

dr hab. inż. Damian Derlukiewicz
Politechnika Wrocławska
Wydział Mechaniczny

RECENZJA

rozprawy doktorskiej
mgra inż. Nikhila Tatke

pt.:

„A Computational Intelligence Framework for PDE-Constrained Topology Optimization”

Recenzję opracowano na podstawie uchwały Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Mechaniczna Politechniki Śląskiej z dnia 22 kwietnia 2026 w sprawie wyznaczenia recenzentów w postępowaniu doktorskim Pana mgra inż. Nikhila Tatke.

Przedmiotem recenzji jest rozprawa doktorska Pana mgra inż. Nikhila Tatke pt. „A Computational Intelligence Framework for PDE-Constrained Topology Optimization”, przygotowana na Politechnice Śląskiej, na Wydziale Mechanicznym, w Katedrze Mechaniki Teoretycznej i Stosowanej.

Promotorem rozprawy jest dr hab. inż. Jarosław Kaczmarczyk, prof. Politechniki Śląskiej. Rozprawa została przygotowana w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych, w dyscyplinie inżynieria mechaniczna. Rozprawa została napisana w języku angielskim.

1. Ogólna charakterystyka problematyki rozprawy

Tematyka rozprawy dotyczy optymalizacji topologicznej konstrukcji, ze szczególnym uwzględnieniem problemu ograniczenia kosztu obliczeniowego tego typu analiz. W metodach opartych na gęstości materiału, takich jak Solid Isotropic Material with Penalization (SIMP), proces optymalizacji wymaga wielokrotnego rozwiązywania zadań metody elementów skończonych w kolejnych iteracjach. Wraz ze wzrostem rozdzielczości

modeli, a szczególnie w przypadku zagadnień trójwymiarowych, prowadzi to do istotnego wzrostu czasu i kosztu obliczeń.

Zagadnienie podjęte przez Autora jest zatem ważne zarówno z punktu widzenia mechaniki obliczeniowej, jak i praktycznego wykorzystania metod optymalizacyjnych w projektowaniu konstrukcji.

Autor proponuje podejście wykorzystujące modele o dwóch poziomach dokładności. Zasadnicza część procesu optymalizacji prowadzona jest na siatce zgrubnej, charakteryzującej się mniejszym kosztem obliczeniowym, natomiast uzyskiwane rozwiązania są okresowo oceniane z wykorzystaniem modelu dokładnego. Głównym elementem opracowanego podejścia jest mechanizm Multifidelity Acceptance Safeguard (MFAS), umożliwiający ocenę rozwiązań generowanych na poziomie niższej wierności oraz ich akceptację lub odrzucenie na podstawie wyników uzyskanych na siatce dokładnej. Rozwiązanie to ma na celu ograniczenie wpływu błędów wynikających z uproszczenia modelu i zachowanie kontroli nad jakością rozwiązania końcowego.

Uzupełnieniem proponowanej metody jest zastosowanie sieci neuronowej typu U-Net jako opcjonalnego mechanizmu inicjalizacji procesu optymalizacji. Wartościowym elementem przyjętego podejścia jest to, że rozwiązanie uzyskane z wykorzystaniem uczenia maszynowego nie zastępuje obliczeń opartych na modelu fizycznym, lecz stanowi punkt początkowy, który podlega dalszej ocenie w ramach procedury MFAS.

Uważam, że podjęta tematyka jest aktualna i dobrze uzasadniona. Współczesne metody obliczeniowe coraz częściej wykorzystują zarówno modele o różnym poziomie dokładności, jak i narzędzia uczenia maszynowego w celu skrócenia czasu analiz. Istotne jest jednak zachowanie odpowiedniej kontroli nad jakością uzyskiwanych rozwiązań. Recenzowana rozprawa wpisuje się w ten kierunek badań, łącząc problem efektywności obliczeniowej z mechanizmem bieżącej weryfikacji rezultatów. W mojej ocenie stanowi to wartościowy i interesujący kierunek rozwoju metod optymalizacji topologicznej.

2. Charakterystyka rozprawy i omówienie treści

Rozprawa liczy 156 stron, została napisana w języku angielskim i obejmuje 6 rozdziałów o charakterze merytorycznym (strony od 1 do 105), bibliografię zawierającą 134 pozycje (strony od 106 do 118), streszczenia w języku angielskim i polskim, wykazy rysunków, tabel, skrótów i oznaczeń oraz załączniki A–D, w których zamieszczono fragmenty implementacji oraz uzupełniające wyniki badań. Układ pracy jest przejrzysty i logiczny, a kolejność rozdziałów odpowiada tokowi postępowania badawczego – od sformułowania problemu, poprzez analizę literatury i opracowanie metody, do przeprowadzenia eksperymentów numerycznych, analizy wyników i sformułowania wniosków.

W rozdziale pierwszym Autor przedstawia problematykę rozprawy, motywację podjęcia badań, problem naukowy, cele pracy, pytania badawcze, deklarowany wkład naukowy oraz przyjęty zakres badań. Sformułowano cztery cele badawcze, dotyczące uzyskania przyspieszenia obliczeń przy zachowaniu kontroli jakości rozwiązania, oceny skuteczności mechanizmu akceptacji i odrzucania rozwiązań, sprawdzenia odporności proponowanej metody na różne przypadki obliczeniowe oraz oceny wpływu inicjalizacji wykorzystującej uczenie maszynowe. W rozdziale tym Autor nie wyodrębnia osobnego punktu zawierającego formalnie sformułowaną tezę badawczą. Jej treść wynika jednak jednoznacznie z konstrukcji pracy, postawionych celów i pytań badawczych. Istotą tezy jest założenie, że *przyspieszenie optymalizacji topologicznej może pozostać wiarygodne, jeżeli jest powiązane z bieżącą weryfikacją rozwiązań z wykorzystaniem modelu o wyższej dokładności w pętli obliczeniowej*.

Rozdział drugi zawiera przegląd literatury związanej z optymalizacją topologiczną konstrukcji. Autor przedstawia podstawy metody SIMP, zagadnienia filtracji i regularyzacji, metody wykorzystujące modele o różnym poziomie dokładności, podejścia typu trust-region oraz zastosowanie metod uczenia maszynowego w optymalizacji topologicznej. Istotnym elementem rozdziału jest podrozdział 2.5, w którym Autor identyfikuje trzy zasadnicze luki badawcze uzasadniające opracowanie proponowanej metody tj: brak systematycznych mechanizmów akceptacji w podejściach multifidelity, brak bieżącej weryfikacji wyników w przypadku integracji metod uczenia maszynowego oraz ograniczoną walidację obejmującą jednocześnie problemy 2D i 3D. Rozdział ten właściwie uzasadnia podjętą problematykę badawczą i wskazuje przesłanki oryginalności proponowanego podejścia.

Rozdział trzeci stanowi zasadniczą część metodyczną pracy. Autor formułuje rozpatrywane zadanie optymalizacyjne, przedstawia model obliczeniowy MES, metodę SIMP, sposób filtracji oraz procedurę aktualizacji zmiennych projektowych. Następnie wprowadza opracowany mechanizm Multifidelity Acceptance Safeguard (MFAS), wykorzystujący modele o dwóch poziomach dokładności oraz okresową ocenę rozwiązań uzyskiwanych na siatce zgrubnej. W rozdziale przedstawiono również sposób wykorzystania sieci U-Net oraz zdefiniowano cztery warianty obliczeniowe: M1 jako wariant referencyjny wykorzystujący siatkę dokładną, M2 jako wariant wykorzystujący model zgrubny, M3 jako właściwy mechanizm MFAS oraz M4 jako MFAS wspomagany inicjalizacją z wykorzystaniem sieci U-Net.

Rozdział czwarty zawiera opis programu badań numerycznych. Autor wykorzystuje trzy problemy wzorcowe dwuwymiarowe oraz dwa trójwymiarowe, dla których porównuje działanie czterech zdefiniowanych wcześniej wariantów metody. Przedstawia parametry modeli, sposób przygotowania danych wykorzystywanych przez sieć U-Net, zasady prowadzenia eksperymentów oraz przyjęte kryteria oceny wyników. Program badań obejmuje szeroki zakres eksperymentów głównych oraz badań ablacyjnych, przeprowadzonych dla różnych wariantów metody i konfiguracji obliczeniowych (łącznie ponad 140 przebiegów obliczeniowych). Zakres przeprowadzonych analiz umożliwia zarówno porównanie poszczególnych wariantów, jak i ocenę wpływu podstawowych parametrów proponowanego rozwiązania.

Rozdział piąty przedstawia wyniki badań wraz z ich analizą. Dla przypadków dwuwymiarowych warianty M3 i M4 pozwalają uzyskać istotne skrócenie czasu obliczeń przy zachowaniu jakości rozwiązania zbliżonej do wariantu referencyjnego M1. Wariant M2, oparty przede wszystkim na obliczeniach na siatce zgrubnej, pozwala uzyskać większe przyspieszenie, jednak odbywa się to kosztem wyraźnego pogorszenia wartości podatności. Porównanie to dobrze pokazuje znaczenie wprowadzonego przez Autora mechanizmu bieżącej kontroli jakości rozwiązania. W przypadku analiz trójwymiarowych wyniki są bardziej zróżnicowane i zależą od rozpatrywanej geometrii. Dla jednego z badanych przypadków proponowana metoda prowadzi do skrócenia czasu obliczeń przy zachowaniu jakości zbliżonej do rozwiązania referencyjnego, natomiast w przypadku wspornika typu L wariant M3 przy ustawieniach bazowych okazuje się wolniejszy od M1. Autor przedstawia

również te mniej korzystne wyniki i uwzględnia je w późniejszej dyskusji ograniczeń metody. Takie podejście należy ocenić pozytywnie, ponieważ pozwala bardziej obiektywnie określić zakres skuteczności proponowanego rozwiązania.

Rozdział szósty zawiera podsumowanie przeprowadzonych badań oraz uzyskanych wyników. Autor odnosi się do sformułowanych wcześniej czterech pytań badawczych, przedstawia najważniejsze wnioski, wskazuje ograniczenia proponowanej metody oraz kierunki dalszych prac. Wnioski zostały sformułowane z uwzględnieniem zakresu przeprowadzonych badań i odnoszą się zarówno do zalet, jak i ograniczeń opracowanego rozwiązania. Autor wskazuje również możliwości dalszego rozwoju metody, w szczególności w zakresie rozszerzenia badań trójwymiarowych, doboru parametrów weryfikacji oraz dalszego wykorzystania metod uczenia maszynowego.

Bibliografia obejmuje 134 pozycje i jest związana z tematyką rozprawy.

Załączniki A-D stanowią wartościowe uzupełnienie pracy, ponieważ zawierają fragmenty implementacji oraz dodatkowe wyniki obliczeń, umożliwiając lepsze prześledzenie sposobu realizacji badań.

3. Oryginalność rozprawy

Rozprawa zawiera wyraźny i wartościowy oryginalny wkład naukowy. Oryginalność pracy nie wynika z samego zastosowania metody SIMP, metody elementów skończonych, modeli o różnej rozdzielczości czy sieci U-Net, lecz ze sposobu ich połączenia w spójną procedurę obliczeniową ukierunkowaną na ograniczenie kosztu obliczeń przy jednoczesnym zachowaniu kontroli nad jakością rozwiązania.

Za podstawowy element oryginalny należy uznać opracowanie i zastosowanie mechanizmu Multifidelity Acceptance Safeguard (MFAS). Jego istotą jest okresowa ocena rozwiązań uzyskiwanych na siatce zgrubnej z wykorzystaniem modelu dokładnego oraz możliwość ich akceptacji lub odrzucenia. Dzięki temu przyspieszenie obliczeń nie wynika wyłącznie z zastosowania modelu o niższej wierności, lecz jest powiązane z bieżącą kontrolą jakości uzyskiwanego rozwiązania.

Wartościowym elementem rozprawy jest również sposób wykorzystania metod uczenia maszynowego. Sieć U-Net pełni funkcję wspomagającą, służąc do inicjalizacji procesu optymalizacji, natomiast uzyskane z jej wykorzystaniem rozwiązanie podlega dalszej weryfikacji w ramach procedury MFAS. Takie podejście pozwala wykorzystać możliwości uczenia maszynowego bez rezygnacji z kontroli opartej na modelu fizycznym.

Oryginalność i wartość poznawczą pracy wzmacnia również szeroki program badań porównawczych obejmujący wariant referencyjny, wariant wykorzystujący model zgrubny, właściwy mechanizm MFAS oraz MFAS wspomagany siecią U-Net. Badania przeprowadzono dla problemów dwu- i trójwymiarowych, a eksperymenty główne uzupełniono analizami ablacyjnymi, co pozwoliło ocenić zarówno wpływ proponowanego mechanizmu kontroli, jak i podstawowych parametrów metody.

Rozprawa nie ogranicza się do prezentacji pojedynczego przykładu, lecz wskazuje, kiedy proponowana metoda działa korzystnie, kiedy jej przewaga jest ograniczona oraz jakie czynniki decydują o bilansie czasu obliczeń i jakości.

Przedstawione rozwiązanie stanowi oryginalne podejście do problemu przyspieszania obliczeń w optymalizacji topologicznej i wnosi wartościowy wkład w rozwój metod wykorzystujących modele o różnym poziomie dokładności oraz uczenie maszynowe w zagadnieniach inżynierskich.

4. Ocena rozprawy

Pod względem merytorycznym i metodycznym rozprawę oceniam wysoko. Autor podjął aktualny i istotny problem badawczy z zakresu optymalizacji topologicznej, łącząc zagadnienia mechaniki obliczeniowej, metod numerycznych oraz uczenia maszynowego. Praca pokazuje umiejętność przejścia od sformułowania problemu naukowego, poprzez opracowanie własnej procedury obliczeniowej i zaplanowanie badań, do analizy i krytycznej oceny uzyskanych wyników.

Postawione przez Autora cele rozprawy zostały w istotnym zakresie osiągnięte, a uzyskane wyniki potwierdzają zasadność przyjętej koncepcji badawczej. Szczególnie wartościowe są wyniki dla problemów dwuwymiarowych, w których zastosowanie mechanizmu MFAS pozwala ograniczyć koszt obliczeń przy zachowaniu jakości rozwiązania zbliżonej do wariantu referencyjnego. Jednocześnie porównanie z wariantem

wykorzystującym wyłącznie model zgrubny pokazuje znaczenie wprowadzonego mechanizmu kontroli jakości. Wyniki dla problemów trójwymiarowych wskazują natomiast, że efektywność czasowa proponowanej metody zależy od geometrii oraz przyjętych parametrów weryfikacji, co Autor uwzględnia w dyskusji i ograniczeniach pracy.

Na szczególne podkreślenie zasługują następujące osiągnięcia rozprawy:

1. opracowanie mechanizmu Multifidelity Acceptance Safeguard (MFAS), łączącego obliczenia na modelu zgrubnym z okresową oceną rozwiązań na modelu o wyższej dokładności oraz mechanizmem ich akceptacji lub odrzucania;
2. wyraźne rozdzielenie wariantu referencyjnego, wariantu wykorzystującego model zgrubny oraz wariantów objętych mechanizmem weryfikacji, co umożliwia ocenę wpływu poszczególnych elementów proponowanej metody;
3. włączenie sieci U-Net jako elementu wspomagającego inicjalizację procesu optymalizacji, przy jednoczesnym zachowaniu dalszej kontroli rozwiązania z wykorzystaniem modelu fizycznego;
4. przeprowadzenie szerokiego programu badań porównawczych obejmującego problemy dwu- i trójwymiarowe oraz uzupełnienie badań głównych analizami ablacyjnymi;
5. wykazanie możliwości uzyskania istotnego przyspieszenia obliczeń dla badanych problemów 2D przy zachowaniu jakości rozwiązania zbliżonej do metody referencyjnej;
6. krytyczne przedstawienie uzyskanych wyników i ograniczeń proponowanego rozwiązania, w szczególności w odniesieniu do przypadków trójwymiarowych oraz zastosowania komponentu uczenia maszynowego.

Za mocną stroną rozprawy należy uznać również sposób interpretacji wyników. Autor nie przedstawia proponowanej metody ani wykorzystania uczenia maszynowego jako rozwiązania uniwersalnego, lecz wskazuje zarówno uzyskane korzyści, jak i przypadki, w których efektywność metody jest mniejsza. Takie podejście zwiększa wiarygodność przeprowadzonych badań i świadczy o właściwej krytycznej ocenie uzyskanych rezultatów.

Zakres wykonanych prac, oryginalność koncepcji MFAS, sposób zaplanowania i przeprowadzenia badań oraz ich udokumentowanie pozwalają uznać rozprawę za

wartościową pracę doktorską o istotnym wkładzie naukowym. Autor wykazał się umiejętnością samodzielnego rozwiązania postawionego problemu badawczego, a przedstawione wyniki stanowią podstawę do dalszego rozwoju proponowanej metody i jej zastosowania w bardziej złożonych zagadnieniach optymalizacji konstrukcji.

5. Uwagi krytyczne merytoryczne

Poniższe uwagi mają charakter dyskusyjny i doprecyzowujący oraz nie wpływają na ogólną, wysoką ocenę rozprawy. Dotyczą przede wszystkim zakresu przeprowadzonych badań, sposobu interpretacji uzyskanych wyników oraz możliwości dalszego rozwoju proponowanej metody.

1. Zakres badań został ograniczony do zagadnienia minimalizacji podatności w warunkach liniowej sprężystości i przy globalnym ograniczeniu objętości. Takie założenie jest uzasadnione z punktu widzenia przyjętego celu pracy, jednak powoduje, że sformułowane wnioski odnoszą się przede wszystkim do analizowanej klasy problemów. Interesującym kierunkiem dalszych badań byłoby rozszerzenie metody na zadania uwzględniające inne kryteria projektowe, wiele przypadków obciążenia lub ograniczenia technologiczne.
2. Wyniki uzyskane dla problemów trójwymiarowych są bardziej zróżnicowane niż dla przypadków 2D. W szczególności efektywność czasowa wariantu M3 zależy od analizowanej geometrii i przyjętych parametrów weryfikacji. Dla problemu L-bracket przy ustawieniach bazowych wariant M3 okazał się wolniejszy od rozwiązania referencyjnego, podczas gdy dla drugiego analizowanego przypadku 3D uzyskano przyspieszenie. Wskazuje to, że efektywność obliczeniowa proponowanej metody w zadaniach trójwymiarowych zależy od charakteru rozpatrywanego problemu. Zagadnieniem wymagającym dyskusji jest określenie czynników mających największy wpływ na efektywność czasową MFAS w problemach trójwymiarowych oraz możliwości ograniczenia zależności tej efektywności od geometrii.
3. Kryterium akceptacji w metodzie MFAS opiera się na wartości podatności ocenianej na siatce dokładnej. Jest to rozwiązanie właściwe dla przyjętego w rozprawie sformułowania problemu. W przypadku rozszerzenia metody na inne klasy zadań

należałoby jednak rozważyć uzupełnienie kryterium akceptacji o dodatkowe wielkości, np. naprężenia lub ograniczenia technologiczne.

4. W odpowiedzi na pytanie badawcze RQ3 Autor wskazuje na spójne przyspieszenie dla wszystkich analizowanych problemów. Stwierdzenie to nie jest jednak w pełni zgodne z przedstawionymi wynikami, ponieważ dla problemu L-bracket wariant M3 uzyskał wartość przyspieszenia mniejszą od 1, a więc był wolniejszy od metody referencyjnej. Autor sam wskazuje tę zależność w dalszej części pracy. Odpowiedź na RQ3 powinna więc zostać odpowiednio doprecyzowana. Przedstawione wyniki wskazują raczej na zachowanie kontroli jakości rozwiązania przy efektywności czasowej zależnej od geometrii i parametrów metody, szczególnie w przypadku problemów 3D.
5. Badania trójwymiarowe przeprowadzono dla ograniczonej liczby powtórzeń. Autor dostrzega to ograniczenie, jednak liczebność próby $n=3$ nie pozwala na formułowanie szerokich wniosków statystycznych. Uzyskane rezultaty należy zatem traktować przede wszystkim jako wartościowe wyniki porównawcze, wskazujące tendencje działania proponowanej metody i uzasadniające kontynuację badań w szerszym zakresie.
6. Warianty M3 i M4 obejmują końcowy etap obliczeń prowadzonych na siatce dokładnej. Etap ten wpływa na ostateczną jakość rozwiązania, dlatego uzyskane wyniki należy interpretować jako efekt działania całej zaproponowanej procedury, a nie wyłącznie samego mechanizmu akceptacji MFAS. Z punktu widzenia dalszej oceny metody interesujące byłoby bardziej szczegółowe rozdzielenie wpływu poszczególnych jej etapów.
7. W przeprowadzonych badaniach przyjęto stałą zasadę dwukrotnej zmiany rozdzielczości siatki w każdym kierunku pomiędzy modelem zgrubnym i dokładnym. Uzyskane wartości przyspieszenia, poziom akceptacji rozwiązań oraz różnice w wartości podatności są zatem związane z przyjętą hierarchią modeli. Interesującym kierunkiem dalszych badań byłoby rozważenie adaptacyjnego doboru poziomu rozdzielczości siatki w zależności od etapu procesu optymalizacji oraz ocena, czy takie podejście mogłoby dodatkowo zwiększyć efektywność metody MFAS.
8. Zastosowanie sieci U-Net w wariacie M4 zostało potraktowane właściwie jako element opcjonalny i podlegający kontroli w ramach procedury MFAS. Zakres

przeprowadzonych badań nie pozwala jednak na szeroką ocenę zdolności generalizacji modelu, ponieważ sieć była uczona dla określonych rodzin przypadków. W dalszych pracach zasadne byłoby sprawdzenie jej działania dla danych spoza zakresu treningowego, innych geometrii i sposobów obciążenia oraz przy większej liczbie próbek. Zasadne byłoby zatem rozszerzenie badań o analizę działania modelu dla danych spoza zakresu treningowego, innych geometrii i sposobów obciążenia oraz większej liczby próbek, co pozwoliłoby pełniej ocenić rzeczywistą przydatność komponentu U-Net.

6. Uwagi szczegółowe redakcyjne

Rozprawa została napisana w języku angielskim w sposób zasadniczo zrozumiały i uporządkowany. W tekście występują jednak pojedyncze błędy językowe i gramatyczne oraz niespójności dotyczące opisu przyjętych parametrów i sposobu prezentacji wyników, które wymagają korekty lub doprecyzowania. Poniżej przedstawiono najważniejsze z nich:

1. W całej rozprawie brak ujednolicenia sposobu zapisu złożzeń takich jak „fine-mesh/fine mesh” oraz „coarse-mesh/coarse mesh”. W pracy stosowane są obie formy, np. „fine-mesh” i „fine mesh”, podobnie w przypadku „coarse-mesh” i „coarse mesh”.
2. Termin „computational intelligence”, wykorzystany w tytule rozprawy, nie został jednoznacznie zdefiniowany w tekście głównym. Autor powinien zdefiniować to pojęcie we wprowadzeniu oraz wskazać jego związek z zastosowanymi w pracy metodami MFAS i U-Net.
3. W pracy stosowane są różne określenia związane z mechanizmem kontroli i akceptacji rozwiązania, m.in. „*acceptance safeguard*”, „*acceptance criterion*”, „*validation gate*” oraz „*quality gate*”. Nie stanowi to istotnego problemu, jednak warto rozważyć ujednolicenie terminologii lub wyjaśnienie relacji między poszczególnymi określeniami, co poprawiłoby jednoznaczność opisu metody.
4. W przypadku informacji o publikacji [17] N. Tatke and J. Kaczmarczyk, “Multifidelity topology optimization with runtime verification and acceptance control: Benchmark study in 2d and 3d,” bezpośrednio związanej z wynikami rozprawy Autor powinien

jednoznacznie wskazać zakres swojego wkładu w publikację współautorską. Autor jedynie informuje, że część badań benchmarkowych została wcześniej opublikowana wspólnie z promotorem.

5. **Str. 6** – sformułowanie „through multifidelity based approach and ML as initializer” wymaga korekty gramatycznej. Właściwszy byłby zapis: „through a multifidelity-based approach with ML used as an initializer”.
6. **Str. 7** – sformułowanie „the implementation plan that include definition of benchmark...” wymaga korekty gramatycznej. Poprawną formą powinno być: „the implementation plan that includes the definition of the benchmark...”.
7. **Str. 7** – w zdaniu „Chapter 5 reports and analyzes the results, which includes...” występuje błąd zgodności gramatycznej. Poprawny zapis to „results, which include...”.
8. **Str. 17** – w opisie luki badawczej wskazano, że proponowane podejście umożliwia prowadzenie kontroli „without requiring additional fine-mesh solves”. Sformułowanie to nie jest spójne z przedstawioną dalej koncepcją MFAS, której istotnym elementem są okresowe obliczenia i weryfikacja rozwiązania na siatce dokładnej. Zapis ten powinien zostać doprecyzowany.
9. **Str. 59, 64 i 69** – liczba iteracji końcowego etapu cleanup została podana niespójnie. W części pracy wskazano 15 iteracji, natomiast na stronie 69 w opisie metryk podano 10 iteracji „consists of ten fine-mesh OC iterations executed”. Zapis powinien zostać ujednolicony zgodnie z rzeczywiście przyjętą procedurą obliczeniową.
10. **Str. 67** – w opisie bazowej tolerancji 3D występują wartości $\epsilon_{rel} = 0.01$ oraz $\epsilon_{rel} = 0.10$. Z tabel i dalszej części pracy wynika, że ustawieniem bazowym jest 0.01. Zapis należy ujednolicić.
11. **Str. 84 i 90** – dla wariantu M3 w przypadku *3D cantilever* podawane są różne wartości przyspieszenia: 1,64 w tabeli 5.2 oraz 1,48 w tabeli 5.5 dla tego samego ustawienia $f_{verify} = 5$. Różnica ta wymaga wyjaśnienia oraz ujednolicenia sposobu obliczania i raportowania wartości przyspieszenia w całej pracy.
12. **Str. 94, 101 i 103** – w części dotyczącej ograniczeń i dalszych prac Autor wskazuje, że w analizach stosowano stały stosunek liczby elementów siatki dokładnej do zgrubnej równy 4:1 dla wszystkich rozpatrywanych problemów. Na str. 94 zapisano: „fixed 4:1 element-count coarse-to-fine reduction ratio for all experiments”,

na str. 101 ponownie wskazano „a 4:1 element-count coarse-to-fine reduction ratio”, natomiast na str. 103 stwierdzono „The 4:1 ratio used throughout this work”. Sformułowania te nie są spójne z wcześniejszym opisem dyskretyzacji. W podrozdziale 3.6.2 Autor prawidłowo wskazuje na czterokrotną redukcję dla problemów 2D oraz ośmiokrotną dla problemów 3D. Przy dwukrotnej zmianie rozdzielczości w każdym kierunku stosunek liczby elementów wynosi odpowiednio 4:1 dla problemów 2D oraz 8:1 dla problemów 3D. Późniejsze sformułowania dotyczące stałego stosunku 4:1 dla wszystkich analiz wymagają zatem korekty.

7. Konkluzja i wniosek końcowy

Zawarte w recenzji uwagi krytyczne i redakcyjne nie wpływają na ogólną pozytywną ocenę rozprawy. Dotyczą one przede wszystkim potrzeby doprecyzowania niektórych sformułowań, ujednolicenia sposobu prezentacji wybranych parametrów i wyników oraz bardziej precyzyjnego określenia zakresu wniosków wynikających z przeprowadzonych badań. Uwagi te nie podważają zasadniczej koncepcji pracy, oryginalności zaproponowanego rozwiązania ani wartości przeprowadzonego programu badawczego.

Rozprawa doktorska Pana mgra inż. Nikhila Tatke pt. „A Computational Intelligence Framework for PDE-Constrained Topology Optimization” prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną Kandydata w dyscyplinie inżynieria mechaniczna oraz potwierdza jego umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Przedmiot rozprawy stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, polegające na opracowaniu i ocenie wielopoziomowego podejścia do optymalizacji topologicznej z mechanizmem bieżącej weryfikacji oraz akceptacji rozwiązań w trakcie procesu obliczeniowego. Na szczególne podkreślenie zasługuje opracowanie mechanizmu Multifidelity Acceptance Safeguard (MFAS), jego weryfikacja w problemach dwu- i trójwymiarowych oraz uzupełnienie proponowanego podejścia o możliwość wykorzystania sieci U-Net jako mechanizmu inicjalizacji, przy zachowaniu kontroli jakości rozwiązania z wykorzystaniem modelu o wyższej dokładności.

Biorąc pod uwagę osiągnięte cele badawcze, oryginalność zaproponowanego rozwiązania, zakres przeprowadzonych badań oraz sposób analizy i prezentacji uzyskanych wyników, **oceniam rozprawę wysoko i stwierdzam**, że rozprawa doktorska Pana mgra inż. Nikhila Tatke pt. „A Computational Intelligence Framework for PDE-Constrained Topology Optimization” spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim określone w art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (t.j. Dz.U. z 2024 r. poz. 1571, z późn. zm.).

W związku z powyższym wnioskuję o przyjęcie rozprawy doktorskiej Pana mgra inż. Nikhila Tatke i dopuszczenie jej do publicznej obrony.

Jednocześnie, biorąc pod uwagę wysoką ocenę rozprawy, oryginalność opracowanego mechanizmu MFAS, szeroki zakres przeprowadzonych badań numerycznych oraz fakt opublikowania części wyników rozprawy w recenzowanym czasopiśmie „Materials” o Impact Factor 3,7, **wnioskuję o wyróżnienie** rozprawy doktorskiej Pana mgra inż. Nikhila Tatke.

Dr hab. inż. Damian Derlukiewicz, prof. PWr