

Gliwice, 25 stycznia 2026 r.

dr hab. inż. Ziemowit Ostrowski, prof. PŚ
Politechnika Śląska
Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki
Katedra Techniki Ciepłej
Pracownia Inżynierii Biomedycznej *biomed^{lab}*
ul. Konarskiego 22, pok. 206,
44-100 Gliwice
tel.: +48 32 237 23 02 / tel. kom. +48 601 99 31 80
e-mail: ziemowit.ostrowski@polsl.pl, zostrowski@gmail.com

Recenzja
rozprawy doktorskiej mgr. Kamila Wołosa
pt. *Application of personalized pulse wave propagation modeling
for estimating selected cardiovascular parameters*
(Zastosowanie spersonalizowanego modelowania propagacji fali pulsu
do szacowania wybranych parametrów układu sercowo-naczyniowego)

Podstawa opracowania

Recenzja została wykonana na podstawie pisma (sygn. SN.431.4.2.2025) Z-cy Dyrektora ds. Nauki Instytutu Biocybernetyki i Inżynierii Biomedycznej im. M. Nałęczka PAN, prof. dr hab. inż. Doroty G. Pijanowskiej z dn. 9 grudnia 2025 r. oraz dołączonej rozprawy doktorskiej mgr. Kamila Wołosa pt. *Application of personalized pulse wave propagation modeling for estimating selected cardiovascular parameters*. Promotorem rozprawy jest dr hab. Jan Poleszczuk, prof. IBIB, a promotorem pomocniczym dr inż. Leszek Pstraś.

Omówienie pracy

Doktorant podjął się aktualnego i istotnego z punktu widzenia potrzeb klinicystów zagadnienia naukowego: zidentyfikowania możliwości użycia i potencjału klinicznego dla modelowania matematycznego propagacji fali pulsu w układzie krwionośnym człowieka. Podejście takie umożliwia szacowanie klinicznie istotnych parametrów funkcjonalnych układu sercowo-naczyniowego pacjenta w oparciu o symulację przepływów krwi i przebiegu fal ciśnienia w układzie tętniczym. W celu spersonalizowania uzyskiwanych wyników Doktorant zaproponował kalibrację opracowanego modelu krążenia za pomocą mierzonych nieinwazyjnie fal pulsu w obwodowym układzie krwionośnym.

Prowadzone przez Doktoranta badania są zbieżne z rosnącą świadomością i przekonaniem środowiska medycznego o konieczności zmiany paradygmatu i przejścia od medycyny reaktywnej do medycyny opartej na przewidywaniu, prewencji i spersonalizowanym podejściu (tzw. 3PM – PPPM: Predictive, Preventive & Personalised Medicine).

Zaproponowany przez Doktoranta temat badań jest bardzo aktualny, naukowo ciekawy i adresuje potrzebę wyposażenia lekarzy w nowe narzędzia diagnostyczne oraz wspierające terapię i jej planowanie. O aktualności pojętego przez Doktoranta problemu świadczą liczne raporty, np. według Światowej Organizacji Zdrowia (WHO) choroby sercowo-naczyniowe pozostają główną (32%) przyczyną zgonów na świecie. W 2022 r. oznaczało to 19,8 mln zgonów, z czego aż 85% było spowodowanych zawałami serca i udarami mózgu. Spośród 18 milionów przedwczesnych zgonów (tj. w wieku poniżej 70 lat) spowodowanych chorobami niezakaźnymi w 2021 r. co najmniej 38% było spowodowanych chorobami sercowo-naczyniowymi¹.

¹ WHO, Fact sheets, Cardiovascular diseases (CVDs), 31 July 2025 ([https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/cardiovascular-diseases-\(cvds\)](https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/cardiovascular-diseases-(cvds))), dostęp 24.01.2026 r.)

Doktorant jasno i precyzyjnie zdefiniował 4 główne tezy pracy (sekcja 1.6.1 str. 20):

- (H1) model propagacji fali pulsu, skalibrowany na podstawie nieinwazyjnego pomiaru indywidualnych fal pulsu w obwodowym układzie krwionośnym, może zostać użyty do oceny pracy serca – objętości wyrzutowej (u pacjentów zdrowych i z przewlekłą chorobą nerek),
- (H2) model propagacji fali pulsu może być używany do aproksymacji pomiarów oscylometrycznych na czterech kończynach,
- (H3) parametry układu sercowo-naczyniowego estymowane za pomocą personalizowanego i skalibrowanego modelu propagacji fali pulsu mogą być używane do modyfikacji dawkowania leków wazopresyjnych (dla utrzymania odpowiedniego ukrwienia tkanek),
- (H4) model propagacji fali pulsu może być używany do szacowania efektów hemodynamicznych jednoczesnego napompowania mankietów oscylometrycznych na kilku kończynach.

Dodatkowo Doktorant sformułował 10 szczegółowych pytań badawczych mających na celu zaadresowanie ww. tez (sekcja 1.6.2, str. 20), na które w toku przeprowadzonych badań odpowiedział i potwierdził poprawność postawionych tez.

Rozprawa wpisuje się w realizację idei badań translacyjnych, ma zatem charakter zarówno teoretyczny: budowa i weryfikacja modeli, jak zawiera elementy doświadczalne: wstępną walidację kliniczną zaproponowanych rozwiązań.

Rozprawa ma formę zbioru 3 publikacji, w każdej z nich w sposób właściwy i odpowiadający standardom publikacji naukowych Doktorant przeprowadził analizę źródeł.

Do zawartych w rozprawie syntetycznych podsumowań (wstępów) poprzedzających załączane w rozprawie publikacje Doktorant opracował rozbudowany (przekrojowy i aktualny) wykaz 151 cytowanych źródeł. Ich dobór oraz kontekst cytowania jest odpowiedni i pozwala stwierdzić, że Doktorant przeprowadził w sposób właściwy analizę literatury światowej, stanu wiedzy i zastosowań klinicznych. Uwagi dotyczące doboru źródeł, przedstawione w sekcji „Uwagi, pytania, (...)” poniżej, mają jedynie charakter dyskusyjny.

Doktorant poprawnie rozwiązał postawione zagadnienia i użył właściwych do osiągnięcia zdefiniowanych celów metod. Przyjęte założenia są poprawne i uzasadnione.

W przedstawionej rozprawie doktorant kolejno i metodycznie zaadresował oryginalne pytania badawcze i tezy. Na oryginalność opisanego rozwiązania składają się w największym stopniu:

- wprowadzenie do jednowymiarowego modelu propagacji fali tętna modelu zmiennej w czasie elastancji lewej komory serca. Model ten (0-1D) wzbogaca dotychczas znane rozwiązania o człon zależny od czasu i lepiej odtwarzający fizjologię skurczu komory serca,
- użycie do kalibracji (spersonalizowania) matematycznego modelu propagacji fali pulsu danych pomiarowych z więcej niż jednej lokalizacji anatomicznej,
- zbadanie *in silico* z wykorzystaniem modelu propagacji fali pulsu ogólnoustrojowych skutków jednoczesnych pomiarów wielomankietowych.

Doktorant wykazał się umiejętnością poprawnego przedstawienia uzyskanych wyników i ich interpretacji. Wyniki prac są przedstawione jasno i zwięźle.

W ocenie recenzenta, zarówno we wstępie jak i syntetycznych opisach poprzedzających składające się na rozprawę publikacje, Doktorant niewystarczająco jasno i dokładnie opisał czym różnią się (poza zastosowaniem) zaproponowane w rozprawie modele propagacji fali pulsu od modeli znanych i opisanych

już w literaturze światowej (w tym od prac promotora). Informacja o wkładzie i istotnych różnicach wprowadzonych przez Doktoranta powinna czytelnie i jednoznacznie odwoływać się do wzorów lub ich członów opisanych w załączonych publikacjach.

Przedstawiona rozprawa rozszerza obszar zastosowań spersonalizowanego modelowania propagacji fali pulsu jako nieinwazyjnego narzędzia do szacowania parametrów hemodynamicznych na nowe możliwe zastosowania kliniczne.

Doktorant zidentyfikował potencjał opisanego modelu do nowego klinicznego zastosowania. Opracował metodologię, programy komputerowe oraz wstępnie zwalidował zaproponowany model w aspekcie diagnostyki pacjentów z przewlekłą chorobą nerek (PChN) oraz w aspekcie wspomagania prowadzenia terapii pacjentów z ciężkim urazowym uszkodzeniem mózgu (ang. severe traumatic brain injury, sTBI).

Wyniki badań wskazują, że zaproponowana metodologia może usprawnić ocenę układu sercowo-naczyniowego u pacjentów z PChN oraz pomóc w doborze dawki leków wazopresyjnych u pacjentów z sTBI.

Warty zaznaczenia jest także fakt, że kody numeryczne oprogramowania implementującego zaproponowane modele oraz zanonimizowane dane pomiarowe zostały przez Doktoranta opublikowane w otwartych repozytoriach (odpowiednio *GitHub* i *Zenodo*). Dzięki temu możliwe jest w pełni odtworzenie przez innych badaczy przeprowadzonych przez Doktoranta obliczeń. Dodatkowo, każdy z artykułów naukowych posiada rozbudowane suplementy, transparentnie pokazujące wyniki w zakresie znacznie szerszym niż to jest możliwe w głównym tekście publikacji. Zwiększa to zaufanie do zaprezentowanych wyników badań i podnosi ich wiarygodność oraz transparentność.

Uwagi, pytania merytoryczne oraz dyskusyjne

W przedstawionej rozprawie i składających się na nią publikacjach brakuje omówienia i odwołania do prac dr. Paolo Salvi, w tym jego książki *Pulse Waves: How Vascular Hemodynamics Affects Blood Pressure*, Springer, 2017. Prace te wydają się być istotne w kontekście propagacji fali ciśnienia jak i pomiarów fali tętna (pulse waves).

Podobna uwaga dotyczy prac Davida Bessemsa (np. *On the propagation of pressure and flow waves through the patient specific arterial system*, Phd Thesis, TU/e, Eindhoven, 2007 – praca ta dostępna jest online). Czy i w jakim zakresie model zaproponowany przez Doktoranta model różni się modelu (także 0-1D) propagacji fali pulsu opisanego przez Bessemsa?

Znany jest fakt, że pomiary fali pulsu wykonywane tonometrem aplanacyjnym (np. SphygmoCor) są wrażliwe na sposób wykonywania pomiaru i wytrenowanie operatora urządzenia. Jak została sprawdzona i utrzymana powtarzalność oraz odtwarzalność przeprowadzonych pomiarów? W artykule [A1] znaczący jest odsetek pomiarów odrzuconych (136/280) na podstawie wskaźników producenta (patrz str. 63, Fig. S3: *SphygmoCor "Operator index" < 80 or PhysioFlow "Signal Quality" < 90*). Czy dla pomiarów pozytywnie zakwalifikowanych do analizy (tj. dla których osiągnięto powyżej określone wskaźniki jakości pomiaru) wrażliwość modelu na błąd pomiarowy mierzonej fali pulsu (w tym jej morfologii) została oszacowana?

Jak dobrano wagi przypisane członom funkcji błędu z artykułu [A2] równ. (1)? Czy zmiana przyjętych wartości wag (inne niż 20 i 40) wpływa na rozwiązanie? Czy normalizacja porównywanych wartości SP, DP i SV nie rozwiązałaby problemu doboru wag (kar)?

Proszę podać uzasadnienie przyjętego skalowania geometrii bazowej drzewa tętniczego (patrz artykuł [A2], suplement S1, Tabela A, przyjęto stały mnożnik $S=H/175$ cm). Czy uzasadnione jest skalowanie zarówno długości jak i średnic tętnic wg takiego samego mnożnika? Średnice tętnic wykazują słabszą korelację ze wzrostem niż ich długości (są za to bardziej skorelowane z np. powierzchnią skóry (BSA)).

Ocena końcowa przedłożonej rozprawy

Rozprawa jest dobrze i starannie napisana, nie znalazłem żadnych istotnych uchybień redakcyjnych. Na podkreślenie zasługuje wysoki poziom opanowania przez Doktoranta języka używanego w komunikacji naukowej, jak i stopień opanowania j. angielskiego, w którym rozprawa została napisana.

Doktorant przedłożył do obrony rozprawę w formie zbioru trzech publikacji, na który składają się oryginalne artykuły naukowe w czasopismach z listy JCR, w tym: 2 artykuły opublikowane w czasopiśmie *PLOS Computational Biology* (odpowiednio IF 3,8 i IF 3,6; wg JCR 2023 i 2024) oraz 1 artykuł opublikowany w czasopiśmie *Frontiers in Physiology* (IF3,2, wg. JCR 2023).

We wszystkich tych publikacjach Doktorant jest pierwszym i korespondencyjnym autorem. Według załączonych do rozprawy oświadczeń współautorów publikacji, Doktorant odgrywał kluczową rolę w zakresie konceptualizacji badań, opracowaniu opisanych modeli i kodów źródłowych, przygotowaniu danych i analizie wyników, w tym walidacji modeli, oraz opracowywaniu i redakcji manuskryptów publikacji. Wiodąca rola i wkład Doktoranta w opracowanie ww. publikacji nie budzi zastrzeżeń.

Przedstawiona rozprawa doktorska jak i składające się na nią publikacje świadczą o szerokiej wiedzy i umiejętnościach Doktoranta w zakresie anatomii, fizjologii jak i solidnym opanowaniu umiejętności budowania modeli matematycznych i prowadzenia symulacji komputerowych. Dokumentuje ona rozwiązanie jasno zdefiniowanego przez Doktoranta problemu naukowego, potwierdzając jego gotowość do samodzielnego prowadzenia badań naukowych.

Podsumowanie, wnioski końcowe i dyskusja zawarta w ostatnim rozdziale rozprawy są rzetelnie opracowane świadczą o dojrzałości naukowej Doktoranta.

Drobne (nieliczne) uchybienia nie mają charakteru krytycznego i nie umniejszają ogólnie wysokiej oceny zarówno samej rozprawy jak i znajomości podjętej przez Doktoranta tematyki badań.

Pracę oceniam jako wybitną, zasługującą na wyróżnienie.

Wniosek końcowy

Stwierdzam, że oceniana rozprawa doktorska mgr. Kamila Wołosa p.t. *Application of personalized pulse wave propagation modeling for estimating selected cardiovascular parameters* spełnia wymagania określone przez Ustawę z dnia 20 lipca 2018 r. – *Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce* dla rozpraw doktorskich. Wnioskuje do Rady Naukowej Instytutu Biocybernetyki i Inżynierii Biomedycznej im. Macieja Nałęczka PAN o dopuszczenie Pana mgr. Kamila Wołosa do dalszych etapów postępowania o nadanie stopnia naukowego doktora w dyscyplinie inżynieria biomedyczna.

Ze względu na wysoką wartość merytoryczną rozprawy oraz duży dorobek naukowy Doktoranta (jak na etap jego kariery naukowej) rekomenduję wyróżnienie ocenianej rozprawy doktorskiej.