

Krzysztof Gromysz,
prof. dr hab. inż.
Wydział Budownictwa,
Politechnika Śląska
Ul. Akademicka 5,
44-100 Gliwice

Gliwice, 10 września 2026 r.

Wpłynęło
do Kancelarii WILiŚ
dnia 15.09.2026
L.dz. 442
podpis: Gromysz

Recenzja

rozprawy doktorskiej mgr inż. Ahmeda Manguri pt. „Shape optimization, stress control, and effective design of flexible structures”.

1 Podstawa wykonania recenzji

Podstawę wykonania recenzji stanowi Pismo Dziekan Wydziału Inżynierii Lądowej i Środowiska Politechniki Gdańskiej z dnia 17.06.2026 r. (l.dz.569/WILiŚ/2026), w którym Pani prof. dr hab. inż. Ewa Wojciechowska zwraca się z prośbą o opracowanie recenzji rozprawy doktorskiej Pana mgr inż. Ahmeda Manguri pt. „Shape optimization, stress control, and effective design of flexible structures”, której promotorem jest prof. dr hab. inż. Robert Jankowski, a promotorem pomocniczym dr inż. Marcin Szczepański.

W piśmie l.dz.569/WILiŚ/2026 znajduje się informacja, że Rada Dyscypliny Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport Uchwałą nr 41/2026 z dnia 17.06.2026 r. wyznaczyła mnie na recenzenta w postępowaniu w sprawie nadania stopnia doktora w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych, w dyscyplinie Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport wszczętym na wniosek mgr inż. Ahmeda Manguri ze Szkoły Doktorskiej na Politechnice Gdańskiej.

2 Krótka charakterystyka rozprawy

Rozprawa dotyczy dwóch zagadnień. Pierwszym jest redukcja przemieszczeń węzłów i sił wewnętrznych w konstrukcjach prętowych. Redukcja ta osiągana jest przez wymuszanie zmian długości elementów tych konstrukcji za pomocą siłowników oraz przez wprowadzenie dodatkowych elementów do tych konstrukcji. Wprowadzanymi elementami są pręty albo cięgna. Drugim zagadnieniem podjętym w rozprawie jest minimalizacja ciężaru konstrukcji przy uwzględnieniu kształtu, naprężeń i stateczności modeli konstrukcji. W rozprawie przedstawiono obszerne wyniki badań teoretycznych modeli konstrukcji. Modele konstrukcji stanowiły równania macierzowe oraz w mniejszym zakresie modele opracowane w programach MES. Obiektem badań przedstawionych w rozprawie są modele matematyczne konstrukcji, mimo włączenia do rozprawy badań modeli laboratoryjnych. Poza badaniami modeli istotną część rozprawy stanowi przegląd literatury dotyczący redukcji przemieszczeń konstrukcji oraz optymalizacji kształtów konstrukcji budowlanych.

Rozprawa przedstawiona do recenzji liczy 324 strony. Najobszerniejszą jej część stanowią kopie ośmiu artykułów opublikowanych w języku angielskim we wiodących wydawnictwach naukowych (272 strony).

Przed tekstami artykułów znajduje się opracowanie liczące 52 strony, również napisane w języku angielskim, które zostało podzielone na czternaście rozdziałów, przy czym

pierwszych pięć jest nienumerowanych. Tych pięć rozdziałów zawiera: Streszczenie (1 strona), Lista ośmiu publikacji wchodzących w skład rozprawy (1 strona), Dane bibliograficzne ośmiu publikacji (1 strona), Informacje dotyczące udziału Doktoranta w stworzeniu publikacji (2 strony), Informacje o prawach autorskich (1 strona).

Kolejnych dziewięć rozdziałów jest numerowanych. W rozdziale 1 (Wprowadzenie – 4 strony) znajduje się krótka charakterystyka podjętej tematyki badań oraz przegląd stanu wiedzy dotyczący podjętej tematyki. W rozdziale 2 (Cel i zakres – 3 strony) wskazano cele i zakresy ośmiu publikacji wchodzących w skład rozprawy. Rozdział 3 (Metodologia i modelowanie – 10 stron) został podzielony na 8 podrozdziałów. W kolejnych podrozdziałach (podrozdziały 3.1-3.8) omówiona jest technika badawcza przyjęta w odpowiednich artykułach (artykuły I-VIII). Rozdział 4 (Wyniki i analizy badań – 9 stron) również został podzielony na osiem podrozdziałów, w taki sposób, że każdy z nich odpowiada kolejnemu artykułowi. Rozdział 5 (Wnioski – 2 strony) zawiera wnioski z przeprowadzonych badań, już bez rozbicia ich na poszczególne artykuły. Rozdział 6 (Plany przyszłych badań – 1 strona) zawiera pięć wypunktowanych zagadnień, którymi Doktorant zamierza zająć się w przyszłości. Są to problemy będące rozwinięciem zagadnień opisanych w artykułach I-VIII. Rozdział 7 (Powołania – 6 stron) zawiera zestawienie 92 publikacji powołanych w rozdziałach od 1 do 6. Rozdział 8 (Prezentacje związane z tematyką rozprawy doktorskiej – 1 strona) zawiera zestawienie czterech wystąpień konferencyjnych Doktoranta w latach 2023-2025. Rozdział 9 (Lista publikacji opracowanych podczas studiów doktoranckich – 2 strony) zawiera listę 25 publikacji, których Doktorant jest współautorem. Prace zostały opublikowane w latach 2021-2025.

Poniżej zestawiono osiem artykułów o numerach od I do VIII, które zostały przedstawione w nienumerowanym rozdziale „Lista ośmiu publikacji wchodzących w skład rozprawy” na stronie 10 rozprawy. Do numerów tych artykułów odwołuję się w niniejszej recenzji.

Artykuł I: Manguri, A., N. Saeed, and R. Jankowski, A review: structural shape and stress control techniques and their applications. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 2025. 32(2): p. 885-898. <https://doi.org/10.1007/s11831-024-10149-9>.

Artykuł II: Manguri, A., H. Hassan, N. Saeed, and R. Jankowski, Topology, size, and shape optimization in civil engineering structures: a review. *Computer Modeling in Engineering & Sciences*, 2025. 142(2). <https://doi.org/10.32604/cmes.2025.059249>.

Artykuł III: Manguri, A., N. Saeed, and R. Jankowski, Deformation mitigation and twisting moment control in space frames. *Structures*, 2024. 68: p. 107227. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2024.107227>.

Artykuł IV: Manguri, A., N. Saeed, and R. Jankowski, Controlling nodal displacement of pantographic structures using matrix condensation and interior-point optimization: A numerical and experimental study. *Engineering Structures*, 2024. 304: p. 117603. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2024.117603>.

Artykuł V: Manguri, A., N. Saeed, M. Szczepański, and R. Jankowski, Deformation and bending moment mitigation through quasi-static adjustment in scissor structures. *Acta Mechanica*, 2026. <https://doi.org/10.1007/s00707-026-04723-4>.

Artykuł VI: Manguri, A., D. Magisano, and R. Jankowski, Optimal shape and stress control of geometrically nonlinear structures with exact gradient with respect to the actuation inputs. Structures, 2024. 70: p. 107738. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2024.107738>.

Artykuł VII: Manguri, A., D. Magisano, and R. Jankowski, Gradient-based weight minimization of nonlinear truss structures with displacement, stress, and stability constraints. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2025. 126(14): p. e70096. <https://doi.org/10.1002/nme.70096>.

Artykuł VIII: Manguri, A., N. Saeed, M. Szczepański, and R. Jankowski, Bending moment control and weight optimization in space structures by adding extra members in the optimal locations. Advances in Science and Technology Research Journal, 2023. 17(4): p. 313-324. <https://doi.org/10.12913/22998624/169573>.

3 Charakterystyka artykułów I-VIII

Podstawą oceny rozprawy są osiągnięcia doktoranta przedstawione w artykułach I-VIII. W związku z tym w kolejnych podrozdziałach zamieszczam krótką charakterystykę tych prac. W każdym podrozdziale, po krótkim scharakteryzowaniu artykułu znajdują się uwagi do danej publikacji.

3.1 Artykuł I.

Artykuł zawiera przegląd literatury dotyczący kontroli kształtu i naprężeń w konstrukcjach podatnych. Zasadnicze rozdziały tego artykułu to drugi i trzeci. Rozdział drugi (Structural control) podzielano na trzy podrozdziały dotyczące: kontroli kształtu konstrukcji (2.1. Shape control), kontroli wyężenia (2.2. Stress Control) oraz równoczesnej kontroli kształtu i wyężenia (2.3. Shape and Stress Control Simultaneously). W rozdziale trzecim (Types of Actuators) omówiono typy siłowników stosowanych w konstrukcjach przedstawiając w kolejnych podrozdziałach: siłowniki mechaniczne (3.1. Mechanical Actuators /Turnbuckles/), wywoływanie zmian długości elementów oddziaływaniem temperatury (3.2. Thermal Effect), zastosowanie efektów piezoelektrycznych (3.3. Piezoelectric), wykorzystanie stopów z pamięcią kształtu (3.4. Shape Memory Alloy /SMA/). Dwa kolejne rozdziały dotyczą ustalania liczby siłowników niezbędnych do kontrolowania kształtu konstrukcji (4. Number of Actuators) oraz optymalnego położenia siłowników (5. Optimal Location of Actuators). W artykule powołano aż 146 publikacji, co dało podstawę do statystycznych analiz liczby publikacji odnoszących się do kontroli kształtu konstrukcji ukazujących się w poszczególnych latach od 2010 r. W podsumowaniu przedstawiono plan dalszej pracy stwierdzając w szczególności, że: (1) większość metod opracowanych do kontroli kształtu i wyężenia konstrukcji to techniki liniowe, podczas gdy niektóre konstrukcje są geometrycznie nieliniowe, zwłaszcza konstrukcje kablów; (2) należy wprowadzić zaawansowane algorytmy optymalizacyjne służące do znajdowania optymalnego rozmieszczenia siłowników i ich liczby; (3) należy opracować zaawansowane siłowniki redystrybuujące naprężenia i odkształcenia.

W artykule wskazano, że korzystano z bazy czasopism i artykułów Web of Science wpisując słowa kluczowe: „shape control”, „displacement”, actuators” i “structures“. Doprowadziło to do wyboru 146 publikacji, co jest oczywiście znaczną liczbą cytowań. Jednak takie przyjęcie słów kluczowych zawęziło spektrum dokonanego przeglądu do analiz teoretycznych dotyczących konstrukcji prętowych i cięgnowych z siłownikami wbudowanymi w elementy

tych konstrukcji oraz badań modeli laboratoryjnych tych konstrukcji. W artykule nie wspomniano, że stan konstrukcji kontroluje się również ingerując w reakcje podporowe belek statycznie niewyznaczanych oraz korygując położenie przęseł mostowych. Za pomocą siłowników ingeruje się także w sposób kontrolowany w położenie całych budynków prowadząc ich przemieszczanie. Osobnym zagadnieniem jest sterowanie procesem usuwania wychyleń całych budynków na przykład przez ich nierównomierne ponoszenie siłownikami wbudowanymi w budynki (rektyfikacja). Ciekawym, niewspomnianym w przeglądzie literatury zagadnieniem jest modyfikacja kształtów konstrukcji (na przykład ścian) przez oddziaływanie siłownikami na wybrane elementy konstrukcji lub na całe konstrukcje. W kształt konstrukcji budowlanych ingeruje się także stosując różne typy iniekcji. Na wytworzenie i kształt budowli żelbetowych wpływa skurcz betonu, którym także można sterować. Zagadnienie kontroli kształtu konstrukcji budowlanych jest oczywiście bardzo szerokim zagadnieniem i w ramach artykułu, którego objętość jest zawsze ograniczona. Autor musi przeprowadzić selekcję podejmowanych zagadnień. Należało jednak napisać, że przedmiotem rozważań są tylko konstrukcje prętowe i cięgnowe. Za istotne niedociągnięcie przeprowadzonego przeglądu literatury w artykule I uważam także nieuwzględnienie w rozdziale numer 3 tłokowych siłowników hydraulicznych stosowanych do kontroli kształtu konstrukcji i siłowników membranowych. Więcej uwag dotyczących niekompletności dokonanego przeglądu literatury zamieszczono w rozdziale 5 (Uwagi do rozprawy) niniejszej recenzji.

Prowadząc badania literaturowe nie dostrzeżono, że zagadnienia „kontroli kształtu” i „wymuszenia zmian długości” stanowią część szerszego zagadnienia jakim jest obciążenie konstrukcji w postaci wymuszenia kinematycznego. Wpisanie takiego pojęcia do wyszukiwarki pozwoliłoby na szersze spojrzenie na zagadnienie. W konsekwencji tytuł artykułu zostałby sformułowany w taki sposób, że odpowiadałby faktowi podjęcia przeglądu stanu wiedzy w zakresie ograniczonym do konstrukcji prętowych i cięgnowych.

W artykule I na stronie 4 znajduje się stwierdzenie, z którego wynika, że wszystkie konstrukcje doznają wstępnego sprężenia wskutek oddziaływania ciężaru własnego. Jest to stwierdzenie nieprawdziwe. Ciężar własny jest obciążeniem grawitacyjnym, jak znaczna część obciążeń działających na konstrukcję. Trudno obciążenia grawitacyjne uznać za wywołujące wstępne sprężenie.

W artykule występują nieliczne błędy literowe na str. 2: dwukrotne powtórzenie pojęcia „stres control”, zbędny przecinek po „structures”, słowo „who” jest napisane z dużej litery w środku zdania.

3.2 Artykuł II

Według Autorów w artykule przedstawiono kompleksowy przegląd technik optymalizacji konstrukcji budowlanych obejmujący: rozmiar, kształt i topologię oraz podejścia wielokryterialne integrujące wiele metod. Artykuł jest obszerny, liczy 28 stron tekstu (z literaturą 40 stron). Co bardzo istotne w artykule powołano rekordową liczbę 219 pozycji literaturowych zaznaczając jednocześnie, że są to tylko prace opublikowane w latach 2005-2024.

Poszczególne rozdziały odnoszą się do następujących konstrukcji: kratownic (rozdział 2), ram (rozdział 3), tensegrity structures (rozdział 4), konstrukcji żelbetowych (rozdział 5) oraz innych konstrukcji (rozdział 6).

Przy znacznej liczbie zagadnień podjętych w artykule trudno odnieść się do poszczególnych problemów. Warto jednak wskazać na dwie niekonsekwencje w przyjętej strukturze dokumentu. Pierwsza polega na tym, że rozdziały 2, 3 i 4 prowadzą czytelnika po zawiłościach topologicznej optymalizacji ze względu na rozwiązania konstrukcyjne, a rozdział 4 ze względu na materiał konstrukcyjny. W tej sytuacji nietrudno o powtórzenia. Druga to dysproporcja dotycząca zawartości poszczególnych rozdziałów. Rozdział 2 dotyczący kratownic obejmuje 17 stron w tym podrozdziały (2.1, 2.2, 2.3, 2.4) i punkty (np. 2.3.1, 2.3.2). Z kolei rozdział 5 dotyczący konstrukcji żelbetowych stanowi jedynie 1/3 strony bez podrozdziałów i podpunktów. Tymczasem konstrukcje żelbetowe stanowią znaczny procent wznoszonych obecnie konstrukcji i problem ich optymalizacji jest obecny w literaturze. Stąd moja uwaga, że proporcja miejsca poświęconego poszczególnym typom konstrukcji na pewno nie odzwierciedla rzeczywistości budowlanej a zatem i liczby prac badawczych dotyczących tematu. Odnosząc się jeszcze do optymalizacji konstrukcji żelbetowych (rozdział 5), to chciałbym wskazać na dwa zasadnicze elementy, które nie pojawiły się w tym przeglądzie. Pierwszym jest optymalizacja konstrukcji żelbetowych, ze względu na procent zbrojenia, który w optymalizacji żelbetu jest wiodący. Dany przekrój (czyli w konsekwencji element i cała konstrukcja) może być masywniejszy przy mniejszej ilości kosztownego zbrojenia lub smuklejszy, ale z większą ilością zbrojenia. Inaczej podchodzi się do optymalizacji belek ze względu na ten procent zbrojenia, a inaczej do słupów. Przy optymalizacji funkcją celu jest często koszt. Drugim zagadnieniem, który w naturalny sposób ogranicza optymalizację są szeroko rozumiane warunki konstrukcyjne, w tym proporcje wymiarów np. smukłość słupów (wyboczenie), smukłość belek (zwichrzenie).

3.3 Artykuł III

Celem artykułu było opracowanie algorytmu obliczeniowego, którego efektem jest redukcja momentów skręcających w ramach przestrzennych. Redukcja ta jest osiąga na przez zmianę długości prętów ram siłownikami wbudowanymi w pręty tych ram. Algorytm zastosowano następnie do kontroli odkształceń i redukcji sił wewnętrznych w elementach prętowej konstrukcji przestrzennej w kształcie jaja. Konstrukcja ta w wybranych węzłach została obciążona siłami działającymi w kierunku pionowym.

Rozdział 2 omawianego tu artykułu III, w którym Doktorant jest wykazany jako pierwszy autor, zawiera wyprowadzenie wzorów stanowiące rozwinięcie zależności wynikających z metody sił. Te same wyprowadzenia wzorów znajdują się w pracy z 2022 r. (Static Shape and Stress Control of Trusses with Optimum Time, Actuators and Actuation, International Journal of Civil Engineering (2023) 21:379–390). W tej pracy z 2022 r. Doktorant nie jest pierwszym autorem. Optymalizacja zdefiniowanego zagadnienia została przeprowadzona algorytmami MATLAB-a, zaś jego weryfikację przeprowadzono oprogramowaniem SAP2000. Przedstawioną w artykule analizę konstrukcji w kształcie jaja oceniam wysoko. Wskazuję jednak na nieścisłość samej metody.

W równaniach metody założono, że pręty konstrukcji wyposażone są w siłowniki, za pomocą których można zmieniać ich długość. Założono milcząco, że siłowniki te są połączone szeregowo z prętami. Zmianę długości pręta wywołaną zmianą długości siłownika oznaczono przez e_0 . Jednocześnie przez e_0 oznaczono wymuszoną zmianę długości siłownika. Utożsamianie tych dwóch wielkości jest nieściśle. Założenie to jest słuszne tylko wtedy, gdy siłownik ma nieskończoną sztywność i jednocześnie nie występują siły tarcia wewnętrznego w siłowniku, co omawiam szerzej w rozdziale 5 recenzji (Uwagi do rozprawy).

W artykule pojawia się nieco mylące pojęcie „active bar”. Każdy pręt w konstrukcji o macierzy sztywności dodatnio określonej jest aktywny i jego odpowiedzią na obciążenie kinematyczne w postaci układu wymuszeń e_0 i obciążenia zewnętrznego są odkształcenia.

Nieścisłe są oznaczenia węzłów w postaci niewypełnionych okręgów przyjęte na rysunku 5 artykułu III, co może być interpretowane jako przeguby. Tymczasem w macierzy znajdującej się pod równaniem 12 występują człony odpowiadające momentom zginającym, co stoi w sprzeczności z przyjęciem przegubów na końcach prętów. Na omawianym rysunku 5 ponadto brakuje ośmiu prętów ułożonych równoleżnikowo. Z tekstu artykułu wynika, że właśnie te pręty powinny być zakończone przegubami.

W iteracyjnej metodzie przedstawionej w artykule znajduje się stwierdzenie, że siłowniki, w których wymuszana jest zmiana długości mniejsza niż 0,1 mm będą usuwane. Jeżeli jest to usunięcie fizyczne to zmianie ulegną macierze układu (macierze H, C, F), co nie zostało uwzględnione w opisie metody.

3.4 Artykuł IV

W artykule przedstawiono zastosowanie metody kontroli przemieszczeń konstrukcji działających na zasadzie pantografu. Autorzy wykazują, że zastosowanie metody kondensacji macierzy prowadzi do zmniejszenia o 40%-60% wartości sił i przemieszczeń wymuszanych w prętach ustrojów w celu przywrócenia im pierwotnego kształtu sprzed ich obciążenia. Punktem wyjścia metody jest odpowiednia zmiana położenia wierszy w liniowych równaniach metody sił uwzględniająca węzły, w których nie jest przyłożone obciążenie. Jest to rozwinięcie metody przedstawionej w rozprawie z 2014 r. (Saeed N.M. Prestress and deformation control in flexible structures; Cardiff University; <http://orca.cf.ac.uk/69777/>). Jednocześnie idea tej metody wywodzi się z prac współtwórcy MES prof. Przemienieckiego z 1968 r. (J.S. Przemieniecki, Theory of Structural Analysis, McGraw-Hill, New York, 1968).

W artykule przedstawiono dla dwa stanowiska badawcze i dwa modele fizyczne. Pierwszym modelem fizycznym jest konstrukcja długości 1,782 m. Konstrukcja ta była przedmiotem badań zrelacjonowanych w innym doktoracie z 2014 r. W doktoracie z 2014 r. zastosowano analogiczny sposób pomiaru, z tym, że w badaniach doświadczalnych opisanych w omawianym tu artykule IV uzyskano dokładność położenia punktów konstrukcji wynoszącą 0,2 mm, podczas gdy w rozprawie z 2014 r. uzyskano mniejszą dokładność wynoszącą 0,4 mm. Wzory (8) – (14) omawianego artykułu IV pokrywają się z wzorami (3.29) – (3.43) rozprawy z 2014 r.

Modelem nie występującym wcześniej w literaturze jest drugi fizyczny model konstrukcji działającej na zasadzie pantografu o długości 0,6 m. Zasada działania siłowników śrubowych w tym modelu jest taka jak w modelu pierwszym. W artykule IV zrelacjonowano zatem twórcze rozwinięcie metod opisanych w literaturze przedmiotu.

3.5 Artykuł V

W artykule podjęto tematykę konstrukcji nożycowych w zakresie wpływu momentu zginającego na ich odkształcenia oraz sił wewnętrznych w elementach tych konstrukcji, w szczególności znacznego momentu występującego w łącznikach ścinanych. Moment ten wynika z różnicy sił osiowych w połączonych elementach prętowych. W badaniach prowadzono do zmniejszania tego momentu na dwa sposoby. Pierwszym było wbudowanie w model konstrukcji nożycowej lin w tzw. efektywnych miejscach. Drugim była zmiana długości wybranych elementów konstrukcji siłownikami śrubowymi. Zastosowano algorytm

optymalizacyjny, znany z wcześniejszych publikacji mający na celu minimalizację całkowitej zmiany długości elementów. Wykazano, że moment zginający i odkształcenie można zmniejszyć o 90% poprzez wprowadzenie lin. Z kolei wymuszona zmiana długości elementów może prowadzić do redukcji sił wewnętrznych od 4% do 90% w zależności od kształtu konstrukcji nożycowej.

W rozdziale drugim artykułu znajdują się wyprowadzenia wzorów metody znane z pracy z 2014 r. (Saeed N.M. Prestress and deformation control in flexible structures; Cardiff University; <http://orca.cf.ac.uk/69777/>). Ponadto w załączniku B do artykułu zamieszczono wyprowadzenia równań również znane z wcześniejszych prac.

Jako istotne osiągnięcie przedstawione w artykule należy uznać sposób określania optymalnego miejsca wbudowania lin w analizowane konstrukcje nożycowe. Ponadto wykazano, że zakres metody zmniejszania sił wewnętrznych w konstrukcjach nożycowych przez wymuszenia zmiany długości prętów jest ograniczony do konstrukcji mniej złożonych.

3.6 Artykuł VI

W artykule wyprowadzono zależności umożliwiające sterowanie kinematycznymi wymuszeniami położenia węzłów konstrukcji. Równania bazują na metodach gradientowych zintegrowanych z nieliniową metodą elementów skończonych. Celem metody jest minimalizacja wymuszeń kinematycznych, które wywołują żadaną zmianę w konstrukcji.

Autorzy zastosowali łańcuchowe różniczkowanie niejawne oraz macierze sztywności rozłożonej na czynniki w iteracjach Newtona. Procedura została zilustrowana na przykładzie trójwymiarowych kratownic. Podejście zostało tak sformułowane, aby można było je zastosować do dowolnego geometrycznie nieliniowego modelu elementów skończonych, przy użyciu ogólnej postaci równań dyskretnych ułatwiającej integrację z komercyjnymi programami. Autorzy rozwiązywali te zagadnienie w Matlabie przy pomocy wbudowanej w program funkcji.

Za główne osiągnięcie tego artykułu wskazuję rozdział 3, w którym sformułowano nieliniowy problem optymalizacyjny. Jest to równocześnie moim zdaniem największe osiągnięcie przedstawionej rozprawy.

Jednocześnie wskazuję na błędy redakcyjne, które wkradły się do tekstu artykułu: (1) oznaczenie długości elementu po zmianie długości jest inne w tekście, a inne na rysunkach, (2) strunie fortepianowej przypisano średnicę 42 mm i moduł sprężystości 210 MPa, tymczasem moduł sprężystości stali wynosi ok. 200 GPa a średnica strun fortepianowych jest mniejsza, (3) w podpisie rysunku 2 występuje powołanie na pracę [55], w której ten rysunek nie występuje, prawdopodobnie należało powołać się na pracę [56], (4) niepowołany rysunek 4 jest znany z innych prac na przykład You, Z. (1997). Displacement control of prestressed structures. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering 144(1), pp. 51-59.

W artykule zmieniono oznaczenia w stosunku do innych prac Autora w odniesieniu do wymuszonej zmiany długości (tu odkształcenia), przypisując jej indeks „a”, podczas gdy w poprzednich artykułach do tej wielkości przypisany był indeks „0”. Tutaj indeks „0” oznacza „odkształcenia nieliniowe”.

3.7 Artykuł VII

W artykule VII opracowano metodę optymalizacji kratownic o nieliniowej geometrii służącą do minimalizacji ciężaru konstrukcji. Metoda optymalizacji uwzględnia ograniczenia dotyczące: pola przekroju poprzecznego każdego elementu konstrukcyjnego, zakresów przemieszczeń i naprężeń oraz ograniczenia wynikające ze stateczności. Metodę można zaliczyć do gradientowych. Została ona zobrazowana na siedmiu ustrojach: dwóch prostych płaskich i symetrycznych ustrojach prętowych oraz na pięciu prętowych konstrukcjach przestrzennych.

Opracowaną metodę oceniam bardzo wysoko, w szczególności za połączenie zagadnień optymalizacyjnych z analizą stateczności konstrukcji.

3.8 Artykuł VIII

Przedmiotem analiz prowadzonych w artykule VIII jest przestrzenna, jednopowierzchniowa konstrukcja prętowa w kształcie jaja o wysokości 5 m i szerokości 4 m. Do konstrukcji przykładane są obciążenia w postaci sił skupionych w węzłach. Celem analiz jest wyznaczenie optymalnego położenia dodatkowego zestawu prętów wprowadzonych w tę konstrukcję, ze względu na redukcję wyężenia jej elementów. Dodatkowe pręty mają położenie równoleżnikowe. Z uwagi na formę konstrukcji wyjściowej jeden zestaw wprowadzonych prętów składa się z ośmiu elementów. Na początku rozważane są cztery niezależne układy sił skupionych: dwa układy sił pionowych przyłożonych w węzłach oraz dwa układy sił poziomych. Dla każdego z nich wyznaczane jest optymalne położenie zestawu dodatkowych prętów. W dalszej kolejności rozważane są równocześnie działające obciążenia pionowe i poziome, dla których również wyznaczane są optymalne położenia wzmocnień. Wykazano, że wprowadzając dodatkowe zestawy prętów, w zależności od obciążenia masę konstrukcji można zredukować od 6% do 28%.

Artykuł jest ciekawą analizą zagadnień statycznych. W odróżnieniu od artykułów o numerach III-VII nie wprowadzano tu wysublimowanych metod optymalizacji. W przeciwieństwie do innych artykułów, gdzie również analizowano wyężenie ustrojów prętowych, w tym przypadku jako miarę wyężenia prętów przyjęto tylko moment zginający. Pominiecie sił osiowych, w szczególności, że mamy do czynienia z obciążeniami przyłożonymi w węzłach wydaje się zbyt dużym uproszczeniem.

W artykule występują niekonsekwencje. Z jednej strony przyjęto, że pręty modelu wykonane są ze stali, a z drugiej ciężar objętościowy materiału przyjęto równy 25 kN/m^3 , co odpowiada żelbetowi. Na rysunku 2 naniesionych jest 10 przypadków położenia zestawu prętów wzmacniających (Case 1 – Case 10), a w podpisie tego rysunku i w tekście artykułu jest mowa o 11 przypadkach. Ponadto wskazuje się na błąd rachunkowy na s. 318: $176+8 \neq 174$.

4 Ocena rozprawy i dorobku

Rozprawa doktorska została przedstawiona w postaci ośmiu artykułów opublikowanych w renomowanych czasopismach naukowych. W związku z tym rozprawa zostaje oceniona ze względu na merytoryczny wkład Doktoranta zawarty w artykułach oraz ze względu na Jego dorobek publikacyjny.

4.1 Ocena merytoryczna

Lektura artykułów I-VIII wskazuje, że Doktorant podjął się realizacji trzech celów:

- cel 1 - wykonanie przeglądu literatury dotyczącego sterowania zmianami długości elementów konstrukcji oraz przeglądu dotyczącego optymalizacji konstrukcji,
- cel 2 - analiza i wdrożenie metod sterowania zmianami długości elementów konstrukcyjnych mającymi na celu redukcję przemieszczeń modeli konstrukcji oraz redukcję sił wewnętrznych w elementach modeli konstrukcji,
- cel 3 - minimalizacja ciężaru konstrukcji przy uwzględnieniu kształtu, naprężeń i stateczności konstrukcji.

Osiągnięcie tych celów jest oceniane przy założeniu, że rozprawa doktorska ma charakter teoretyczny i przedmiotem rozprawy są matematyczne modele konstrukcji. Doktorant zrealizował również badania laboratoryjne opisane w artykule IV oraz przywoływał liczne wyniki badań innych autorów. Badania te dotyczyły jednak konstrukcji o małym ciężarze i niewielkich obciążeniach, co nie w pełni oddaje zjawiska zachodzące w obiektach rzeczywistych. Poniżej oceniana jest spójność wywodów, adekwatność zastosowanych metod badawczych do przyjętych założeń i poprawność wnioskowania. Dyskusja dotycząca poprawności przyjętych założeń w odniesieniu do zjawisk w konstrukcjach rzeczywistych została przeprowadzona w kolejnym rozdziale niniejszej recenzji (rozdział 5. Uwagi do rozprawy).

Realizacja celu 1 została podjęta w artykułach I i II. W artykule I zrealizowano przegląd metod sterowania zmianami długości prętów konstrukcji. Zmiany te wymuszane są siłownikami wbudowanymi w pręty. Wykazano, że celem tych zmian jest redukcja wartości sił wewnętrznych wywołanych przez obciążenie zewnętrzne przy równoczesnej minimalizacji przemieszczeń węzłów od łącznego oddziaływania obciążenia zewnętrznego i wymuszonej zmiany długości prętów. Metody sterowania zostały podzielone na trzy główne kategorie: sterowanie przemieszczeniami węzłów, sterowanie siłami w prętach oraz jednoczesne sterowanie obydwoma parametrami. Wysoko należy ocenić dokładnie opisane strategie minimalizacji liczby siłowników. Ponadto w artykule omówiono różne typy siłowników, podkreślając jednocześnie ich zalety i wady.

Z kolei w artykule II zrelacjonowano kompleksowy przegląd metod optymalizacji ciężaru konstrukcji uwzględniający kształt, naprężenia i zagadnienia stateczności. Zwieńczeniem tych analiz jest wielokryterialne podejście do optymalizacji konstrukcji. Ponadto zidentyfikowano współczesne trendy w optymalizacji konstrukcji, które wykorzystują algorytmy uczenia maszynowego w połączeniu z różnymi metodami optymalizacji.

Oceniając realizację celu 1 wskazuje się ogromną liczbę publikacji przywołanych; w artykule I jest to 146 publikacji, a w artykule II – rekordowa liczba 219 publikacji. Z przyjętego przez Doktoranta punktu widzenia cel pierwszy został osiągnięty. Merytoryczne uwagi dotyczące dokonanego przeglądu literatury znajdują się w rozdziale 5 recenzji.

Realizacja celu 2 (analiza metod sterowania zmianami długości elementów konstrukcji) została podjęta w artykułach III, IV, V i VI. W artykule III podjęto badania nad konstrukcją sztywną, w której zachodzą małe przemieszczenia węzłów. Dla takiej sytuacji zaproponowano dwie metodologie: (i) zmniejszenie przemieszczeń węzłów i momentu skręcającego poprzez zmianę długości prętów oraz (ii) zmniejszenie odkształcenia przez dodanie dodatkowych elementów, a następnie kontrolę kształtu i momentów skręcających. Ze względu na założenie, że mamy do czynienia z konstrukcją sztywną, przyjęto prawidłowo jako obiekt badawczy model konstrukcji w kształcie jaja. Dla tego modelu wykazano skuteczność przyjętych metodologii postępowania.

Wysoko oceniam opracowany i wdrożony algorytm obliczeniowy minimalizujący indukowane momenty skręcające przez dostosowanie długości prętów wbudowanych w ramy przestrzenne oraz redukcję sił wewnętrznych. Funkcja celu (całkowita zmiana długości prętów) i funkcje ograniczeń (przemieszczenie i skręcanie) zostały efektywnie zoptymalizowane przy użyciu różnych technik, takich jak programowanie liniowe i sekwencyjne programowanie kwadratowe (SQP).

Z kolei w artykule IV przyjęto inne założenia dotyczące modelu. Założono, że mamy do czynienia z konstrukcją podatną, doznającą znacznych odkształceń. Przykładem takiej konstrukcji są układy nożycowe i układy działające na zasadzie pantografu. Dlatego głównym celem artykułu IV jest zaproponowanie efektywnej techniki, która skutecznie kontroluje przemieszczenia węzłowe konstrukcji nożycowych. W artykule wykazano, że zastosowanie zaproponowanej metody prowadzi do zmniejszenia o 40%-60% wartości sił i przemieszczeń wymuszanych w prętach ustrojów. Jednocześnie należy tu zaznaczyć, że zaproponowany sposób postępowania jest rozwinięciem metody przedstawionej w pracy z 2014 r. (Saeed N.M. Prestress and deformation control in flexible structures; Cardiff University; <http://orca.cf.ac.uk/69777/>). Jednocześnie idea tej metody wywodzi się z prac prof. Przemienieckiego z lat 60. XX w. (J.S. Przemieniecki, Theory of Structural Analysis, McGraw-Hill, New York, 1968).

Odnosić należy, że w artykule IV przedstawiono dwa stanowiska badawcze i dwa modele fizyczne. Pierwsze stanowisko badawcze i fizyczny model konstrukcji długości 1,782 m oraz sposób pomiarów był zastosowany już wcześniej przy realizacji innego doktoratu z 2014 r. W badaniach doświadczalnych opisanych w omawianym tu artykule IV uzyskano dokładność pomiaru położenia punktów konstrukcji wynoszącą 0,2 mm, podczas gdy w 2014 r. uzyskano mniejszą dokładność wynoszącą 0,4 mm. Wzory (8) – (14) artykułu IV pokrywają się z wzorami (3.29) – (3.43) rozprawy z 2014 r. Modelem nie występującym wcześniej w literaturze jest drugi fizyczny model konstrukcji o długości 0,6 m działającej na zasadzie pantografu.

Wysoko oceniam nowatorski sposób ograniczenia odkształceń konstrukcji pantografowych przez rozbudowanie ich o liny. Dla takich konstrukcji również zaproponowano skuteczny sposób redukcji momentów zginających i ograniczenia ich przemieszczeń.

W przypadku dużych odkształceń metody oparte na liniowej sprężystości mogą być niewystarczające. Dlatego w artykule VI opracowano technikę optymalizacji gradientowej zintegrowaną z nieliniową metodą elementów skończonych. Metoda ta jest oryginalna i nie ma swojego odniesienia w literaturze przedmiotu. Dlatego uznaję ją za największe osiągnięcie rozprawy doktorskiej.

Cel drugi w zakresie konstrukcji sztywnych został zatem osiągnięty przez twórcze rozwinięcie istniejących metod obliczeniowych i laboratoryjnych metod badawczych. Natomiast w zakresie konstrukcji podatnych cel drugi został osiągnięty przez opracowanie nowatorskiej metody optymalizacji gradientowej zintegrowanej z nieliniową metodą elementów skończonych.

Realizacja celu 3 (minimalizacja ciężaru konstrukcji przy uwzględnieniu kształtu, naprężeń i stateczności konstrukcji) została podjęta w artykułach VII i VIII. Metoda optymalizacji kratownic o nieliniowej geometrii służąca do minimalizacji ciężaru konstrukcji została przedstawiona w artykule VII. Uwzględnia ona ograniczenia dotyczące: pola przekroju

poprzecznego każdego elementu konstrukcyjnego, zakresów przemieszczeń i naprężeń oraz ograniczeń wynikających ze stateczności. Metodę można zliczyć do gradientowych. Została ona zobrażowana na siedmiu ustrojach: dwóch prostych płaskich i symetrycznych ustrojach prętowych oraz na pięciu prętowych konstrukcjach przestrzennych. Opracowaną metodę oceniam bardzo wysoko, w szczególności za połączenie zagadnień optymalizacyjnych z analizą stateczności konstrukcji. Z kolei statyczne analizy udokumentowane w artykule VIII wykazały, że w przypadku konstrukcji sztywnej (kratownica przestrzenna w kształcie jaja) odpowiednie umieszczenie dodatkowych prętów prowadzi do redukcji masy od 6% do 28%. Cel trzeci został także osiągnięty. Analizy przeprowadzone w artykułach VII i VIII są oryginalne i nie mają odniesienia w literaturze przedmiotu.

4.2 Ocena dorobku publikacyjnego

Dorobek publikacyjny Doktoranta z okresu studiów doktoranckich obejmuje 25 publikacji oraz 4 wystąpienia konferencyjne. Wszystkie publikacje oraz tematy wystąpień konferencyjnych są wieloautorskie. 22 artykuły i wszystkie wystąpienia powstały we współpracy z Promotorami z Politechniki Gdańskiej.

Chronologicznie pierwszy (2021 r.) z 25 wykazanych artykułów (Saeed, N.M., A.A.H. Manguri, and A.M. Adabar, Shape and force control of cable structures with minimal actuators and actuation. International Journal of Space Structures, 2021. 36(3): p. 241-248) powstał w innym zespole badawczym. Jednocześnie w artykule tym znajdują się rozwiązania, które następnie były rozwijane w ramach prac realizowanych już w Politechnice Gdańskiej. Podobne zagadnienia stanowiły tematykę jeszcze wcześniejszych prac Doktoranta jako współautora.

Przedstawione do oceny 8 artykułów zostało wybranych z 25. We wszystkich 8 pracach Doktorant jest pierwszym autorem. Artykuły te tworzą spójną całość ze względu na trzy cele, które zostały zrealizowane w ramach rozprawy. W odniesieniu do celu 2 część treści artykułów (głównie artykułu III) jest zbliżona do treści wcześniejszych artykułów, w których Doktorant nie jest pierwszym autorem (np. powołany wyżej artykuł z 2021 r.). Jednocześnie dorobek przedstawiony w artykułach w odniesieniu do celu 3 nie ma odniesienia w pracach innych autorów. Dorobek w odniesieniu do tego celu jest wybitny i był możliwy do osiągnięcia przez Doktoranta na podstawie wiedzy zdobytej przy opracowywaniu poprzednich prac.

Tablica. Zestawienie danych bibliometrycznych 8 artykułów przedstawionych w rozprawie

Artykuł	Czasopismo	Punktacja MNiSW	Impact factor (WoS)	Cite score (Scopus)
I	Archives of Computational Methods in Engineering	200	12,1	27,4
II	CMES-Computer Modeling in Engineering & Sciences	40	2,5	4,4
III	Structures	100	4,3	6,5
IV	Engineering Structures	140	6,4	11,2
V	Acta Mechanica	100	2,9	4,3
VI	Structures	100	4,3	6,5
VII	International Journal for Numerical Methods in Engineering	200	2,9	6,1
VIII	Advances in Science and Technology Research Journal	100	1,3	2,1

8 artykułów przedstawionych do oceny zostało opublikowanych w wysoko punktowanych czasopismach (Tablica). Na uznanie wskazuje się wysoki łączny IF wynoszący 36,7 oraz łączną punktację ministerialną wynoszącą 980 punktów. Dorobek Doktoranta wyrażony we wskaźnikach bibliometrycznych określam jako ogromny.

5 Uwagi do rozprawy

Rozprawa dotyczy matematycznych modeli konstrukcji obciążonych niewielkimi siłami oraz badań laboratoryjnych modeli o niewielkich rozmiarach i obciążeniach. W konsekwencji w rozwijanych modelach matematycznych dotyczących metod sterowania zmianami długości elementów konstrukcyjnych (cel 2) nie odniesiono się do części zjawisk zachodzących w konstrukcjach o rzeczywistych rozmiarach i obciążeniach. Moim zdaniem takim poprawnym odniesieniem mogłoby nawet być stwierdzenie, że świadomie zostają pominięte zjawiska, o których poniżej.

Zagadnienia podjęte w rozprawie dotyczące celu 1 i celu 2 mają liczne odniesienia w praktyce inżynierskiej. Obciążenie kinematyczne rzeczywistych budowli w postaci zmiany długości elementów wbudowanych w konstrukcje nie jest rzadkie i ma odzwierciedlenie w publikacjach naukowych. Te rzeczywiste rozwiązania nie zostały uwzględnione w przeglądzie stanu wiedzy (cel 1).

Wymuszenia kinematyczne polegające na zmianie długości elementów wbudowanych w konstrukcję występują w technologii wznoszenia budynków, w której żelbetowe stropy są wykonywane na poziomie terenu (jeden na drugim), a następnie podnoszone do właściwej pozycji siłownikami hydraulicznymi (lift slab). W omawianej technologii stosuje się zawsze co najmniej cztery siłowniki co oznacza, że schemat statyczny podnoszonego stropu jest statycznie niewyznaczalny. W takiej sytuacji konieczne jest takie wymuszanie przemieszczeń, aby przy uwzględnieniu obciążenia każdego z siłowników nie wystąpiły uszkodzenia nowo wykonanych stropów.

Innym przykładem wymuszeń kinematycznych elementów wbudowanych w konstrukcje (zmiana długości) jest technologia usuwania wychyleń budynków i budowli (rektyfikacja) siłownikami hydraulicznymi wbudowanymi w konstrukcje (w ściany budynków, w słupy konstrukcji ramowych) lub ustawione na palach pograżonych w gruncie pod obiektem. W taki sposób tylko w Polsce przeprowadzono rektyfikację setek budynków. Realizacjom tym towarzyszą badania zarówno laboratoryjne jak i w warunkach in situ, co znajduje odzwierciedlenie w literaturze przedmiotu.

W sposób kontrolowany wymuszane są także odkształcenia pojedynczych elementów konstrukcji budowlanych, w tym zabytkowych. Można tu przywołać opisane w literaturze przywracanie pierwotnego kształtu ścian zabytkowych murowanych baraków znajdujących się na terenie obozu koncentracyjnego Auschwitz II-Birkenau. W przypadku tych obiektów na zewnątrz budynków i w ich wnętrzu wykonywana była konstrukcja oporowa. Siłowniki wbudowywano między tę konstrukcję a ściany. Zmieniając długość siłowników wymuszano odkształcenia ścian.

Ponadto realizując cel 1 (przegląd literatury) nie wspomniano o tym, że wymuszając przemieszczenia rzeczywistych budowli stosowane są siłowniki hydrauliczne. Dotyczy to zarówno badań konstrukcji w skali rzeczywistej jak i rektyfikacji rzeczywistych konstrukcji. Przykładowo tłokowymi siłownikami przeprowadzono rektyfikację przez nierównomierne

podnoszenie ponad 700 budowli (w tym ok. 70 budynków XI kondygnacji, kościoły neogotyckie, obiekty przemysłowe). W przypadku konieczności wywołania przemieszczeń, przy sile w siłownikach rzędu 2000 kN stosuje się hydrauliczne siłowniki membranowe (o tych siłownikach również nie wspomniano w przeglądzie literatury).

Reakcją na wymuszenie kinematyczne (zmiana długości elementu) są siły wewnętrzne w siłownikach. Ze względu na fakt, że zmienia się wzajemne położenie elementów siłownika występują wewnętrzne siły sprężyste i wewnętrzne siły niesprężyste (siły niezachowawcze; tu siły tarcia). Warunkiem wystąpienia zmiany wzajemnego położenia elementów siłownika jest przewyciężenie sił tarcia wewnętrznego. W konsekwencji przy cyklicznym obciążaniu siłownika (sterowanie zmianą długości) występuje pętla histerezy w układzie współrzędnych siła obciążająca-zmiana długości siłownika. Kształt tej pętli zależy od wartości obciążenia. Wbudowanie siłownika cechującego się występowaniem wewnętrznych sił niesprężystych sprawia, że cała konstrukcja przyjmuje cechy konstrukcji, w której występują wewnętrzne siły niezachowawcze. Przykładowo niedostatecznie duża zmiana siły sprężystej w siłowniku nie wywołuje zmiany jego długości. Oznacza to w konsekwencji, że wzrasta siła wewnętrzna w siłowniku bez zmiany jego długości i bez zmiany sił wewnętrznych w pozostałych elementach konstrukcji.

Odnosnie celu 2 wskazuje się, że w równaniach metody założono, że pręty konstrukcji wyposażone są w siłowniki, za pomocą których można zmieniać ich długość. Założono milcząco, że siłowniki te są połączone szeregowo z prętami. Zmianę długości pręta wywołaną zmianą długości siłownika oznaczono przez e_0 . Jednocześnie przez e_0 oznaczono wymuszoną zmianę długości siłownika. Jest to opis nieściśły. Siłownik, jak każdy element konstrukcji ma swoją sztywność. W siłowniku będącym połączonym szeregowo z prętą, występują siły wewnętrzne, których wypadkowa ma kierunek i zwrot jak siła w pręcie. Zatem siłownik także doznaje odkształceń. Odkształcenia te nie są uwzględnione w równaniach metody w szczególności w wyjściowym wzorze (4 w artykule III). O tym, że odkształcenia te są istotne można przekonać się analizując przekroje elementów prętowych oraz przekroje siłowników na fotografiach zamieszczonych w rozprawie doktorskiej z 2014 r. (np. rys. 6.2 na stronie 168 pracy Saeed N.M. Prestress and deformation control in flexible structures [PhD Dissertation]: Cardiff University; 2014. <http://orca.cf.ac.uk/69777/>). Przekroje tych elementów są porównywalne. Ponadto w siłowniku występuje wewnętrzna siła tarcia, co jeszcze bardziej komplikuje zagadnienie. Wzór (4) w artykule III jest oczywiście prawdziwy, jeżeli założyć się, że sztywność siłownika jest nieskończona. Takiego założenia w sposób jawny jednak nie poczyniono.

Poza powyższymi uwagami merytorycznymi wskazuję, że w rozprawie występują drobne błędy edytorskie. Zostały one wymienione przy omawianiu poszczególnych artykułów (rozdział 3 recenzji).

Przedstawione powyżej uwagi nie podważają poprawności logicznego rozumowania przedstawionego w rozprawie i prawdziwości otrzymanych rozwiązań. Analizy przeprowadzone w rozprawie są słuszne, ponieważ są przeprowadzone dla założonej ciągłości zależności siła-odkształcenie (z uwzględnieniem nieliniowości) i zakładają nieskończoną sztywność siłowników. Przyjęty program nie zakładał realizacji badań obiektów rzeczywistych, w konsekwencji nie można było zastosować metody naukowej polegającej na interakcji między obserwacjami poczynionymi w trakcie badań a przyjmowanymi modelami matematycznymi.

6 Podsumowanie

Oceniana rozprawa dotyczy dwóch istotnych zagadnień w konstrukcjach budowlanych. Pierwszym jest redukcja przemieszczeń węzłów i sił wewnętrznych w konstrukcjach prętowych. Redukcja ta osiągana jest przez wymuszenie zmian długości elementów tych konstrukcji (siłowniki) lub przez wbudowanie dodatkowych elementów (pręty, liny). Zmiany wywoływane są siłownikami wbudowanymi w konstrukcje. Drugim podjętym zagadnieniem jest minimalizacja ciężaru konstrukcji przy uwzględnieniu kształtu, naprężeń i stateczności konstrukcji. Rozprawa obejmuje zagadnienia teoretyczne, mimo włączenia do rozprawy badań laboratoryjnych.

W rozprawie wyróżniłem trzy cele:

- cel 1 - wykonanie przeglądu literatury dotyczącego sterowania zmianą długości elementów konstrukcji oraz optymalizacją konstrukcji,
- cel 2 - analiza metod sterowania zmianami długości elementów konstrukcyjnych,
- cel 3 - minimalizacja ciężaru konstrukcji przy uwzględnieniu kształtu, naprężeń i stateczności konstrukcji.

Przedstawiona rozprawa stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego w zakresie celu 3. Doktorant udowodnił, że ma wiedzę i posiada umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. W zakresie celu 2 rozprawa stanowi kontynuację prac obecnych w literaturze przedmiotu.

W odniesieniu do celu 1 i celu 2 sformułowano uwagi znajdujące się w rozdziale 5 recenzji. Uwagi te mają charakter dyskusyjny i nie podważają poprawności logicznego rozumowania przedstawionego w rozprawie i prawdziwości otrzymanych rozwiązań. Analizy przeprowadzone w rozprawie są słuszne, ponieważ są przeprowadzone dla założonej ciągłości zależności siła-odkształcenie (z uwzględnieniem nieliniowości) i zakładają nieskończoną sztywność siłowników.

Biorąc powyższe pod uwagę stwierdzam, że recenzowana rozprawa doktorska autorstwa mgr inż. Ahmeda Manguri pt. „Shape optimization, stress control, and effective design of flexible structures” wnosi istotny wkład do dyscypliny Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport i spełnia wymogi stawiane pracom doktorskim określone w Ustawie z dnia 20.07.2018 roku „Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce” (tekst jednolity Dz. U. z 2024 r. poz. 1571). Uwzględniając ogromny dorobek publikacyjny Doktoranta wnoszę o wyróżnienie rozprawy doktorskiej.

