

Warszawa, dn. 25.06.2026 r.

Dr hab. inż. Paweł Baranowski, prof. WAT
Instytut Mechaniki i Inżynierii Obliczeniowej
Wydział Inżynierii Mechanicznej
Wojskowa Akademia Techniczna
ul. gen. Sylwestra Kaliskiego 2
00-908 Warszawa
Tel.: +48 261 837 275
E-mail: pawel.baranowski@wat.edu.pl

Recenzja

rozprawy doktorskiej

„A COMPUTATIONAL INTELLIGENCE FRAMEWORK FOR PDE- CONSTRAINED TOPOLOGY OPTIMIZATION”

autorstwa mgr. inż. NIKHILA TATKE

1. Podstawa opracowania

Niniejsza recenzja została sporządzona na podstawie pisma nr RDIMe.512.1.2026 wystosowanego przez Przewodniczącą Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Mechaniczna Politechniki Śląskiej, **DR HAB. INŻ. ALICJĘ PIASECKĄ-BELKHAYAT**, prof. PŚ, wraz z załączoną rozprawą doktorską pt. „*A Computational Intelligence Framework for PDE-Constrained Topology Optimization*” autorstwa **MGR. INŻ. NIKHILA TATKE**. Promotorem rozprawy jest **DR HAB. INŻ. JAROSŁAW KACZMARCZYK, PROF. PŚ**.

2. Ogólna charakterystyka rozprawy i kandydata

Recenzowana rozprawa została przedstawiona w języku angielskim i obejmuje 139 stron maszynopisu formatu A4. Składa się ona z: streszczenia w języku angielskim i polskim, wykazu rysunków, wykazu tabel, wykazu skrótów, wykazu oznaczeń oraz 6 zasadniczych rozdziałów. Na końcu rozprawy zamieszczono cztery załączniki (A–D) oraz bibliografię obejmującą 134 pozycje literaturowe. Praca zawiera następujące główne rozdziały:

- (1) *Introduction*
- (2) *Literature Review*
- (3) *Methodology*
- (4) *Numerical Experiments*
- (5) *Results and Discussion*
- (6) *Conclusion and Future Work*

Rozdział (1) wprowadza tło badawcze, motywację, cele oraz kontekst naukowy rozprawy. Autor omawia wyzwania obliczeniowe związane z optymalizacją topologiczną z ograniczeniami

w postaci równań różniczkowych cząstkowych, w szczególności w przypadku modeli opisanych w przestrzeni trójwymiarowej o wysokiej dokładności z elementy skończonych. W rozdziale tym w sposób jasny sformułowano problem badawczy, zdefiniowano cele i pytania badawcze oraz wskazano główne osiągnięcia naukowe rozprawy. Ponadto jednoznacznie określono zakres pracy i jej ograniczenia, co stanowi przejrzyste ramy dla dalszych rozważań metodologicznych.

Rozdział (2) zawiera przegląd literatury z zakresu optymalizacji topologicznej, strategii wielopoziomowej wierności oraz metod optymalizacyjnych wspomaganych uczeniem maszynowym. Autor omawia również rozwój historyczny metod optymalizacji topologicznej, w tym podejścia oparte m.in. na modelach fazowych oraz metodach ewolucyjnych, ze szczególnym uwzględnieniem metodyki SIMP zastosowanej w rozprawie. Przegląd literatury kończy się identyfikacją istniejących luk badawczych oraz umiejscowieniem proponowanego podejścia na tle aktualnego stanu wiedzy.

Rozdział (3) stanowi zasadniczą część metodyczną rozprawy. Autor przedstawia sformułowanie matematyczne problemu optymalizacji topologicznej minimalizującej podatność przy globalnym ograniczeniu objętości, wraz z dyskretyzacją metodą elementów skończonych oraz schematem interpolacyjnym SIMP. Szczególną uwagę poświęcono zaproponowanemu mechanizmowi Multifidelity Acceptance Safeguard (MFAS), wprowadzającemu weryfikację wykonywaną w trakcie obliczeń zaimplementowaną w pętli optymalizacyjnej opartej na modelach wielopoziomowej wierności (ang. *multifidelity models*). Rozdział ten zawiera również opis integracji architektury sieci neuronowej typu U-Net jako mechanizmu inicjalizacji wstępnej (ang. *warm start*) w proponowanym podejściu optymalizacyjnym.

Rozdział (4) poświęcony jest badaniom numerycznym oraz przyjętej metodyce obliczeniowej. Autor przedstawia problemy testowe rozpatrywane w ujęciu dwu- i trójwymiarowym, wraz z odpowiadającymi im strategiami dyskretyzacji i parametrami numerycznymi. Omówiono także procedury generowania zbiorów danych, eksperymentów (przypadków obliczeniowych), badania ablacyjne oraz zastosowane metryki oceny i procedury raportowania statystycznego.

Rozdział (5) zawiera prezentację oraz dyskusję wyników uzyskanych w testach numerycznych. Autor analizuje zachowanie zbieżności, wartości podatności, jakość rozwiązań, wydajność czasową oraz efekty przyspieszenia uzyskane dla badanych wariantów wykorzystanych metod optymalizacyjnych. Przedstawiono odrębne analizy dla przypadków dwu- i trójwymiarowych, wraz z rozbudowanymi badaniami ablacyjnymi dotyczącymi wpływu częstotliwości weryfikacji oraz tolerancji akceptacji na działanie mechanizmu MFAS.

Rozdział (6) zawiera wnioski końcowe oraz syntetyczne podsumowanie osiągnięć naukowych rozprawy. Autor udziela odpowiedzi na sformułowane pytania badawcze oraz ocenia stopień realizacji celów pracy. W sposób krytyczny omówiono ograniczenia zaproponowanego podejścia oraz wskazano kierunki dalszych badań, obejmujące rozwój algorytmów, strategie skalowania oraz zastosowania metod optymalizacji topologicznej wspomaganych uczeniem maszynowym.

Autor podjął się rozwiązania bardzo złożonego problemu opracowania weryfikowalnego w trakcie obliczeń podejścia do optymalizacji topologicznej minimalizującej podatność przy globalnym ograniczeniu objętości w obszarze analizy liniowej sprężystości. Autor z powodzeniem zintegrował sformułowania analityczne, przypadki obliczeniowe oraz architektury uczenia maszynowego w celu realizacji założeń rozprawy, rozpatrując trzy główne zadania: **(1)** *Uzyskanie zweryfikowanego przyspieszenia obliczeń względem bazowego rozwiązania SIMP o drobnej siatce;* **(2)** *Zapobieganie niejawnej degradacji rozwiązania oraz zapewnienie jego wiarygodności poprzez mechanizm akceptacji/odrzućcia;* **(3)** *Ilościowe określenie korzyści wynikającej z integracji inicjalizacji opartej na uczeniu maszynowym w zweryfikowanej strukturze o wysokiej wierności.*

Szczegółowe zadania badawcze obejmowały:

- Analizę podstaw optymalizacji topologicznej, metod o wielopoziomowej wierności oraz integracji uczenia maszynowego, ze wskazaniem luk badawczych, takich jak brak systematycznych mechanizmów zabezpieczających proces akceptacji lub ograniczona walidacja międzywymiarowa.
- Sformułowanie dyskretyzacji dokładnej i przybliżonej wraz z rygorystycznymi operatorami odwzorowania o współczynniku zagęszczenia $2\times$ (ang. *Restriction and Prolongation*).
- Opracowanie logiki MFAS wykorzystującej współczynnik zaufania w przypadku modeli 2D oraz względną tolerancję akceptacji w modelach 3D, z bezpośrednim uwzględnieniem weryfikacji opartej na residuum PDE w pętli optymalizacyjnej.
- Wytrenowanie i zastosowanie architektury U-Net do predykcji początkowych pól gęstości na podstawie warunków brzegowych i obciążeń, przy jednoczesnym poddaniu wyników tej procedury identycznym kryteriom akceptacji jak w przypadku propozycji opartych wyłącznie na modelu zgrubnym.
- Wykonanie testów numerycznych, w tym szerokich badań ablacyjnych pozwalających ocenić wpływ częstotliwości weryfikacji oraz progów akceptacji.
- Szczegółowa analiza statystyczna przyspieszenia czasów obliczeń numerycznych, zachowania poziomu podatności oraz redukcji udziału stref pośrednich (tzw. *gray fraction*), z wykorzystaniem porównań parami oraz testów Wilcoxona.

MGR INŻ. NIKHIL TATKE jest współautorem 2 publikacji w czasopismach indeksowanych w bazie SCOPUS oraz 2 rozdziałów w monografiach, co zasługuje na szczególne podkreślenie. Ponadto Autor prezentował wyniki swoich badań na 3 konferencjach międzynarodowych. Osiągnięcia te świadczą o wysokiej wartości naukowej opracowanej metodyki i w istotnym stopniu spełniają wymagania stawiane rozprawom doktorskim.

3. Szczegółowa charakterystyka rozprawy

3.1 Ocena układu i struktury rozprawy

Rozprawa została opracowana w sposób logiczny i spójny. Jej struktura odpowiada standardowemu układowi pracy doktorskiej w dziedzinie inżynierii, obejmując tło teoretyczne, rozwój metodyki, badania numeryczne oraz wnioski końcowe. Zdaniem Recenzenta układ pracy właściwie odzwierciedla przyjętą procedurę badawczą i umożliwia czytelnikowi śledzenie kolejnych etapów prowadzonych analiz.

3.2 Ocena przeglądu literatury

Przegląd literatury został opracowany rzetelnie i obejmuje zasadnicze zagadnienia związane z optymalizacją topologiczną, metodami wielopoziomowej wierności oraz projektowaniem wspomaganym uczeniem maszynowym. Autor wykazuje dobrą znajomość podstaw teoretycznych

dziedziny oraz trafnie identyfikuje ograniczenia istniejących podejść, zwłaszcza w kontekście kompromisu między efektywnością obliczeniową a niezawodnością rozwiązań.

Szczególnie wartościowy jest krytyczny charakter przeglądu, gdyż Autor nie ogranicza się do streszczenia dotychczasowych badań, lecz jednoznacznie wskazuje lukę badawczą uzasadniającą opracowanie proponowanej metody.

3.3 Ocena celu pracy i jego realizacji

Główny cel rozprawy został sformułowany jasno i jednoznacznie oraz jest konsekwentnie realizowany w całej pracy. Autor dąży do opracowania struktury obliczeniowej umożliwiającej przyspieszenie optymalizacji topologicznej z ograniczeniami PDE przy jednoczesnym zachowaniu wiarygodności rozwiązań.

W ocenie Recenzenta cel ten został osiągnięty w przyjętym zakresie, a zaproponowane podejście zostało poprawnie zweryfikowane na reprezentatywnych przykładach testowych. Nie stwierdzono znaczących uchybień czy błędów metodycznych.

3.4 Ocena metod badawczych

Autor zastosował właściwy i trafnie dobrany zestaw metod badawczych, obejmujący analizę numeryczną z wykorzystaniem metody elementów skończonych, strategię optymalizacji oraz techniki inicjalizacji wspomagane uczeniem maszynowym. Głównym atutem pracy jest opracowanie **oryginalnej metodyki optymalizacji opartej na weryfikacji, integrującej mechanizmy kontroli akceptacji z zaawansowanymi procedurami optymalizacyjnymi.** Zaproponowana metodyka demonstruje wysoki poziom dojrzałości metodycznej Autora oraz ukazuje silne zrozumienie metod komputerowej mechaniki oraz procedur optymalizacyjnych. Zaproponowane przypadki numeryczne mają szeroki zakres i obejmują zarówno dwuwymiarowe, jak i trójwymiarowe przypadki testowe, badania ablacyjne oraz analizy porównawcze różnych wariantów optymalizacji.

Zastosowane metody badawcze są w pełni zgodne z aktualnymi standardami naukowymi i inżynierskimi w dziedzinie obliczeniowej optymalizacji konstrukcji. Autor wykazuje również wysoki poziom kompetencji w zakresie wdrażania i oceny zaawansowanych procedur obliczeniowych, w tym integracji mechanizmów „ciepłego startu” opartych na sieciach neuronowych w ramach pętli optymalizacyjnej.

3.5 Ocena wyników i ich interpretacji

Uzyskane wyniki zostały przedstawione w sposób czytelny i poparte odpowiednimi ilustracjami, analizami porównawczymi oraz zestawieniami liczbowymi. Autor poprawnie interpretuje uzyskane rezultaty, omawiając zarówno zalety, jak i ograniczenia proponowanego podejścia.

Analizy potwierdzają skuteczność proponowanego modelu wielopoziomowego w zakresie zmniejszania kosztów obliczeniowych przy zachowaniu akceptowalnej jakości rozwiązań. Szczególnie cenne są badania ablacyjne analizujące wpływ parametrów weryfikacyjnych. Z drugiej strony niektóre rysunki i wykresy zawarte w rozprawie charakteryzują się gorszą jakością i stylem niż pozostałe, np. na rysunku 4.2 zastosowano bardzo dużą czcionkę, natomiast charakterystyki przedstawione na rysunkach 5.5 i 5.6 nie są wystarczająco spójne ze stylem pozostałych rysunków i wykresów w rozprawie.

3.6 Ocena praktycznego znaczenia pracy

Rozprawa ma wyraźny charakter aplikacyjny i dotyczy istotnego problemu w obszarze optymalizacji konstrukcji. Proponowane podejście wykazuje potencjał wdrożeniowy, zwłaszcza w zastosowaniach wymagających wydajnej optymalizacji topologii na dużą skalę przy zachowaniu kontrolowanej niezawodności.

Istotną zaletą niniejszej pracy jest połączenie technik przyspieszających z mechanizmami weryfikacji w czasie wykonywania procesu optymalizacji, co zwiększa praktyczną wiarygodność proponowanej metodyki. Omówienie praktyczne można by jednak rozszerzyć poprzez przedstawienie bardziej szczegółowych informacji dotyczące ewentualnych ograniczeń wdrożeniowych oraz możliwych scenariuszy zastosowań przemysłowych.

4. Ocena oryginalnych elementów pracy

Po zapoznaniu się z treścią rozprawy, Recenzent pragnie wskazać następujące elementy pracy, które w sposób jednoznaczny świadczą o jej wartości merytorycznej, poznawczej oraz aplikacyjnej:

1. Szczegółowy przegląd literatury dotyczący optymalizacji topologicznej, strategii wielopoziomowej dokładności oraz najnowocześniejszych implementacji algorytmów uczenia maszynowego. Wprowadzenie to pokazuje, że autor posiada rozległą wiedzę na poruszany temat i trafnie wskazuje kluczową lukę w badanym obszarze naukowym.
2. Rozprawa jest generalnie starannie przygotowana oraz napisana, a jej struktura tworzy sekwencję przyczynowo - skutkową charakteryzującą kolejne etapy proponowanych ram MFAS. Wysoka jakość prezentacji graficznej i stylu, w połączeniu z jasnym i zwięzłym językiem, sprawia, że praca jest bardzo przystępna dla osoby czytającej. Logiczna struktura i profesjonalny układ znacznie ułatwiają śledzenie metodyki oraz interpretację wyników.
3. Jasny i precyzyjny opis celów oraz pytań badawczych w Rozdziale 1. Autor wyraźnie podkreśla konieczność skrócenia czasu obliczeń bez utraty wiarygodności rozwiązań równań różniczkowych cząstkowych (PDE) opartych o modele wysokiej wierności.
4. Wdrożenie wysoce rygorystycznego protokołu oceny obejmującego zarówno testy porównawcze 2D (belka MBB, wspornik końcowy, wspornik środkowy), jak i 3D (wspornik prostopadłościenny, wspornik typu L).
5. Wyraźnie podkreślona decyzja o traktowaniu modelu uczenia maszynowego U-Net wyłącznie jako narzędzia do inicjalizacji (warm-start), a nie jako zamiennika optymalizacji opartej na fizyce. Pozwala to zachować integralność strukturalną ostatecznych topologii i eliminuje ryzyko cichego pogorszenia jakości rozwiązania.
6. Kompleksowe badania ablacyjne sprawdzające granice stosowalności podejścia, zwłaszcza w odniesieniu do parametru częstotliwości weryfikacji i progów akceptacji, które dostarczają solidnych praktycznych wskazówek dotyczących przyszłego wdrożenia.

5. Pytania merytoryczne, kwestie do dyskusji oraz uwagi

Po zapoznaniu się z całością rozprawy Recenzent pragnie sformułować następujące uwagi i pytania:

1. W całej rozprawie Autor stosuje rygorystyczną regułę zmiany poziomu dyskretyzacji siatki o współczynniku $2\times$, co odpowiada redukcji liczby elementów w stosunku 4:1 w
-

przypadku zagadnień dwuwymiarowych oraz 8:1 w przypadku trójwymiarowym. Nasuwa się pytanie, jak wrażliwy jest opracowany mechanizm MFAS na większe dysproporcje skali (np. współczynnik zagęszczenia $3\times$ lub $4\times$) oraz czy zastosowanie takich adaptacyjnych współczynników wymagałoby fundamentalnych modyfikacji przyjętej struktury frameworku o wysokiej wierności (ang. multifidelity framework)?

2. Autor zdecydował się na zastosowanie prostszej funkcji straty MSE dla modelu trójwymiarowego w celu ograniczenia kosztów obliczeniowych, zamiast funkcji SSIM wykorzystanej w analizach 2D. Należy jednak zauważyć, iż funkcja MSE operuje wyłącznie na poziomie pojedynczych pikseli/wokseli, co może prowadzić do utraty ciągłości lub integralności strukturalnej otrzymywanych rozwiązań przestrzennych w porównaniu do przypadków dwuwymiarowych. Zjawisko to jest szczególnie widoczne na Rysunku 5.8 dla metody M1, gdzie obserwuje się wyraźne nieciągłości. W związku z tym zasadne jest pytanie, czy proponowana metodyka wymaga dodatkowego etapu postprocessingu w celu przywrócenia fizycznej spójności rozwiązania, czy też oczekuje się, że dalsza optymalizacja ograniczona równaniami PDE automatycznie eliminuje tego rodzaju nieciągłości topologiczne?
3. W przypadku trójwymiarowego benchmarku typu „L-bracket” zaobserwowano, iż metoda M3 przy domyślnym ustawieniu częstotliwości weryfikacji działa wolniej niż metoda referencyjna M1, co wynika z koncentracji naprężenia w narożnikach modelu. Choć wskazuje się, że redukcja częstotliwości weryfikacji może prowadzić do odzyskania efektu przyspieszenia dla metody M3, pojawia się pytanie, czy możliwe jest opracowanie rozwiązania, w którym algorytm samodzielnie dostosowuje ten parametr w trakcie obliczeń?
4. Powyższa obserwacja, dotycząca gorszej wydajności metody M3 w obecności koncentracji naprężenia w narożniku modelu, wskazuje na ograniczenia podejścia wykorzystującego stałą częstotliwość weryfikacji. Biorąc pod uwagę, że lokalne własności zbieżności w optymalizacji topologicznej są silnie zależne od spadków gradientu zasadne jest rozważenie implementacji bardziej zaawansowanego („inteligentnego”) algorytmu, który automatycznie dostosowuje częstotliwość procedur weryfikacyjnych w zależności od bieżącej złożoności analizowanego problemu.
5. Efektywność podejść wielopoziomowej wierności (ang. multifidelity frameworks) wynika z kompromisu pomiędzy przyspieszeniem uzyskiwanym dzięki siatce zgrubnej a kosztami weryfikacji przy wykorzystaniu modeli o wysokiej dokładności. W tym kontekście istotne jest pytanie o zachowanie obecnie przyjętej logiki akceptacji ($\epsilon_{rel} = 0.01$) w warunkach gęstości siatki charakterystycznych dla przemysłowych analiz metodą elementów skończonych. Czy istnieje ryzyko, że wraz ze wzrostem skali dyskretyzacji znacząco wzrośnie odsetek odrzuceń wyników, co w konsekwencji może prowadzić do utraty korzyści obliczeniowych wynikających z zastosowania mechanizmu MFAS?

6. Mniej istotne pytania, kwestie do dyskusji i uwagi

Poniżej przedstawiono dodatkowe, mniej znaczące uwagi. Recenzent wskazuje na pewne elementy pracy, które można by poprawić, ale mają one niewielki wpływ na jakość naukowa pracy:

- Zbiór danych wygenerowany do szkolenia modelu 3D U-Net jest stosunkowo niewielki i obejmuje 360 próbek wspornikowych oraz 160 próbek wsporników typu L po augmentacji. Krótka dyskusja na temat ryzyka nadmiernego dopasowania podczas przedłużonego szkolenia trwającego 150 epok wzmocniłaby rozdział poświęcony metodologii.
- W omówieniu wyników 2D autor stwierdza, że wartości podatności są deterministyczne dla wszystkich wartości początkowych, a odchylenia standardowe wynoszą dokładnie zero. Chociaż jest to zgodne w przypadku tej konkretnej konfiguracji, testy z wykorzystaniem prawdziwie losowego szumu początkowego mogłyby zapewnić lepszy obraz odporności algorytmu. Szczególnie cenna byłaby ocena wrażliwości zbieżnej topologii na zaburzenia stochastyczne, ponieważ taka odporność jest warunkiem koniecznym do efektywnego wdrożenia w analizach numerycznych stosując metodę elementów skończonych konstrukcji w skali przemysłowej.
- Na rysunkach 5.4, 5.5 i 5.6 krzywe przedstawiające względną podatność i względną frakcję szarości wykorzystują w legendzie inne kolory niż krzywe zawarte na wykresie.

7. Błędy natury edycyjnej, językowej i stylistycznej

Recenzent wykrył jedynie kilka błędów, które jednak nie mają wpływu na bardzo wysoki poziom naukowy i praktyczny przedłożonej do oceny pracy doktorskiej. Oto kilka wybranych uwag:

- Polskie streszczenie zawiera kilka niedociągnięć stylistycznych wynikających z bezpośredniego tłumaczenia z języka angielskiego na polski; w konsekwencji niektóre zdania brzmią nienaturalnie.
- Ogólnie rzecz biorąc, praca doktorska jest napisana wysokiej jakości akademickim językiem angielskim, a zidentyfikowano jedynie kilka drobnych literówek lub zdań niezgodnych z zasadami gramatyki.

8. Ocena końcowa przedłożonej rozprawy

Przedstawiona rozprawa doktorska stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego i potwierdza wysoki poziom wiedzy teoretycznej oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia badań naukowych. Rozprawa spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim przez stosowną ustawę *Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce* z dnia 20.07.2018 r. oraz mieści się w dyscyplinie naukowej Inżynieria Mechaniczna.

W związku z powyższym Recenzent **stawia wniosek o przyjęcie i dopuszczenie do publicznej obrony pracy MGR. INŻ. NIKHILA TATKE.**



PODPIS ZAUFANY

PAWEŁ
BARANOWSKI

25.06.2025 11:05:20 GMT+0200

Dokument podpisany elektronicznie
podpisem zaufanym