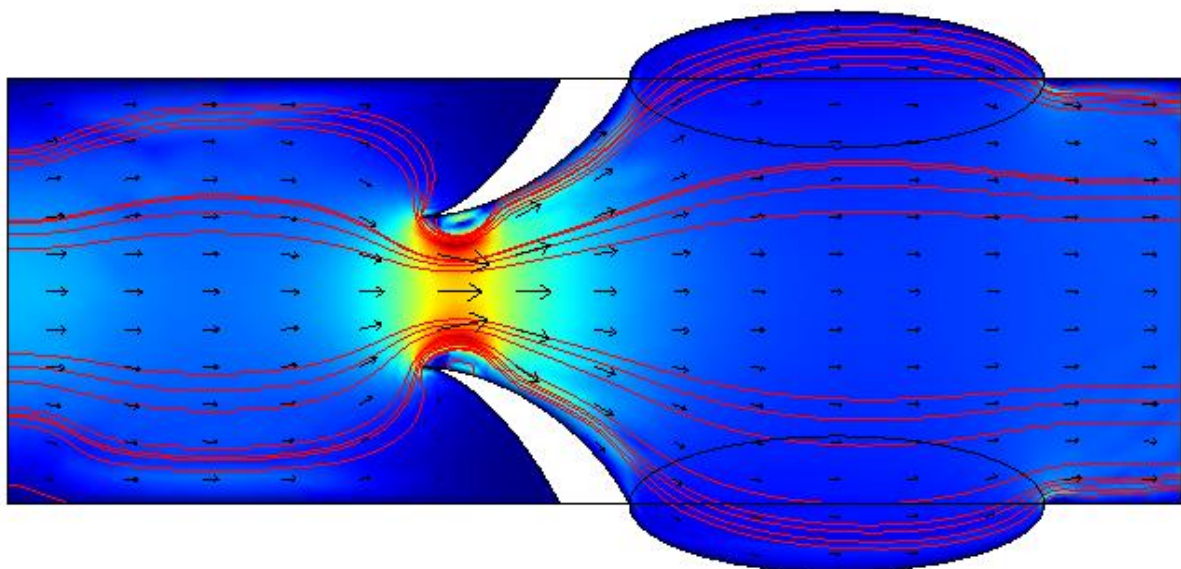
Rys. 13. Wyniki symulacji przepływu krwi w żyłę z niewydolnością.



Rys. 14. Wynik symulacji przepływu krwi z uwzględnieniem linii funkcji prądu (*Streamline*) i kierunkiem przepływu płynu (*Arrow*) dla pierwszego przypadku.



Rys. 15. Wynik symulacji przepływu krwi z uwzględnieniem linii funkcji prądu (*Streamline*) i kierunkiem przepływu płynu (*Arrow*) dla drugiego przypadku.



Rys. 16. Wynik symulacji przepływu krwi z uwzględnieniem linii funkcji prądu (*Streamline*) i kierunkiem przepływu płynu (*Arrow*) dla trzeciego przypadku.

#### 4. Podsumowanie i wnioski

Analizę przepływu krwi w trzech żyłach przeprowadzono w sposób uproszczony. Na podstawie otrzymanych wyników można wywnioskować, że największa wartość prędkości przepływu krwi zaobserwowano przy przepływie pomiędzy zastawkami. Dla żyły z minimalnie rozszerzonymi zastawkami widoczne jest tworzenie prądów wirowych, które zapoczątkowują powstanie odkształcenia naczyniowego. W zdrowej żyły człowieka

zastawki powinny domykać się tak, aby zatrzymać przepływ krwi do dalszej części naczynia. Ze względu na poziom trudności wykonania symulacji ww. przypadku, uproszczono model, analizując sytuację z minimalnie uszkodzonymi zastawkami, jako symulację wyjściową. Wektory prędkości nie rozkładają się równomiernie, co może być spowodowane nieznacznym błędem popełnionym podczas projektowania schematu.

W dwóch pierwszych analizowanych przypadkach wartość prędkości przepływu krwi ulega widocznej zmianie w małym zakresie. W przypadku powstania niewydolności żyłnej prędkość przepływu krwi posiada wyższe wartości i różni się od prędkości wyznaczonych w poprzednich przypadkach. Zmiany te widoczne są na Rys. 11 -16.

## 5. Bibliografia

[1] – Portal lekarski z wiadomościami dot. żylaków. :

<http://www.fragmat.pl/pl/zylaki/inz.html>

[2] – Portal kardiologiczny:

<http://www.kardiolo.pl/budowanaczyn.htm>

[3] – Portal paramedyczny:

<http://www.poradnik-pacjenta.pl/zyly.html>

[4] – Informacje dot. Zespołu Klippla – Trenaunaya:

[https://pl.wikipedia.org/wiki/Zesp%C3%B3%C5%82\\_Klippla-Tr%C3%A9naunaya](https://pl.wikipedia.org/wiki/Zesp%C3%B3%C5%82_Klippla-Tr%C3%A9naunaya)

[5] – Strona Narodowego Centrum Krwi:

<http://www.nck.gov.pl/prawie-wszystko-o-krwi-2/>

[6] – Strona Regionalnego Centrum Krwiodawstwa i Krwiolecznictwa:

[http://www.rckik-katowice.pl/o\\_krwi.php](http://www.rckik-katowice.pl/o_krwi.php)