Zadavatel posudku: VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav

Oponentní posudek disertační práce
Ing. et Ing. BSc. Františka Prinze

zpracované v anglickém jazyce na téma

Development of the lattice Boltzmann method for fibre transport and deposition

K posouzení byla předložena disertační práce napsaná v anglickém jazyce koncipovaná jako komentovaný soubor 3 nejvýznamnějších vědeckých prací autora a jeho spoluautorů ke sledované problematice. Vlastní text disertační práce má rozsah 93 stran a je členěn na 13 kapitol včetně úvodu, závěru a výčtu vlastních publikací autora a jeho spoluautorů. Disertační práce rovněž obsahuje seznam v textu použitých zkratek a veličin a dále seznam literatury o 104 položkách, z nichž většinu tvoří relevantní zahraniční reference. K vlastnímu textu disertační práce je připojen dodatek obsahující 3 nejvýznamnější vědecké práce autora, které jsou v kapitolách 7, 9 a 11 této disertační práce stručně komentovány včetně shrnutí hlavních dosažených poznatků, a to vždy s odkazem na formulované cíle, stanovené vědecké otázky a hypotézy. První práce je původní vědecký článek doktoranda (s jeho stanoveným autorským podílem 31%) a dalších 11 spoluautorů publikovaný v roce 2024 v prestižním impaktovaném časopise *Computers in Biology and Medicine* (JIF_2023 = 7; Q1). Druhá práce je původní vědecký článek doktoranda (s jeho stanoveným autorským podílem 50%) a dalších 7 spoluautorů publikovaný v roce 2025 opět v prestižním impaktovaném časopise *Computers in Biology and Medicine* (JIF_2024 = 6,3; Q1). A konečně třetí práce je původní vědecký článek doktoranda (s jeho stanoveným autorským podílem 30%) a dalších 5 spoluautorů publikovaný v roce 2025 v prestižním impaktovaném časopise *Powder Technology* (JIF_2024 = 4,6; Q1).

Disertační práce se zabývá matematickým modelováním a numerickými simulacemi transportu a depozice velice malých (1 – 10 μm) částic v lidských dýchacích cestách pomocí lattice Boltzmannovy metody, jejíž použití pro tyto účely se zdá být efektivní v porovnání s klasickými přístupy CFD. V práci jsou kromě běžných sférických částic diskutovány a modelovány zejména částice vláknité, které, jak plyne z provedené rešerše, mají díky svému tvaru větší schopnost proniknout hlouběji do dýchacího traktu, ale z hlediska matematického modelování jejich transportu dýchacím traktem představují značnou složitost. Jejich nepravidelný tvar způsobuje odpor, který závisí na aktuální orientaci vláknité částice v proudu tekutiny (vzduchu). Proto jedním z hlavních cílů této disertační práce bylo implementovat metodu ELER (Euler-Lagrange Euler-Rotation) do softwaru OpenLB (založeného na lattice Boltzmannově metodě a vyvíjeného na KIT – Karlsruhe Institute of Technology výzkumným týmem kolem prof. Mathiase Krause), která by měla přesněji popisovat pohyb vláknitých částic, než výpočtově méně náročnější numerické modely vycházející z efektivních průměrů částic a založených např. na Haider-Levenspielově (H-L) korelaci, či na Tran-Congově (T-C) korelaci.

Hodnocení disertační práce

Po prostudování disertační práce mohu konstatovat, že se jedná o kvalitní disertační práci. Z provedené rešerše založené zejména na zahraniční literatuře (kapitola 5) je evidentní, že

téma disertační práce je velice aktuální a řeší i z mezinárodního pohledu závažný vědecký problém s velikým potenciálem uplatnění ve zdravotnictví, např. při léčbě chronických plicních onemocnění, či astmatu zefektivněním transportu léčiv pomocí inhalace do dýchacích cest. Výzkum transportu a depozice aerosolů v lidských dýchacích cestách je tedy celospolečensky relevantní a má smysl se jím zabývat. Z tohoto pohledu spatřuji nesporný přínos doktoranda, jednak v náročné implementaci metody ELER do softwaru OpenLB vyvíjeného na Karlsruhe Institute of Technology pro modelování přesnějšího pohybu vláknitých částic v bifurkacích, a jednak v aplikaci tohoto vyvíjeného softwaru pro numerické simulace transportu a usazování vláknitých částic v realistickém anatomickém modelu lidských dýchacích cest uvažovaného až do sedmé generace větvení pro zvolené režimy proudění vzduchu při nádechu.

Ocenil jsem, že doktorand ve 2. a 3. kapitole s jistým nadhledem a účelně pro potřeby této disertační práce shrnuje současný stav poznání v oblasti anatomie, fyziologie a morfologie lidských dýchacích cest a zejména pak s důrazem na přehled základních mechanismů depozice částic. Ve 4. kapitole se doktorand věnuje popisu numerických metod výpočtové dynamiky tekutin a částic (CFPD), které dále využívá ve své práci. Velice stručně zmiňuje princip lattice Boltzmannovy metody pro numerickou simulaci proudění tekutin. Tuto stručnost si vysvětluji tím, že doktorand pro své numerické simulace využil hotový software OpenLB vyvíjený na KIT a algoritmickou implementací LBM se zřejmě zabýval již ve své diplomové práci, viz [74], resp. [8] v kapitole 13. V kapitole 4 dále velice stručně popisuje metodu ELER pro modelování pohybu vláknitých částic. Vzhledem k tomu, že implementace této metody do softwaru OpenLB je jedním z hlavních cílů této práce, očekával bych, že bude popisu této metody a její implementaci, viz kapitola 8, věnováno podstatně více prostoru. Bohužel jsem se o této problematice z vlastního textu práce příliš mnoho nedozvěděl. Naopak se mi líbilo, jak doktorand v 5. kapitole analyzuje a hodnotí poznatky získané na základě jím provedené rešerše. Je zcela správné, že nezapomíná ani na dostupné experimentální práce, které mohou posloužit pro validaci vyvíjených numerických modelů. V návaznosti na provedenou rešerši doktorand identifikoval mezeru v poznání, na jejímž základě v kapitole 6 jasně formuloval ambiciózní, ale splnitelné cíle (a) – (d). K dosažení těchto cílů navrhl 3 vědecké otázky a k nim doplnil pracovní hypotézy, které dávají základ k systematickému výzkumu, který přinesl řadu původních výsledků. Tyto výsledky byly publikovány ve 3 prestižních impaktovaných časopisech formou původních vědeckých článků doktoranda a jeho spoluautorů, které tvoří základ této disertační práce, viz výše. Vzhledem k tomu, že publikované články již prošly nezávislým recenzním řízením, nelze pochybovat o kvalitě dosažených výsledků a o celkovém jejich přínosu k prohloubení stávajících poznatků o numerickém modelování transportu a usazování vláknitých částic v aplikaci na realistický model lidských dýchacích cest. Jsem přesvědčen, že se podařilo splnit všechny cíle formulované v této disertační práci. Drobnou připomínku mám ke kapitole 7, která se věnuje komentáři k prvnímu vědeckému článku. Hned v úvodu je uvedeno, že tento článek přispívá k naplnění cíle (b). Obávám se, že tomu tak není, neboť první článek se primárně nezabývá implementací metody ELER do softwaru OpenLB. Rovněž si myslím, že první vědecká otázka není zformulována šťastně. Neboť korektní srovnání efektivity a přesnosti LBM s klasickými přístupy CFD je u tak komplexního řešeného problému velice obtížné. Komentář uvedený v textu práce je více „o pocitech“ než o konkrétních měřitelných indikátorech.

Z mého pohledu má předložená disertační práce vysokou odbornou úroveň a má pěknou grafickou úpravu. I když nejsem rodilý mluvčí, myslím si, že je práce napsána velmi dobrou angličtinou. O to více oponenta zarazí, že v několika větách česky psaného abstraktu je nemálo překlepů/chyb. Dále si dovoluji upozornit na překlep v tenzoru $\mathbf{L}_{xy}$ v (4.43), ve vztazích (4.46) má být správně $\omega_{x''}$, $\omega_{y''}$ a $\omega_{z''}$, ve vztazích (4.46) je nesoulad v označení vedlejší poloosy u elipsoidu, viz obr. 4.4 (a), přičemž označení „a_p“ je zavedeno i v uvedeném

seznamu použitých veličin („b“ nikoliv), v textu pod rovnicí (4.38) má být správně uvedeno **K´** (nikoliv K).

Vzhledem k tomu, že disertační práce je koncipována jako komentovaný soubor 3 nejvýznamnějších výzkumných prací autora a jeho spoluautorů (v jednom případě i 11 spoluautorů), není možné jednoznačně a objektivně posoudit konkrétní vlastní přínos doktoranda k řešené problematice. To je podle mého názoru veliká nevýhoda takto koncipovaných disertačních prací. Proto si dovoluji požádat doktoranda, aby v rámci obhajoby své disertační práce jednoznačně uvedl svůj vlastní přínos k řešené problematice (na čem se konkrétně podílel, co přesně implementoval, atd.)

Přiložené teze disertační práce jsou zpracovány kompaktně a v odpovídající kvalitě, až na česky psaný abstrakt, viz výše.

Publikační úroveň doktoranda je podle mého názoru vysoce nadprůměrná. Ve 13. kapitole disertační práce uvádí soupis publikačních výstupů, jichž je autorem nebo spoluautorem. Jedná se o 15 výstupů, neboť jeden je uveden dvakrát (1. a 9.), mezi nimiž jsou mimo jiné články ve významných impaktovaných časopisech, či příspěvky ve sbornících konferencí indexovaných v databázi WoS nebo Scopus. Je vidět, že doktorand je součástí dlouhodobě budovaného a dnes již výborně etablovaného výzkumného týmu nejen v rámci FSI na VUT v Brně, ale i v rámci celé ČR.

Otázky do diskuse během obhajoby

1. Mohl by se doktorand vyjádřit k tomu, proč je počet částic detekovaných výpočtově i experimentálně v levé větvi bifurkace vyšší než v pravé větvi, viz str. 65 – první zjištění?
2. Mohl by doktorand uvést, jaké okrajové podmínky byly předepsány na hranicích výpočtové oblasti u realistického modelu lidských dýchacích cest uvažovaného až do sedmé generace větvení? Jednalo se o fyziologické hodnoty? Jak byly okrajové podmínky implementovány v rámci vyvíjeného softwaru OpenLB?
3. Mohl by se doktorand podrobněji vyjádřit k vlastní implementaci metody ELER v rámci softwaru OpenLB?
4. V numerických simulacích byla uvažována idealizovaná interakce částic se stěnou. Měl by doktorand představu, jak model interakce přiblížit více reálnějším podmínkám odpovídajícím stěně dýchacího traktu?
5. Byly dosažené výsledky konzultovány s lékaři? Předpokládá se nějaká budoucí spolupráce s lékaři?

Závěr

Doktorand Ing. et Ing. BSc. František Prinz jednoznačně prokázal, že se velmi dobře orientuje v problematice výpočtové dynamiky tekutin a částic (CFPD), má odpovídající znalosti z numerických metod zaměřených zejména na metodu konečných objemů (FVM) a lattice Boltzmannovu metodu (LBM) včetně jejich implementace, velmi dobře se orientuje v biomechanice lidských dýchacích cest a umí samostatně vědecky pracovat. Po odborné stránce se jedná o kvalitní disertační práci a moje výše uvedené kritické připomínky nijak nesnižují odbornou úroveň celé práce a doktoranda. Předložená disertační práce splňuje všechny požadavky na ni kladené. Obsahuje

původní velice cenné výsledky, jejichž vědecký přínos je již potvrzen publikováním ve třech prestižních impaktovaných časopisech kategorie Q1. Disertační práci doporučuji k obhajobě. V případě její úspěšné obhajoby doporučuji udělit doktorandovi titul Ph.D. ve smyslu příslušného zákona.

V Plzni dne 14. listopadu 2025

prof. Ing. Jan Vimmr, Ph.D.

Katedra mechaniky,
Fakulta aplikovaných věd,
ZČU v Plzni,
Technická 8, 301 00 Plzeň