

Simulace proudění krve v idealizovaných modelech patologicky poškozených cév s uvažováním různých hemoreologických vlastností

Studentka: **Kateřina Sůsová**

Studijní program: **B07715A270014 Počítačové modelování v mechanice**

Bakalářská práce představuje velmi dobrý úvod do problematiky modelování proudění lidské krve s ohledem na neneutonské vlastnosti krve. Práce není „pouhým“ matematickým modelováním, ale snaží se i ukázat na složité tokové vlastnosti krve, které jsou ovlivňovány celou řadou faktorů. Demonstrace použitého přístupu je ukázána na vybraných geometriích cév.

Bakalářská práce je rozdělena do osmi částí, čtyř kapitol, úvod, závěr, použitá literatura a přílohy. Jednotlivé kapitoly mají celkem logickou výstavbu a jsou vedeny snahou uvést řádně čtenáře do zkoumané problematiky. Zpracování kapitol samozřejmě odráží dosavadní zkušenosti studentky s vědeckou prací a z celkové konstrukce práce je vidět, že studentka musela pro zdárné vypracování práce nastudovat velké množství literárních zdrojů. Numerické řešení modelových úloh je realizováno pomocí vlastních modelů implementovaných do prostředí software ANSYS Fluent. Dosažené výsledky jsou zpracovány v grafické podobě.

Po obecném úvodu a uvedení do problematiky přechází studentka v první kapitole na základní pojmy a stručný náhled do řešené problematiky. Definiuje a popisuje základní charakteristiky lidské krve, její složení a tokové vlastnosti. Uvádí přehledně krevní částice a ukazuje na viskoelastické vlastnosti krve. Na konci kapitoly se potom stručně věnuje matematickému popisu proudění krve a uvádí základní řídicí rovnice Newtonova modelu proudění lidské krve ve velkých cévách. Výklad doplňuje grafickými podklady. Druhá kapitola uvádí čtenáře do problematiky neneutonských kapalin, kde je ale nejdříve na Couettovo proudění ukázán Newtonův konstitutivní vztah. Dále je tento vztah rozšířen na zobecněnou Newtonovu kapalinu a jsou přehledně uvedeny základní neneutonské efekty. Následuje základní rozdělení neneutonských kapalin a jsou ukázány charakteristické reogramy těchto kapalin a závislosti zdánlivé viskozity na smykové rychlosti proudu. Dále je v této kapitole diskutován model pseudoplastických kapalin a jsou zavedena dvě základní bezrozměrná čísla (Debořino a Weissenbergerovo číslo), která umožňují charakterizovat základní vlastnosti viskoelastických kapalin. Třetí kapitola tvoří teoretický základ pro numerické simulace na vybraných typech cév. Jsou zde zavedeny základní reologické modely krve a uvedeny příslušné matematické modely proudění, které byly implementovány a numericky řešeny ve výpočetním systému ANSYS Fluent. Nejdříve jsou uvedeny reologické modely krve na různých úrovních vlastností (Newtonova a zobecněná Newtonova kapalina, viskoelastická kapalina). Následuje přehled kompletních matematických modelů pro řešení vybraných typů proudění krve v cévách a nastínění jejich implementace do výpočtového systému ANSYS Fluent. Pro vlastní numerické řešení je aplikován přístup založený na metodě SIMPLE doplněný o příslušné počáteční a okrajové podmínky. Čtvrtá kapitola je věnována výsledkům numerických simulací, tedy verifikaci použitých modelů. Jsou uvažovány čtyři modely cév: přímá trubice, trubice se stenózou, bifurkace – přímé trubice, bifurkace – se stenózou jedné trubice. Vlastní numerické řešení je realizováno na základě metody konečných objemů. Jako vstupní parametry pro geometrii cév a řešení proudění krve jsou převzaty hodnoty z dostupných literárních zdrojů. Získané numerické výsledky jsou zpracovány v přehledné grafické podobě. Např. na obr. 11 je zřetelně vidět rozdíl mezi prouděním Newtonovy kapaliny a zobecněné Newtonovy kapaliny. Další část kapitoly je věnována analýze neneutonských efektů v modelu cévy se stenózou a porovnání výsledků pro různé konstitutivní vztahy. Na závěr kapitoly je potom analyzováno

proudění krve v bifurkaci cév bez a se stenózou. Výsledky jsou opět zpracovány graficky. V závěru potom studentka stručně shrnuje svoji bakalářskou práci a vyhodnocuje dosažené numerické výsledky. Se závěry lze souhlasit. Poslední věta závěru potom naznačuje možné pokračování práce. V příloze jsou dále uvedeny programové nadstavby aplikované ve výpočtovém systému ANSYS Fluent a uvedeno analytické řešení laminárního izotermického proudění nestlačitelné Newtonovy a zobecněné Newtonovy kapaliny v trubici stálého průřezu.

Bakalářská práce má logické členění, obsahově je napsána srozumitelně a má velmi dobrou odbornou úroveň. U některých obrázků (např. obr. 1 až 7) by bylo vhodné zlepšit popis a u některých obrázků zvětšit barevné rozlišení. V českém textu dále nebývá zvykem vkládat odborné termíny v angličtině. V práci je velmi málo překlepů, ale je třeba místo slovesa „spočítat“ používat sloveso „vypočítat“, proudění je Hagenovo-Poiseuillovo atd. Dále systém Navierových-Stokesových rovnic má obecně tenzorový charakter, pouze zápis rovnic (1.3) a (1.4) je napsán v globální symbolice a systém rovnic (3.25) až (3.31) je zapsán v indiciální symbolice a využívá Einsteinovu sumační konvenci. Navíc zápis vztahu (3.25) neodpovídá vztahu (1.4) (stejná nepřesnost se propisuje i do dalších vztahů). Dále např. v popisu obr. 5 by bylo vhodné vložit i hodnoty indexu toku, pro označení „obrázků“ psát „obr.“, okrajová podmínka pro tlak je Neumannova podmínka atd. Ještě bych doporučil dávat rozměry používaných veličin do hranaté závorky (pro lepší přehlednost). Poznamenejme, že tento odst. je třeba chápat jako doporučení pro další práci.

Otázky do diskuse při vlastní obhajobě bakalářské práce

- 1) Co vyjadřují termíny velké a středně velké cévy (např. str. 3, co je měřítkem velikosti)?
- 2) Jak je obecně definováno Couettovo proudění?
- 3) Proč se při viskozimetrických měřeních zavádí pojem „zdánlivá viskozita“?
- 4) Kdy lze krev modelovat jako Newtonovu kapalinu, resp. znáte ještě jiné modely, než jsou uvedené v práci?
- 5) Proč jsou voleny různé geometrie stenózy cévy (obr. 14)?
- 6) Jak lze vysvětlit, že při bifurkaci je v jisté části trubice rychlost krve modelovaná Carreauovým modelem větší než rychlost proudění krve získaná Newtonovým modelem (str. 38 dole)?

Závěr

Bakalářská práce splnila uvedené zadání a stanovené cíle. Práce má velmi dobrou obsahovou úroveň s konkrétními teoretickými i praktickými přínosy. Formální úprava bakalářské práce je rovněž na velmi dobré úrovni.

Bakalářskou práci hodnotím známkou „výborně“ a doporučuji práci k obhajobě před komisí SZZ na KME.

V Plzni dne 12. června 2023

Prof. Ing. Jiří Křen, CSc.