

## Modelování perfúze a perfúzního CT vyšetření jater

Jaroslava Brašnová<sup>1</sup>, Eduard Rohan<sup>2</sup>, Vladimír Lukeš<sup>3</sup>

### 1 Úvod

Modely perfúze jater (proudění krve v játrech) i modely jejich perfúzního CT (*PCT = Perfusion Computed Tomography*) vyšetření naleznou v budoucnu své uplatnění v lékařství, především v chirurgii. Motivací tohoto výzkumu je požadavek lékařů na vytvoření softwarového nástroje pro přesnější plánování chirurgických zákroků a simulace predikování změn jaterní perfúze na základě vstupních dat (CT, PCT). Ke změnám perfúze dochází v závislosti na změnách struktury a objemu jaterní tkáně, jež jsou způsobeny onemocněním (nádorová onemocnění, jaterní cirhóza) a následnou léčbou (resekce). Další motivací je zlepšení a rozšíření analýzy dat získaných právě CT a PCT vyšetřením, nebo také stanovení jaterních segmentů.

### 2 Model perfúze

Modelování jaterní perfúze je rozděleno na dílčí problémy, popsané různými modely. Proudění v největších cévách popisuje 1D Bernoulliho model. Proudění v menších cévách a jaterní tkáni (parenchymu), uvažované jako porézní médium, popisuje 3D multikompartmentový (multisektorový) model. Tento model vystihuje proudění v hierarchické struktuře cévního řečiště jater a je odvozen z rovnice kontinuity a Darcyho zákona se zahrnutím možnosti výměny tekutiny mezi kompartmenty i s vnějším prostředím. Oba modely jsou propojeny pomocí zřídla a propadů.

Každý kompartment  $i$  je tvořen kontinuem na oblasti  $\Omega_i$ , obsahuje pouze cévy určitého průměru a jeho vlastnosti jsou dány permeabilitou  $K^i [m^2 \cdot (Pa \cdot s)^{-1}]$  a perfúzními parametry  $G_j^i [(Pa \cdot s)^{-1}]$  mezi dvojicí  $i$  a  $j$ . Perfúzi ve 3D multikompartmentovém modelu popisuje stavová rovnice (1)

$$\int_{\Omega_i \setminus \Sigma_i} \underbrace{K^i \nabla p^i}_{-w^i} \cdot \nabla q^i + \int_{\Omega_i \setminus \Sigma_i} \sum_j \underbrace{G_j^i (p^i - p^j)}_{\mathcal{J}_j^i} q^i = \int_{\Omega_i \setminus \Sigma_i} f^i q^i, \quad \forall q^i \in Q^i, \quad (1)$$

kde  $\mathcal{J}_j^i$  je mezikompartmentový tok,  $w^i$  je perfúzní rychlost,  $p^i$  ( $p^j$ ) je tlak,  $f^i$  je externí vtok do kompartmentu (zřídla a propady) a  $q^i$  jsou testovací funkce. Stavová úloha modelu perfúze je numericky řešena metodou konečných prvků v softwaru *SfePy* a jejím výsledkem je rozložení tlaků ve všech kompartmentech.

<sup>1</sup> studentka doktorského studijního programu Aplikované vědy a informatika, obor Aplikovaná mechanika, e-mail: jbrasnov@students.zcu.cz

<sup>2</sup> Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta aplikovaných věd, Katedra mechaniky, e-mail: rohan@kme.zcu.cz

<sup>3</sup> Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta aplikovaných věd, Katedra mechaniky, e-mail: vlukes@kme.zcu.cz

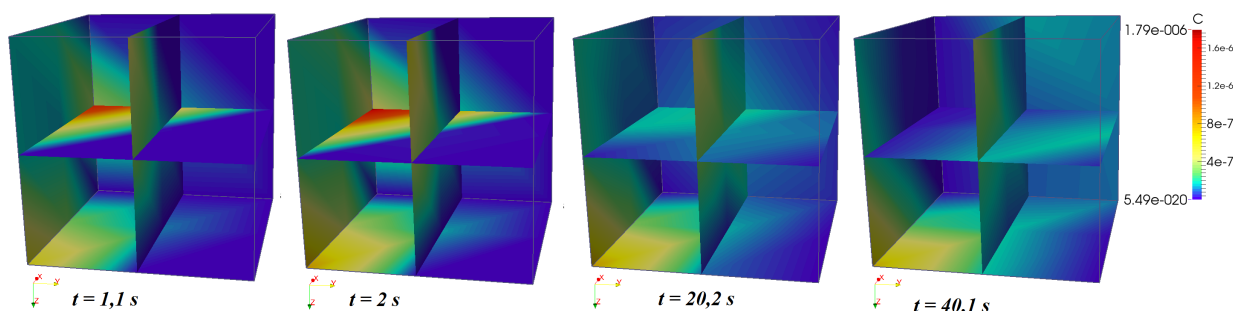
### 3 Model perfúzního CT vyšetření

PCT vyšetření je dynamické skenování pro stanovení průtoku krve orgány, které je založeno na vyhodnocování změn denzity tkáně po aplikaci kontrastní látky. Základním rysem je lineární vztah mezi denzitou vyjádřenou pomocí Hounsfieldových jednotek a lokální koncentrací kontrastní látky vyjádřenou saturací. Výstupem PCT jsou číselné hodnoty farmakokinetických parametrů a barevné perfúzní mapy. Pro simulaci tohoto vyšetření je použit model šíření kontrastní látky se stavovou rovnicí (2) numericky implementovaný pomocí metody konečných objemů v softwaru *MATLAB* s využitím dvou-stupňového Rungeova-Kuttova schématu.

$$\phi^i \frac{\partial S^i}{\partial t} + \nabla \cdot (S^i \mathbf{w}^i) + \sum_{j \in \mathcal{I}_-^i} S^j \mathcal{J}^{ij} + \sum_{j \in \mathcal{I}_+^i} S^i \mathcal{J}^{ij} = S_{\text{in}} f_+^i + S^i f_-^i, \quad (2)$$

kde  $S^i[-]$  je saturace,  $\phi^i[-]$  je objemový podíl cév (porozita),  $S_{\text{in}}$  udává časový bolus kontrastní látky a  $t[s]$  je čas.

Pro numerické simulace byl použit jednoduchý dvou-kompartmentový model s geometrií tvaru krychle tvořenou tetraedrálními elementy. Model obsahuje několik zřídél a propadů a časový bolus kontrastní látky byl zvolen 2 s. Nejprve byla vyřešena stavová úloha modelu perfúze, čímž bylo získáno rozložení tlaků. Následně byla vyřešena stavová úloha modelu šíření kontrastní látky, čímž byly získány hodnoty saturací a koncentrace, jež je váženým součtem všech saturací, tj.  $C = \sum_i \phi^i S^i$ . Na obrázku 1 je znázorněn vývoj koncentrace kontrastní látky  $C$  v čase  $t$ .



**Obrázek 1:** Vývoj koncentrace kontrastní látky v čase.

### 4 Závěr

Příspěvek se zabývá modelováním perfúze jater a jejich perfúzního CT vyšetření. K numerické implementaci představených modelů byla využita metoda konečných prvků a metoda konečných objemů v softwarech *SfePy* a *MATLAB*.

#### Poděkování

Tento příspěvek byl podpořen grantovými projekty SGS-2016-059 a LO 1506.

#### Literatura

Rohan, E., Lukeš, V., Jonášová, A. (2018) Modeling of the contrast-enhanced perfusion test in liver based on the multi-compartment flow in porous media. *J. Math. Biol.* <https://doi.org/10.1007/s00285-018-1209-y>