

MODELOVÁNÍ PROUDĚNÍ NENEWTONSKÉ KAPALINY V BYPASSOVÉ ANASTOMÓZE TYPU SIDE-TO-SIDE S VYUŽITÍM REÁLNÉ GEOMETRIE

Dagmar JARKOVSKÁ¹, Alena JONÁŠOVÁ²

1 ÚVOD

Cílem této práce bylo matematicky popsat tok krve v side-to-side anastomóze aorto-koronárního bypassu, který se implantuje pacientům s rozsáhlým aterosklerotickým postižením koronárních tepen, u nichž se angioplastika, popřípadě aplikace stentu jeví jako neúčinné. Proudění krve v side-to-side anastomóze, kde dochází k bočnímu napojení bypassového štěpu a nativní arterie, bylo modelováno jako laminární proudění nestlačitelné nenevtonské kapaliny. Pro analýzu nestacionárního proudění krve v trojrozměrném modelu anastomózy s reálnou geometrií byl použit komerční software *Fluent 6.2*.

2 MODELOVÁNÍ KRVE JAKO NENEWTONSKÉ KAPALINY

Tokové vlastnosti krve jsou mimo jiné ovlivněny přítomností červených krvinek, jež mají tendenci při nízkých smykových rychlostech ($\dot{\gamma} < 10 \text{ s}^{-1}$) tvořit shluky, tzv. *rouleaux*, dochází tak k nárůstu celkové viskozity krve. Naopak při vysokých smykových rychlostech ($\dot{\gamma} > 100 \text{ s}^{-1}$) lze pozorovat opačný jev - rozpad rouleaux a následný pokles vazkosti, Vimmr (2008). Nenevtonské chování krve bylo v této práci popsáno dynamickou vazkostí $\eta(\dot{\gamma})$ uvažovanou jako funkce smykové rychlosti, přičemž byly využity dva makroskopické modely. Prvním z nich je Carreauův-Yasudův model

$$\eta(\dot{\gamma})^{(1)} = \eta_{\infty}^{(1)} + (\eta_0^{(1)} - \eta_{\infty}^{(1)}) \left[1 + (\lambda^{(1)} \dot{\gamma})^m \right]^{\frac{n-1}{m}}, \quad (1)$$

kde $\eta_{\infty}^{(1)} = \lim_{\dot{\gamma} \rightarrow \infty} \eta(\dot{\gamma})^{(1)} \equiv 3,45 \cdot 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$; $\eta_0^{(1)} = \lim_{\dot{\gamma} \rightarrow 0} \eta(\dot{\gamma})^{(1)} \equiv 56 \cdot 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$; $\lambda^{(1)} = 1,1902 \text{ s}$; $m = 1,25$; $n = 0,22$, Cho et al. (1991). Dalším modelem nenevtonské kapaliny aplikovým v této práci byl modifikovaný Crossův model

$$\eta(\dot{\gamma})^{(2)} = \eta_{\infty}^{(2)} + (\eta_0^{(2)} - \eta_{\infty}^{(2)}) \left[1 + (\lambda^{(2)} \dot{\gamma})^b \right]^{-a}, \quad (2)$$

kde $\eta_{\infty}^{(2)} = \lim_{\dot{\gamma} \rightarrow \infty} \eta(\dot{\gamma})^{(2)} \equiv 3,5 \cdot 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$; $\eta_0^{(2)} = \lim_{\dot{\gamma} \rightarrow 0} \eta(\dot{\gamma})^{(2)} \equiv 160 \cdot 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$; $\lambda^{(2)} = 8,2 \text{ s}$; $a = 1,23$; $b = 0,64$, Leuprecht et al. (2000). Pro pozdější porovnání výsledků byl rovněž uvažován model newtonské kapaliny s dynamickou vazkostí $\eta = 3,7 \cdot 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$.

3 NUMERICKÁ SIMULACE PROUDĚNÍ NENEWTONSKÉ KAPALINY

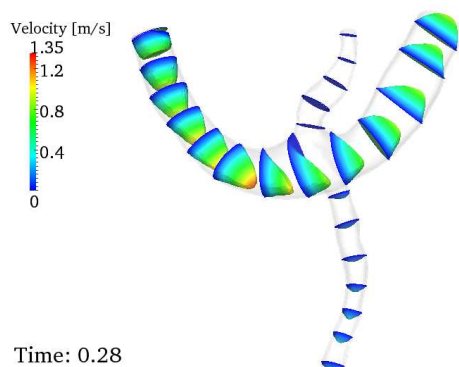
V této práci byl použit model side-to-side anastomózy s reálnou geometrií, rekonstruovaný na základě snímků z počítačové tomografie, které byly poskytnuty Kariochirurgickým

¹ Dagmar Jarkovská, studentka navazujícího studijního programu Aplikované vědy a informatika, obor Mechanika, specializace Biomechanika, e-mail: djarkovs@students.zcu.cz

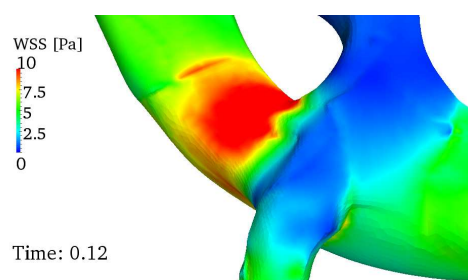
² Alena Jonášová, studentka doktorského studijního programu Aplikované vědy a informatika, obor Aplikovaná mechanika, e-mail: jonasova@kme.zcu.cz (vedoucí práce)

oddělením FN Plzeň. Pro trojrozměrný model bočního napojení žilního štěpu a koronární arterie byla v softwaru *Altair Hypermesh 8* vytvořena výpočtová síť složená z tetrahedrů a zahuštěná v oblasti mezní vrstvy.

Samotné numerické řešení nestacionárního proudění krve proběhlo v softwaru *Fluent 6.2*, kde byla pomocí uživatelem definované funkce zadána proměnná dynamická viskozita určená na základě Carreauova-Yasudova modelu, (1), resp. modifikovaného Crossova modelu, (2). Na vstupech bypassového štěpu i nativní arterie byla předepsána rychlost s obdélníkovým profilem proměnným v čase, hodnoty vstupních rychlostí byly převzaty z Frauenfelder et al. (2007) a upraveny pro potřeby našeho modelu. Na výstupech byly definovány konstantní hodnoty tlaku, 12 000 Pa pro štěp a 11 900 Pa pro arterii. Pro stěny, které byly uvažovány jako nepoddajné, byly aplikovány neskluzové okrajové podmínky. K vizualizaci numerických výsledků této práce byl využit software *Paraview 3.8*, např. obr. 1 a 2.



Obrázek 1: Crossův model: rychlostní profily ve vybraných řezech v čase $t = 0,28$ s.



Obrázek 2: Carreaův-Yasudův model: smykové napětí na stěně modelu v místě napojení cév v čase $t = 0,12$ s.

4 ZÁVĚR

V důsledku relativně vysokých hodnot rychlosti na vstupu štěpu v některých fázích srdečního cyklu nebyly pozorovány výrazné neneutonské efekty ani u jednoho z aplikovaných makroskopických modelů. Dosažené výsledky budou v budoucnu ověřeny vlastním numerickým řešičem založeným na metodě konečných objemů. Zároveň je v budoucnu možné rozšířit v současnosti vytvořený matematický model proudění neneutonské kapaliny o předpoklad poddajnosti stěn.

Poděkování: Příspěvek byl podpořen interním studentským grantem SGS-2010-077 na ZČU v Plzni.

REFERENCE

- Cho, Y.I., Kensey, K.R., 1991. Effects of the non-Newtonian viscosity of blood on flows in a diseased arterial vessel. Part 1: Steady flows. *Biorheology*. Vol. 28. pp 241-262.
- Frauenfelder, T. et al., 2007. Flow and wall shear stress in end-to-side and side-to-side anastomosis of venous coronary artery bypass grafts. *BioMedical Engineering OnLine*.
- Leuprecht, A., Perktold, K., 2000. Computer simulation of non-Newtonian effects of blood flow in large arteries. *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering*. Vol. 4. pp 149-163.
- Vimr, J., 2008. *Modelování proudění tekutin s aplikacemi v biomechanice a ve vnitřní aerodynamice*. Habilitační práce, Západočeská univerzita v Plzni.