

Prof. dr hab. inż. Artur TYLISZCZAK
Katedra Maszyn Ciepłych
Politechnika Częstochowska

Al. Armii Krajowej 21
42-201 Częstochowa
tel.: (034) 3250505; fax: (034) 3250555
e-mail: artur.tyliszczak@pcz.pl

Częstochowa, 15.01.2025

Recenzja

rozprawy doktorskiej mgr. inż. Aleksandra Sinka nt. "Integration of Statistical Data Analysis and Surrogate Modeling for Uncertainty Quantification, Sensitivity Analysis and Inverse Problems involving Fluid-Structure Interaction models"

Recenzja została opracowana na prośbę prof. dr. hab. Krzysztofa Labusa, zawartą w skierowanym do mnie piśmie z dnia 15 listopada 2024r.

1. Ocena ogólna.

Tematyka pracy doktorskiej dotyczy rozwoju efektywnych metod modelowania i analizy przepływów i odkształceń elementów elastycznych. W pracy, elementem tym jest lewa tętnica wspólna szyjna, co sprawia, że nie można mieć wątpliwości w odniesieniu do istotności analizowanego zagadnienia. Nam wszystkim zależy, aby efekty przeprowadzonych przez Doktoranta badań były wiarygodne, a stworzony przez niego model był precyzyjny i możliwy do zaimplementowania w diagnostyce medycznej. Docelowo, ma on umożliwiać ocenę „sprawności” tętnicy szyjnej na podstawie sztywności tkanki – ścianki tętnicy. O aktualności i wadze podjętej tematyki świadczy to, że przeprowadzone badania były finansowane przez Narodowe Centrum Nauki w ramach projektu "ENTHRAL - Non-invasive in-vivo assessment of stiffness of human artery walls", UMO-2019/34/H/ST8/00624.

W pracy przeprowadzono badania eksperymentalne i modelowe w oparciu o CFD w połączeniu z bardzo wnikliwą analizą oceny poprawności uzyskiwanych danych i stosunkowo skomplikowaną metodyką formułowania modelu zastępczego (surrogate model). Wykorzystywano stanowisko eksperymentalne dedykowane przeprowadzeniu pomiarów optycznych deformacji ścianki modelu tętnicy szyjnej w funkcji natężenia przepływu i zmiennego ciśnienia. W zadaniach CFD stosowano oprogramowanie ANSYS oraz FEBIO. Model zastępczy tworzone w oparciu o skrypty w środowisku Python, dostępne biblioteki i autorskie algorytmy. Wyniki symulacji porównywano z danymi eksperymentalnymi. **W mojej ocenie, temat pracy i użyte w niej metody pozwalają zakwalifikować ją do dyscypliny Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka.** Wykorzystanie metod CFD w połączeniu z analizą odkształcenia (CFD/FEA=FSI) w tego typu badaniach jest niewątpliwie zasadne. Umożliwia to zarówno szczegółową analizę wszystkich parametrów przepływu/odkształcenia, niekiedy niemierzalnych w pracach eksperymentalnych, jak i znacznie redukuje koszty prowadzonych badań. Mam tutaj na uwadze zawsze wysoki koszt finansowy badań eksperymentalnych i ich stopień skomplikowania w przypadku pomiarów

parametrów przepływu w obszarach (tutaj tętnicy) o niewielkich rozmiarach i ich deformacji. W mojej ocenie, narzędzia badawcze, tj. symulacje FSI (CFD/FEA) zweryfikowane i wsparte badaniami eksperymentalnymi zostało bardzo dobrze dobrane do zakresu realizowanych prac i sformułowanego celu pracy. Umożliwiło przygotowanie bazy danych uczących i testowych do opracowania modelu zastępczego, który w diagnostyce medycznej ma być uniwersalny i zastępować badania eksperymentalne oraz czasochłonne symulacje. O ile jasny jest dla mnie zasadniczy cel pracy – stworzenie modelu zastępczego - nie jest dla mnie jasne co było **celem poznawczym**. Czy było to wykazanie, że taki model da się stworzyć? Wydaje się, że nie, bo modele zastępcze istnieją nie od dziś, również takie bazujące na przedstawionym w pracy aparacie matematycznym. Proszę Doktoranta o jednoznaczna deklarację w tej kwestii. Pomijając tę wątpliwość, przedstawiona mi do oceny **praca jest oryginalna i reprezentuje stopień złożoności zwyczajowo spotykany w pracach doktorskich**.

2. Ocena szczegółowa.

Układ pracy jest typowy i podobny do tego jaki dotychczas spotykałem w recenzowanych przeze mnie pracach doktorskich. Praca napisana jest w języku angielskim. Nieliczne błędy językowe nie utrudniają jej zrozumienia, więc nie traktuję tego jako element negatywny. Zasadnicza część pracy składa się z wprowadzenia, czterech rozdziałów opisujących stosowany aparat matematyczny i metody statystyczne analizy wyników badań, metody tworzenia modeli zastępczych i planowania eksperymentów (rzeczywistych i numerycznych) (DoE), opis stanowiska eksperymentalnego i wyniki przeprowadzonej statystycznej analizy otrzymanych wyników pomiarów i symulacji, opis i analizę wyników uzyskanych za pomocą modelu zastępczego. Pracę kończy szczegółowe podsumowanie, wnioski i sugestie dalszych prac. Ponadto, w pracy zamieszczono spis ilustracji, tabel i wykaz większości symboli. Spis literatury jest obszerny, zawiera aż 185 pozycji, w tym 1 pozycja [141], której doktorant jest pierwszym autorem (11 współautorów). Jest to publikacja w uznanym czasopiśmie Measurement (200pkt.) Proszę o informację, czy jest to jedyna licząca się praca Doktoranta w tej tematyce.

We wstępie omówiono tematykę badań, wskazano zasadnicze ich problemy i charakteryzowano prace innych autorów. Zdefiniowano cel pracy doktorskiej w sposób ogólny oraz przedstawiono w punktach procedurę postępowania pozwalającą na jego osiągnięcie. Opisano ideę i metodykę modelowania FSI, metody określania niepewności pomiarowej/obliczeniowej i metody analizy wrażliwości danych oraz tworzenie modeli zastępczych wraz z odniesieniami do aktualnej literatury. Wprowadzenie kończy krótka charakterystyka kolejnych rozdziałów.

Rozdział 2 to szczegółowy opis metod analizy sygnałów pomiarowych wraz bardzo detalicznym przedstawieniem metod matematyki statystycznej stosowanej w tym celu. Są to jednak zagadnienia „książkowe” i nie jestem przekonany czy koniecznym było ich aż tak szczegółowe opisanie – ten fragment pracy nie wnosi w zasadzie nic nowego w mojej ocenie. Lektura tego rozdziału pokazuje, że doktorant bardzo dobrze orientuje się w tej tematyce i rozumiem, że chciał się tą wiedzą pochwalić. Na tym tle zaskakująco pobieżnie potraktowano opis modelu FSI. To jest zaskakujące biorąc pod uwagę, że wyniki symulacji FSI stanowią bazę do stworzenia modelu zastępczego i ich precyzja jest kluczowa. W pracy założono, że przepływ w tętnicy jest turbulentny? Skąd takie założenie? Model fizyczny i model FSI to

prosty odcinek kołowego przewodu dla którego warunki określające typ przepływu (laminarny/turbulentny) są dość precyzyjnie określone w literaturze. Ile wynosiła liczba Reynoldsa? Z moich „zgrubnych” rachunków wynika, że była bardzo niska. Proszę Doktoranta o jej dokładne wyliczenie. To, że przepływ jest zmienny w czasie na skutek fluktuacji ciśnienia/prędkości nie oznacza jeszcze, że jest turbulentny. A jeżeli jest, to należało to pokazać w pracy. Proszę więc to uczynić na obecnym etapie postępowania, tzn. na przykład przedstawić wykres konturowy pokazujący poziom intensywności turbulencji w przepływie. Stan przepływu laminarny/turbulentny ma istotny wpływ na naprężenia na ścianie tętnicy i tym samym jej odkształcenie. Uważam, że opisując model FSI powinna się w tym miejscu znaleźć obszerna dyskusja na temat dokładności tej metody, nie tylko w kontekście one-way czy two-way coupling, ale w kontekście stosowanych algorytmów obliczeniowych i metod dyskretyzacji. Dodatkowo, warto było omówić sukcesy (lub ich brak) innych autorów stosujących FSI do modelowania przepływów w ludzkim ciele, np. płucach, sercu, tętnicach. Tego typu symulacje przecież wykonuje się w innych ośrodkach, w Polsce również. Proszę Doktoranta o dyskusję dokładności metody FSI w tym kontekście na bazie literatury. Proszę o to dlatego, że odnoszę wrażenie, że doktorant „zapomniał”, że metody CFD i FEA są obarczone błędem, niekiedy znacznie większym niż błędy powstające w trakcie prac eksperymentalnych. W przypadku analizowanym w pracy, wyniki FSI są weryfikowane danymi eksperymentalnymi tylko w oparciu o parametry globalne, np. odkształcenie, i w mojej ocenie ta weryfikacja jest tylko częściowo zadowalająca. Mogę sobie z łatwością wyobrazić sytuację, w której nawet najlepiej oszacowany błąd prac eksperymentalnych będzie niemiernodajny na tle błędów symulacji numerycznej. Metody kwantyfikacji błędów symulacji stanowią przedmiot bardzo szeroko zakrojonych badań.

Kluczowym z punktu widzenia celu pracy jest rozdział 3. Przedstawiono w nim teorię planowania eksperymentu (DoE), metody generowania danych testowych, tworzenie modeli zredukowanych, metody oceny niepewności pomiarów, metody Bayesa i pokrewne. Nie jest to materiał nowy, ale niewątpliwie warto było go w pracy zawrzeć. Pokazuje on szereg możliwości konstrukcji modeli zredukowanych wraz z opisem ich wad i zalet przedstawionych w literaturze przedmiotu. Niewątpliwie, Doktorant jest ekspertem w tej dziedzinie. Nie ma uwag do tej części pracy.

W rozdziale 4 przedstawiono stanowisko eksperymentalne, aparaturę pomiarową, analizę statystyczną wyników pomiarów, model FSI oraz weryfikację wyników uzyskanych z jego pomocą. Opis stanowiska i wyników to w zasadzie powielenie materiału przedstawionego w publikacji [141], gdzie jednak zrobiono to trochę lepiej. W pracy doktorskiej, na przykład nie znalazłem informacji o wymiarach modelu fizycznego (fantomu). Badania prowadzono dla trzech wartości ciśnienia skurczowego/rozkurczowego w zakresie normalnym oraz w jednym przypadku dla, ogólnie mówiąc, „pacjenta z niewielkim nadciśnieniem”. Dla każdego stosunku ciśnienia przeprowadzono 7 serii pomiarowych po których fantom tracił swoje właściwości. Jak to było określane/mierzone? Ponadto, jeśli materiał, z którego zbudowany był fantom ulegał zniszczeniu tak szybko, oznacza, że nie odzwierciedlał on tkanki ludzkiej, która na szczęście jest znacznie bardziej trwała. Proszę o wyjaśnienie tej kwestii. W trakcie badań analizowano przebiegi objętościowego natężenia przepływu i ciśnienia. Uzyskiwane dane filtrowano filtrem Hampela eliminującym wartości odstające oraz filtrem dolno-przepustowym. Czy był to filtr Gaussa? Jeśli tak, to jaka była jego dyskretna postać (szerokość filtru)? Czy analizowano wpływ szerokości filtru na wyniki? Ponadto, nie jestem przekonany czy ta dolno-przepustowa filtracja była konieczna. Doktorant argumentuje, że za

jej pomocą chciał pozbyć się szumu (zakłócen) i jako przykład tego szumu wskazuje nisko-amplitudowe wysoko-częstotliwościowe oscylacje wydatku i ciśnienia na Rys. 4.5. Czy aby na pewno źródłem tego szumu jest technika pomiaru o czym jest mowa w pierwszym zdaniu rozdziału 4.4? Może to jest właśnie oznaka tego, że przepływ jest turbulentny, a filtr tę fizyczną cechę przepływu częściowo eliminuje. Turbulentny (niepowtarzalny w sensie chwilowym) charakter przepływu wydaje się potwierdzać analiza parametrów CI i Pi . Na stronie 98, stwierdzono, że „The residual variation tends to be larger than the experiment-to-experiment or cycle-to-cycle variation and suggests that high frequency noise sources are more significant than systematic variations between experiments; however, even the estimated standard deviations corresponding to these noise sources are very low compared to the mean values.” Proszę o komentarz w tej sprawie. Proszę również o jednoznaczną deklarację na temat udziału Doktoranta w przeprowadzonych badaniach eksperymentalnych. Proszę o to mając na uwadze, że w pracy wymieniono inny osoby uczestniczące w badaniach. Nie jest w tym oczywiście nic niewłaściwego, ale chciałbym wiedzieć jaki był wkład Doktoranta w prace eksperymentalne.

Wyniki symulacji FSI mieszczą się w zakresie błędu pomiarowego. Nie dziwi mnie to przy aż tak dużym jego zakresie. Zaskakujące jest to, że wyniki uzyskane za pomocą programu FEBIO z modelem Isotropic Elastic są w zasadzie nieczułe na zmienność ciśnienia (Rys. 4.24). Proszę o próbę wyjaśnienia dlaczego tak jest. Proszę również o informację o zmienności amplitudy odkształcenia wzdłuż ściany. Ciśnienie zmienia się wzdłuż przepływu, więc to powinno mieć wpływ na poziom odkształcenia. Czy badania eksperymentalne i numeryczne pokazują to wyraźnie? Ponadto, proszę o wyjaśnienie, dlaczego na wlocie do obszaru obliczeniowego zakładany był paraboliczny profil prędkości. Przecież to jest profil prędkości dla przepływu laminarnego, a w pracy założono, że przepływ jest turbulentny i modelowany skomplikowanym modelem k-omega SST.

Rozdział 5 dedykowany jest sformułowaniu modelu zastępczego w oparciu o model regresji wykorzystujący proces gusowski (SGPR) oraz model zredukowany (ROM) bazujący na rozkładzie wartości osobliwych. W pierwszej kolejności uwaga poświęcona jest parametryzacji modelu zastępczego i jego walidacji. Przyznam, że nie rozumiem dlaczego wartość zmiennej P_{shift} podana w tabeli 5.1, liczona jako średnia z przebiegu ciśnienia wg Rów. 5.1, jest większa niż maksymalna amplituda ciśnienia $P(t)$. Rysunek 5.1 sugeruje, że P_{shift} nie jest wartością średnią ciśnienia, ale dystansem czasowym pomiędzy punktami przebiegu $P(t)$, w których chwilowa wartość ciśnienia jest równa wartości średniej. Proszę o wyjaśnienie. Proszę również o wyjaśnienie dlaczego jako parametr modelu przyjęto maksymalne odkształcenie występujące w połowie przewodu (str. 121). Czy wartość średnia odkształcenia byłaby złym parametrem? W równaniu 5.8 zmienna U powinna być bez symbolu $\hat{}$.

W efekcie przeprowadzonych porównań stwierdzono, że model SGPR charakteryzuje się znacznie lepszą dokładnością. W kolejnych rozdziałach analizowano jego wrażliwość i określano przedział niedokładności. Szczegółowa weryfikacja modelu wykazała, że uzyskiwane za jego pomocą wyniki pozwalają traktować go jako model zastępczy w odniesieniu do FSI.

Praca jest napisana w sposób jasny i komunikatywny. Rysunki są czytelne i dobrze opisane. Na początku pracy zamieszczono wykaz skrótów. Później jednak, są one w tekście

ponownie definiowane, niekiedy wielokrotnie. To nie przeszkadza w czytaniu pracy, ale wydaje mi się zbędne. Zauważyłem kilka błędów gramatycznych i interpunkcyjnych, które niestety wielu z nas popełnia pisząc po angielsku. **Bez wątpienia przedstawiona praca wystawia pozytywne świadectwo wiedzy i umiejętnościom Doktoranta. Uzyskane przez niego wyniki stanowią wartościowy wkład w rozwój efektywnych narzędzi predykcji skomplikowanych procesów przepływowych i odkształceniowych. Wierzę, że narzędzie opracowane przez Doktoranta będzie w przyszłości rozwijane i pomocne w diagnostyce medycznej.**

3. Konkluzja

Reasumując, przedstawiona do recenzji rozprawa jest w mojej ocenie rozwiązaniem złożonego zadania naukowego. Uzyskane przez Doktoranta wyniki będą z pewnością wykorzystywane w przyszłości i stanowią doskonałą bazę do kontynuowania badań. Pozwala to stwierdzić, że zrealizowane zostały założone cele pracy. Przedstawiona rozprawa doktorska dowodzi wiedzy Doktoranta w zakresie analizy danych eksperymentalnych, statystycznej oceny ich wiarygodności, modelowania numerycznego FSI z wykorzystaniem komercyjnych narzędzi obliczeniowych, formułowania modeli zredukowanych oraz stanowi potwierdzenie umiejętności samodzielnego prowadzenia badań naukowych. **Biorąc powyższe pod uwagę stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr. inż. Aleksandra Sinka spełnia wytyczne określone w Rozporządzeniu Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego i wnioskuje o dopuszczenie jej do publicznej obrony.**

Podpisał Artur Tylińczak