

**AGH**AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA
IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE

Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki

dr hab. inż. Paweł Madejski, prof. AGH

Kraków, 14.02.2025 r.

Akademia Górniczo-Hutnicza

im. Stanisława Staszica w Krakowie

Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki

Katedra Systemów Energetycznych

i Urządzeń Ochrony Środowiska

al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków

e-mail: pawel.madejski@agh.edu.pl

RECENZJA

rozprawy doktorskiej autorstwa mgr inż. Aleksandra Sinek zatytułowanej
***„Integration of Statistical Data Analysis and Surrogate Modeling for
Uncertainty Quantification, Sensitivity Analysis and Inverse Problems
involving Fluid-Structure Interaction models”*** wykonanej pod opieką
prof. dr hab. inż. Wojciecha Adamczyka oraz prof. Leif Rune Hellevik

1. Podstawa opracowania

Recenzja wykonana na zlecenie Przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka Politechniki Śląskiej, Pana prof. dr hab. Krzysztofa Labusa.

2. Zasadność podjęcia tematu

Praca jest poświęcona możliwościom wyznaczania lokalnej sztywności tętniczej z użyciem bezinwazyjnych metod i bazując na wynikach pomiaru przemieszczeń tętniczych. Temat rozprawy koncentruje się na opracowaniu metodologii, która może w niedalekiej przyszłości znaleźć zastosowywanie na poziomie klinicznym. Tematyka rozprawy wymagała od Doktoranta szerokiej wiedzy z zakresu badań eksperymentalnych z wykorzystaniem metod bezinwazyjnych, stosowania analizy statystycznej i matematycznej dla wyników badań pomiarowych jak również metod modelowania komputerowego. W swojej pracy Doktorant wykazuje się umiejętnością zastosowania Komputerowej Mechaniki Płynów (CFD, Computational Fluid Dynamics), w szczególności wykonywania analiz problemów z zakresu

Akademia Górniczo-Hutnicza | Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki
al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków,
tel. +48 12 617 39 59
www.agh.edu.pl
Regon: 000001577 NIP: 6750001923

ciecz-ciało stałe (FSI, Fluid-Solid Interaction). Przedstawione w rozprawie wyniki badań są aplikacyjne, zostały potwierdzone na wykonanym do tego celu stanowisku pomiarowym, z systemem mierzącym odkształcenia fantomów tętniczych wykazując dużą powtarzalność otrzymywanych wyników.

Praca została zrealizowana dzięki wsparciu finansowemu Narodowego Centrum Nauki (Polska) w ramach projektu "ENTHRAL- Non-invasive in-vivo assessment of stiffness of human artery walls" #UMO-2019/34/H/ST8/00624, ufundowanego przez Norweski Mechanizm Finansowy (Norwegian Financial Mechanism 2014-2021).

Temat należy uznać za aktualny, multidyscyplinarny, związany z wypełnieniem luki w dotychczasowych pracach badawczych. Wybór poruszanej w rozprawie problematyki badawczej uznaje za trafny oraz interesujący z naukowego, a przede wszystkim z aplikacyjnego punktu widzenia. Drobne wątpliwości budzi we mnie wybór Dyscypliny, w ramach której Autor zadeklarował swoją pracę doktorską tzn. Dyscyplina Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka. Przedstawione rozwiązanie oraz proponowana metodologia mogą znaleźć zastosowanie w zagadnieniach mechaniki płynów, wymiany ciepła, zagadnień sprzężonych opisujących problemy fizyczne w Dyscyplinie Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka, jednak brak w rozprawie bezpośredniego odniesienia do tematyki tej Dyscypliny.

3. Zakres rozprawy

Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska Pana mgr inż. Aleksandar Sinek jest poświęcona integracji analizy danych statystycznych i modelowania w kontekście interakcji płyn-struktura (Fluid-Solid Interaction, FSI) dla oceny lokalnej sztywności tętnic. Opracowano model zastępczy umożliwiający szybkie szacowanie parametrów tętnic na podstawie danych pomiarowych, co może znaleźć zastosowanie w diagnostyce chorób układu sercowo-naczyniowego. Rozprawa składa się z 6 numerowanych rozdziałów, posiada 171 numerowanych stron, 40 rysunków, 14 tabel. W pracy można znaleźć spis treści, streszczenie w języku polskim i angielskim, spis rysunków, spis tabel, wykaz najważniejszych oznaczeń i symboli oraz bibliografię zawierającą 185 pozycji literaturowych. Rozprawa została napisana w języku angielskim.

Rozdział 1 „Introduction”, zawarty na 18 stronach (1 rysunek), przedstawia tło medyczne dotyczące chorób sercowo-naczyniowych, potrzebę lokalnej oceny sztywności tętnic oraz cele i metodologię pracy, w tym zastosowanie modelowania FSI oraz modelowania zastępczego. Doktorant przeprowadził przegląd literatury na temat

istniejących metod oceny sztywności tętnic oraz wskazał na niedoskonałości obecnych technik. W podsumowaniu rozdziału, jako nadrzędny cel badań, wskazuje **opracowanie efektywnej, lokalnej metody oceny sztywności tętnic za pomocą metod FSI i modelowania zastępczego.**

Teza pracy zakłada, że **zastosowanie modelu zastępczego opartego na regresji procesu Gaussowskiego (Gaussian Process Regression) pozwala na szybkie i dokładne szacowanie parametrów tętnic na podstawie danych pomiarowych.**

W rozdziale 2 zatytułowanym „Mathematical and Statistical Methods” (32 strony, 6 rysunków, 2 tabele), Doktorant przedstawia metody matematyczne i statystyczne wykorzystywane w pracy, w tym przetwarzanie obrazów, modele regresji liniowej mieszanej oraz równania rządzące interakcją płyn-struktura (FSI). Kluczowym efektem jest opracowanie algorytmów przetwarzania obrazu i budowy modeli statystycznych pozwalających na efektywną analizę danych eksperymentalnych.

W rozdziale 3 „Surrogates, UQSA and Bayesian Inference” (30 stron, 7 rysunków) omówiono metody tworzenia modeli zastępczych, analizę niepewności (UQ) i analizę wrażliwości (SA), a także zastosowanie statystyki bayesowskiej w problemach odwrotnych. Najważniejszym osiągnięciem jest opracowanie i walidacja modelu zastępczego opartego na regresji procesu Gaussowskiego), umożliwiającego szybkie prognozowanie przemieszczeń tętnic.

Rozdział 4 „Statistical Analysis and FSI Validation”, zawierający 16 rysunków i 7 tabel, to 34-stronnicowy opis procedury eksperymentalnej, analizy statystycznej danych oraz walidacji modelu FSI na podstawie pomiarów przemieszczeń tętnicznych. Najważniejszym wynikiem jest potwierdzenie wiarygodności pomiarów przemieszczeń za pomocą ultrasonografii oraz walidacja modelu FSI z dokładnością zgodną z założeniami.

W rozdziale 5 „Surrogate Development and Application” (30 stron, 10 rysunków, 4 tabele) Doktorant zaprezentował proces tworzenia modelu zastępczego, jego zastosowanie w analizie wrażliwości oraz szacowanie parametrów sprężystości tętnic przy pomocy metod bayesowskich. Jako najważniejszy efekt można wskazać stworzenie modelu zdolnego do prognozowania przemieszczeń w czasie rzeczywistym oraz identyfikację kluczowych parametrów wpływających na sztywność tętnic.

W rozdziale 6 „Conclusions and Further Research”, która zawiera się na 6 stronach, Doktorant podsumował wyniki badań, omówił zastosowanie proponowanej metodyki oraz zaproponował dalsze kierunki rozwoju badań. Potwierdzenie skuteczności modelu

zastępczego w szacowaniu sztywności tętnic stanowi wg. Doktoranta rekomendacje dotyczące dalszych badań klinicznych.

Przedstawiony podział rozprawy na poszczególne rozdziały w mojej ocenie jest właściwy, cel pracy jest zgodny z tematem rozprawy, a wymieniony zakres wyczerpuje tematykę przedstawioną w tytule rozprawy.

4. Uwagi krytyczne i redakcyjne

Poniżej przedstawiam uwagi dyskusyjne do omawianej rozprawy, które wymagają przedstawienia wyjaśnień przez Doktoranta:

1. W rozdziale 2, Autor omawia w sposób szczegółowy matematyczne i statystyczne metody, m.in. metody wykrywania i usuwania wartości odstających w danych, wykorzystywane w analizie sygnałów i statystyce: filtr Hampela, rozkłady Gaussa i ich własności, wnioskowanie statystyczne w regresji liniowej, rozkłady próbkowania i przedziały ufności, testowanie istotności hipotezy zerowej, wnioskowanie statystyczne dla regresji liniowej, poprawne wnioskowanie w regresji liniowej prostej (SLR), dopasowanie modeli statystycznych, ANOVA w regresji liniowej, F-test, modelowanie liniowe efektów mieszanych. Które z powyższych metod zostały zastosowane w badaniach Doktoranta, oraz z jakim zamiarem?
2. W podrozdziale 4.7 Autor przedstawia ustawienia dla analizowanego problemu w środowisku ANSYS wraz z analizą wrażliwości siatki. Dlaczego Doktorant zdecydował się na podział modelu geometrycznego na cztery części (Rys. 4.22). Czy analizowany problem nie powinien zostać rozwiązany jako pełny model 3D? Jeżeli Doktorant zdecydował się na zastosowanie warunku symetrii, dlaczego nie potraktował problemu jako osiowo-symetryczny?
3. Dlaczego wartość ciśnienia w badaniach jest wyrażana jako wysokość słupa rtęci (mmHg)? Z powodów historycznych, zastosowanie takich jednostek ma uzasadnienie z uwagi na fakt iż rtęć była wykorzystywana jako ciecz manometryczna. Jaki jest powód badań Doktoranta dla stosowania tych jednostek?

Uwagi o charakterze redakcyjnym:

- Niektóre rysunki, mimo iż czytelne, są wykonane niestarannie, jak np. rys. 5.1 na stronie 119: krzywa zielona linia, brak kontaktu strzałek z linią.
- Na stronie 110, Autor podaje wniosek „...the improvement were not very dramatic...”. Co się kryje za stwierdzeniem „dramatic”?

- W pracy można napotkać drobne błędy językowe, jednak ich ilość jest nieznaczna, i nie wpływają na pogorszenie czytelności i zrozumienia tekstu.
- Opisy niektórych rysunków w mojej ocenie mogły być krótsze (np. rys. 5.8), przedstawiając najważniejsze elementy na rysunkach/wykresach, ułatwiając śledzenie postępów prezentowanych w pracy. Dłuższa dyskusja, tego co przedstawiają rysunki, powinna znaleźć się w treści pracy.

Wszystkie wymienione uwagi mają charakter dyskusyjny i nie wpływają pozytywną ocenę przedstawionej rozprawy.

5. Ocena rozprawy i wnioski końcowe

Rozprawa dotyczy tematyki bardzo ważnej i aktualnej dla rozwoju efektywnych bezinwazyjnych metod badań i diagnostyki chorób układu krwionośnego, poprzez opracowanie metodologii wyznaczania lokalnej sztywności tętniczej. Rozprawa ma charakter multidyscyplinarny, poziom językowy oraz redakcyjny rozprawy jest wysoki, a podział pracy i kolejność prezentowanych zagadnień ułatwiają czytanie pracy wraz z interpretacją podejścia naukowego stosowanego przez Doktoranta w trakcie jego badań.

Doktorant jako cel pracy przedstawił **„Opracowanie efektywnej, lokalnej metody oceny sztywności tętnic za pomocą metod FSI i modelowania zastępczego”**.

Cel pracy udało mu się zrealizować w trakcie badań, a poszczególne etapy prac badawczych zostały dobrze udokumentowane i zaprezentowane w rozprawie. Jako najważniejsze osiągnięcia Doktoranta w przedstawionej do recenzji rozprawie należy wskazać przede wszystkim:

1. Opracowanie stanowiska do badań eksperymentalnych, przeprowadzenie badań oraz wyznaczanie przemieszczeń fantomu na podstawie zarejestrowanych obrazów.
2. Opracowanie modelu dla obliczeń numerycznych fantomu, wraz z walidacją uzyskanych wyników.
3. Przetestowanie zaproponowanej metodologii wyznaczania lokalnej sztywności tętniczej w oparciu o mierzone przemieszczenie z wykorzystaniem metod bezinwazyjnych.

W podsumowaniu opinii informuję, że przedstawione uwagi krytyczne nie podważają pozytywnej oceny całej rozprawy, a Doktorant przedstawił oryginalne rozwiązanie problemu naukowego dla założonego celu i cel ten zrealizował. Autor rozprawy mgr inż. Aleksander Sinek wykazał się ogólną wiedzą teoretyczną w zakresie problematyki badań eksperymentalnych i modelowania numerycznego przepływu płynu oraz modelowania

interakcji pomiędzy płynem i ciałem stałym, jak również analizy statystycznej wyników pomiarowych.

Rozprawa doktorska mgr inż. Aleksandra Sinek pt. *„Integration of Statistical Data Analysis and Surrogate Modeling for Uncertainty Quantification, Sensitivity Analysis and Inverse Problems involving Fluid-Structure Interaction models”*, będąca przedmiotem recenzji i oceny, **stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego oraz potwierdza ogólną wiedzę teoretyczną i praktyczną kandydata w Dyscyplinie Naukowej Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka wraz z umiejętnościami samodzielnego prowadzenia pracy naukowej**. Praca spełnia w całości warunki i wymagania stawiane rozprawom doktorskim, określone w art. 187 ust. 1 i 2 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (tj. Dz. U. z 2022 r., poz. 574 z późn. zm.).

W oparciu o powyższe stawiam wniosek do Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka Politechniki Śląskiej o dopuszczenie Doktoranta do kolejnych etapów przewodu doktorskiego.

Podpisał Paweł Madejski