

3D-0D modelování proudění krve v rekonstruovaných modelech aneurysmat břišní aorty

Barbora Marešová¹

1 Úvod

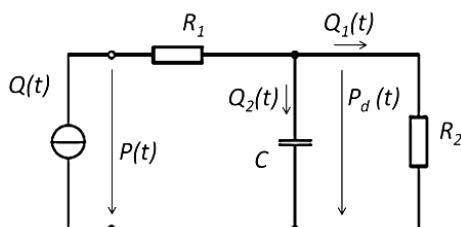
Aneurysma břišní aorty (AAA) představuje závažné onemocnění tepenného systému postihující převážně muže-kuřáky vyššího věku a vykazující 80 až 90% mortalitu v důsledku náhlé ruptury oslabené cévní stěny. V současné době je k operativnímu zákroku přistupováno pouze na základě rozměru výdutě a rychlosti jejího růstu. Numerické simulace proudění krve mohou být nápomocné při predikci ruptury AAA, protože zohledňují i vliv hemodynamických faktorů, tvar výdutě, případně materiálovou strukturu cévní stěny. Při simulaci proudění krve v cévách je problematické určit správné okrajové podmínky tak, aby odpovídaly skutečné fyziologii cévního řečiště. V zahraničních studiích, např. Tsanas (2009), je tento problém obvykle řešen s využitím víceškálového modelování. Cílem této práce je provést numerické simulace proudění krve v 3D modelech AAA s použitím 0D modelu (tříprvkového Windkessel modelu) jako výstupní okrajové podmínky.

2 Tříprvkový Windkessel model

Tvar tlakové vlny v lidské aortě během srdečního cyklu lze popsat tzv. Windkessel modelem. Tento model je schopný zachytit jevy jako roztažnost elastických cév nebo odpor periferního řečiště. Tříprvkový Windkessel model vychází z analogie s elektrickým obvodem s dvěma odpory R_1 a R_2 a jedním kondenzátorem C , přičemž kondenzátor zde zastupuje elasticitu aorty a odpory představují odpor proximální aorty a odpor periferních cév. Elektrotechnické schéma tříprvkového WM je znázorněno na obrázku 1 a matematicky ho lze popsat následujícími rovnicemi pro neznámé tlaky $P_d(t)$ a $P(t)$:

$$Q(t) = \frac{P_d(t)}{R_2} + C(t) \frac{dP_d(t)}{dt}, \quad (1)$$

$$P(t) = P_d(t) + Q(t)R_1, \quad (2)$$

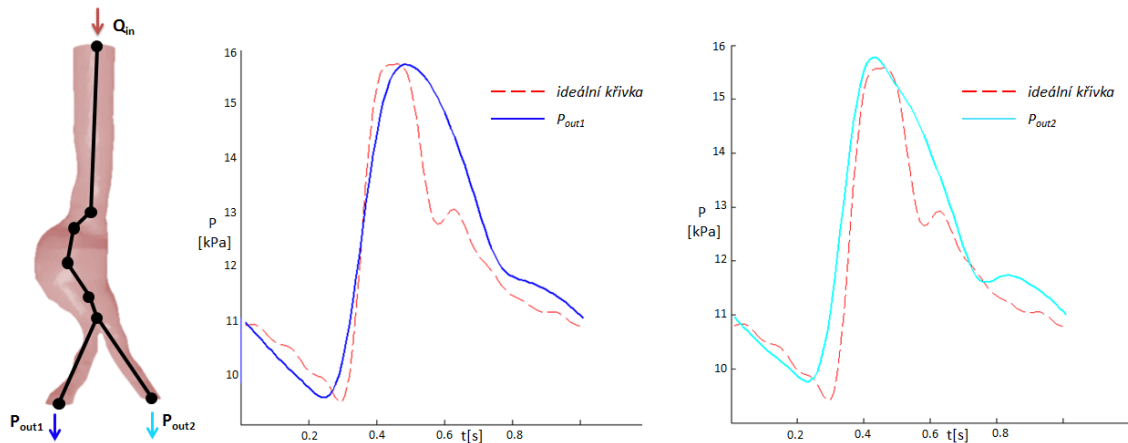


Obrázek 1: Schéma tříprvkového Windkessel modelu.

¹ Student navazujícího studijního programu Počítačové modelování v inženýrství, obor Aplikovaná mechanika, e-mail: siroka@students.zcu.cz

2 Identifikace parametrů Windkessel modelu

Připojením Windkessel modelů na výstupy 3D modelu aneurysmatu lze v závislosti na průtočném množství $Q(t)$ simulovat odpovídající tlakovou křivku. Ta je následně předepsána na výstup rekonstruovaného modelu AAA (pressure-outlet). Poměrně náročným úkolem je správně identifikovat parametry modelu R_1 , R_2 a C . Z důvodu menší časové náročnosti byly parametry naladěny nejprve na 1D modelu AAA (obrázek 2, vlevo) v Matlabu. Reálný model AAA byl rozdělen na několik segmentů, na kterých bylo jednorozměrné proudění newtonské kapaliny formulováno pomocí rovnice kontinuity a Bernoulliho rovnice (včetně uvažování místních a třecích tlakových ztrát). Samotné naladění parametrů bylo provedeno pomocí genetického algoritmu, jenž je jedním z nástrojů prostředí Matlab. Jako referenční tlak pro naladění parametrů posloužil tlak na vstupu do modelu, převzatý z Khanafer et al. (2009), ze kterého byly vypočítány ideální křivky na obou výstupech (obrázek 2, vpravo).



Obrázek 2: 1D/3D model AAA a identifikace parametrů na výstupech modelu.

3 Metodika 3D-0D modelování proudění krve v AAA

Reálné modely aneurysmat byly zrekonstruovány z CT snímků pomocí programu 3D Slicer. Výpočetní síť byla vytvořena v softwaru ANSYS Meshing a následná simulace proudění byla provedena v ANSYS Fluent. Pro každý 3D model AAA byl v Matlabu připraven odpovídající 1D model, na kterém byly identifikovány potřebné parametry tříprvkového Windkessel modelu. Okrajová podmínka v podobě Windkessel modelu byla do Fluentu implementována pomocí user-defined function (UDF). Krev byla v případě 3D proudění navíc uvažována jako neneutonská kapalina, jejíž tokové vlastnosti byly popsány Carreauovým-Yasudovým modelem viskozity, Sochi (2014).

Práce byla podpořena interním studentským grantem SGS-2013-026 na ZČU v Plzni.

Literatura

- Tsanas, A., Goulermas, J.Y. et al., 2009. The Windkessel model revisited: A qualitative analysis of the circulatory system. *Medical Engineering & Physics*. Vol. 31. pp 581–588
- Sochi, T., 2014. Non-Newtonian rheology in blood circulation. *arXiv:1306.2067 [physics.flu-dyn]*
- Khanafer, K. et al., 2009. Fluid–structure interaction of turbulent pulsatile flow within a flexible wall axisymmetric aortic aneurysm model. *European Journal of Mechanics*. Vol. 28. pp 88-102