

dr hab. inż. Anna Al Sabouni-Zawadzka

Warszawa, 12 grudnia 2024

Instytut Inżynierii Budowlanej

Wydział Inżynierii Lądowej

Politechnika Warszawska

e-mail: anna.zawadzka@pw.edu.pl

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Maryny Solovei

pt. „Dynamic Stability Analysis of Tensegrity Domes”

(tytuł polski: „Analiza stateczności dynamicznej kopuł typu tensegrity”)

wykonanej pod kierunkiem

dr hab. inż. Pauliny Obary, prof. PŚk

1. Podstawa opracowania

Podstawą do wykonania recenzji jest pismo Dyrektora Naukowego Dyscypliny Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport, prof. dra hab. inż. Jerzego Wawrzeńczyka z dnia 15 października 2024 r. i Uchwała Nr 23/2024 Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport Politechniki Świętokrzyskiej z dnia 9 października 2024 r.

2. Sylwetka Kandydatki

Pani mgr inż. Maryna Solovei uzyskała tytuł magistra inżyniera w 2020 r. w Politechnice Świętokrzyskiej. Kandydatka nie ubiegała się wcześniej o nadanie stopnia doktora. W trakcie kształcenia w szkole doktorskiej nie zajmowała żadnego stanowiska, odbyła tylko praktyki w Politechnice Świętokrzyskiej, prowadząc zajęcia z Mechaniki Teoretycznej. Po ukończeniu studiów doktoranckich objęła stanowisko projektanta w firmie Biko Serwis, gdzie pracuje obecnie.

3. Ogólna charakterystyka pracy

Recenzowana rozprawa dotyczy ciekawego zagadnienia analizy stateczności dynamicznej kopuł tensegrity: Geigera i Levy'ego. Struktury te wyróżniają się obecnością mechanizmów nieskończenie małych i stabilizujących je samorównoważnych układów sił podłużnych (ang. *self-stress*), które nie występują w tradycyjnych stalowych kopułach ciągnowo-prętowych. Autorka skupiła się na analizie wpływu wstępnego sprężenia konstrukcji na własności statyczne (przemieszczenia, sztywność i maksymalne wyężenie) i dynamiczne (częstotliwości drgań własnych i swobodnych) oraz rozkład i zakres obszarów niestateczności. Praca ma charakter teoretyczno-numeryczny i zawiera obszerny materiał, który pochodzi z badań własnych Autorki. W symulacjach wykorzystano model dyskretny tensegrity w zakresie teorii II-go i III-go rzędu, a także analizę spektralną macierzy kratownic oraz algorytm genetyczny.

wpłynęło dnia:

Data 2025 -01- 22

Podpis

Autorka sformułowała trzy hipotezy badawcze:

1. Kontrola parametrów statycznych i dynamicznych jest możliwa tylko dla kopuł tensegrity, które posiadają mechanizm infinitezymalny.
2. Modyfikacje konstrukcji mogą zarówno poprawić, jak i pogorszyć odpowiedź kopuł na obciążenie zewnętrzne.
3. Poziom wstępne sprężenie wpływa na rozkład obszarów niestateczności dynamicznej w kopułach tensegrity poddanych obciążeniom cyklicznym.

Poza powyższymi hipotezami badawczymi, Autorka określiła cel rozprawy doktorskiej jako zbadanie kopuł tensegrity poddanych działaniu różnych obciążeń. Jako miarę osiągnięcia celu przyjęła uzyskanie odpowiedzi na 7 pytań sformułowanych w rozdziale 1.2.

Rozprawa jest napisana w języku angielskim i liczy 155 stron. Składa się z 7 rozdziałów, spisu treści, streszczenia w języku polskim i angielskim, spisu symboli, rysunków i tabel oraz zestawienia 212 pozycji literatury. Do pracy dołączono 3 Załączniki (55 stron) zawierające procedury obliczeniowe napisane w programie Mathematica i środowisku Python.

Rozdział 1 – „Introduction” (6 stron)

We wprowadzeniu opisano przedmiot badań, którym są kopuły ciągnowo-prętowe typu tensegrity. Autorka określiła cel pracy, jej zakres oraz założenia przyjęte w rozważaniach. Przedstawiono układ i zawartość poszczególnych rozdziałów pracy.

Rozdział 2 – „Concept and application of tensegrity structures” (7 stron)

W rozdziale przedstawiono ogólną koncepcję struktur tensegrity i krótki rys historyczny, w tym pierwszych twórców i ich następców. Rozdział zawiera szczegółowy przegląd literatury dotyczącej badań nad konstrukcjami tensegrity oraz omawia aktualny stan wiedzy w zakresie analizy stateczności dynamicznej tensegrity. Autorka omówiła też temat kopuł tensegrity, opisując ich pochodzenie, historię, sposoby badania i zastosowanie w obiektach budowlanych, ilustrując rozdział zdjęciami rzeczywistych konstrukcji.

Rozdział 3 – „Geometrically nonlinear mathematical model” (4 strony)

Rozdział poświęcony jest opisowi geometrycznie nieliniowego modelu matematycznego stosowanego do analizy systemów tensegrity. Autorka podała równania równowagi dla pojedynczego elementu skończonego kratownicy tensegrity oraz dla złożonej struktury. Przedstawiony opis jest stosowany w dalszej części pracy do jakościowych i ilościowych analiz kopuł tensegrity.

Rozdział 4 – „Analysis of tensegrity structures” (10 stron)

W rozdziale przedstawiono podstawy teoretyczne jakościowej i ilościowej analizy struktur tensegrity, które wykorzystano w dalszej części pracy do oceny własności mechanicznych zaproponowanych kopuł tensegrity. Pod pojęciem analizy jakościowej Autorka rozumie identyfikację stanów samonapężenia oraz mechanizmów infinitezymalnych. Opisano dwie metody analizy, tj. analizę spektralną macierzy kratownic oraz algorytm genetyczny. Z kolei w ramach badań ilościowych przedstawiono analizy statyczne, dynamiczne oraz analizy stateczności dynamicznej. Opisano zastosowane w pracy metody oceny wpływu poziomu początkowego sprężenia na parametry statyczne (przemieszczenia, sztywność i maksymalne wyężenie struktury) i dynamiczne (częstotliwości drgań własnych i swobodnych) oraz na rozkład obszarów niestateczności w analizowanych konstrukcjach.

Rozdział 5 – „Geiger domes” (54 strony)

Jest to najobszerniejszy rozdział pracy i wraz z kolejnym rozdziałem zawiera wyniki analiz będących głównym przedmiotem rozprawy. Rozdział koncentruje się na pierwszym typie analizowanych kopuł tensegrity, tj. kopule Geigera. Na początku tej części pracy Autorka przedstawiła historię kopuły Geigera, od pierwszego pomysłu i opatentowania geometrii po najnowsze badania. W kolejnej części opisała różne warianty rozważanych kopuł, tj. kopuły w małej skali w różnych wariantach geometrycznych oraz kopuły w skali rzeczywistej – przykłady z literatury. Główną część rozdziału stanowi prezentacja wyników analizy jakościowej i ilościowej zaproponowanych konstrukcji.

Rozdział 6 – „Levy domes” (42 strony)

Rozdział ten stanowi powtórzenie rozważań zaprezentowanych w poprzednim rozdziale, ale dla kopuły Levy-ego. Na początku tej części pracy Autorka przedstawiła historię kopuły Levy-ego, od pierwszego pomysłu po najnowsze badania. W kolejnej części opisała różne warianty rozważanych kopuł, tj. kopuły w małej skali w różnych wariantach geometrycznych oraz kopuły w skali rzeczywistej – przykłady z literatury. Główną część rozdziału stanowi prezentacja wyników analizy jakościowej i ilościowej zaproponowanych konstrukcji.

Rozdział 8 – „Conclusions” (5 stron)

W rozdziale podsumowano przeprowadzone analizy i wyciągnięto wnioski.

Literatura (11 stron)

Literatura obejmuje spis 212 prac, wśród których znajdują się rozprawy doktorskie, referaty konferencyjne, książki i publikacje w czasopismach naukowych.

Załączniki (55 stron)

W załączniku przedstawiono programy napisane w środowisku Mathematica oraz Python, które dotyczą kolejno: analizy spektralnej, algorytmu genetycznego oraz analizy stateczności dynamicznej.

4. Ocena rozprawy

Trafność wyboru tematyki, postawionych hipotez i celu rozprawy

Wybór tematyki rozprawy został dokonany trafnie. Autorka zauważyła lukę w literaturze dotyczącej kopuł tensegrity, szczególnie w zakresie analizy dynamicznej tych struktur. Poprawnie sformułowała hipotezy badawcze i określiła jasny cel rozprawy. Tematyka pracy i narzędzia użyte do zrealizowania postawionych celów są poprawne, a opracowanie odzwierciedla współczesne problemy badawcze.

Zawartość i układ rozprawy

Praca jest kompletna, a jej układ jest logiczny i przejrzysty.

Uwagi krytyczne i dyskusyjne, pytania i uwagi szczegółowe

Recenzowana rozprawa stanowi częściowe powtórzenie wcześniej opublikowanych wspólnych artykułów autorstwa Maryny Solovei i Pauliny Obar. Ponadto, zastosowany przez Autorkę opis matematyczny kratownicy tensegrity oraz procedury modelu dyskretnego w zakresie teorii

II-go i III-go rzędu były zawarte w samodzielnych pracach dr hab. inż. Pauliny Obary, prof. PŚk, co utrudnia wyodrębnienie autorskiego, oryginalnego wkładu mgr inż. Maryny Solovej w recenzowaną rozprawę. Autorka nie wskazała w pracy co uznaje za swój samodzielny wkład. Należy jednak podkreślić, że w porównaniu z opublikowanymi artykułami, w przedstawionej pracy znacząco rozszerzono bazę przykładów analizowanych kopuł tensegrity, a także zaprezentowano samodzielnie opracowane oprogramowanie napisane w środowiskach Mathematica i Python, dzięki któremu Autorka nie musiała korzystać z komercyjnego oprogramowania – stanowi to ważną zaletę rozprawy.

Rozdział 1

1. We wstępie (podrozdział 1.1) Autorka używa określenia „in recent years” (podobnego typu określenia, np. „currently”, „novel solutions” pojawiają się też w dalszej części pracy) w odniesieniu do zainteresowania inżynierów i architektów konstrukcjami tensegrity, jednocześnie powołując się na wiele pozycji literatury wyraźnie wskazujących na fakt zastosowania tego typu konstrukcji znacznie wcześniej.
2. W podrozdziale 1.2 Autorka podaje założenia przyjęte w pracy. Jednym z nich jest pominięcie ciężaru własnego w analizach statycznych. Czym było podyktowane takie założenie? Czy Autorka sprawdziła jak ciężar własny wpłynąłby na otrzymane wyniki i wyciągnięte z nich wnioski? Rozważając rzeczywiste konstrukcje jakimi są kopuły tensegrity, pominięcie ciężaru własnego i jego wpływu na pracę konstrukcji wydaje się być nieuzasadnione.
3. W tym samym podrozdziale 1.2 Autorka opisuje procedury obliczeniowe wykorzystane w pracy, nie podaje jednak informacji kto jest autorem tych procedur. Nie jest jasne czy, a jeśli tak, to w jakim stopniu, zastosowane procedury są oryginalnym wkładem Autorki w rozprawę doktorską.

Rozdział 2

4. We wstępie (podrozdział 2.1)¹ Autorka prezentuje cechy konstrukcji tensegrity, skupiając się wyłącznie na zaletach tych struktur. Oczywistym jest, że jak każdy system konstrukcyjny, a tym bardziej tak nietypowy, konstrukcje tensegrity mają też szereg wad, które utrudniają ich stosowanie na szerszą skalę. Uwzględnienie w opisie zarówno pozytywnych jak i negatywnych aspektów stosowania tensegrity w budownictwie dałoby pełen obraz tego nietypowego systemu konstrukcyjnego.

Rozdział 3

5. Modele opisane w tym rozdziale nie są oryginalnymi modelami Autorki. Cały opis matematyczny elementu i struktury tensegrity, a także rys. 3.1, pochodzą z prac Pauliny Obary i Justyny Tomasik [148, 151] – wg spisu literatury. Zrozumiałe jest, że taki opis, mimo iż nie jest autorskim wkładem Doktorantki, musiał się znaleźć w rozprawie w celu pokazania podstaw teoretycznych przeprowadzonych w pracy analiz. Autorka powinna jednak wyraźnie opisać która część jest jej wkładem, np. czy oprogramowanie opisanego modelu również jest wzięte z wcześniejszych prac Promotora czy jest napisane przez Autorkę rozprawy.

Rozdział 4

6. We wstępie (podrozdział 4.1) Autorka podaje definicję i klasyfikację struktur tensegrity, powołując się na dwie prace [22, 148]. Definicja ta pojawiła się jednak po raz pierwszy w rozprawie doktorskiej dra inż. Andrzeja Kasprzaka [30], który jest autorem jej polskiej wersji.
7. W podrozdziale 4.2 Autorka opisuje zastosowane w pracy metody poszukiwania formy tensegrity, tj. analizę spektralną macierzy kratownic i algorytmy genetyczne. Brakuje jednak wyjaśnienia dlaczego akurat te dwie metody zostały wybrane, a inne odrzucone (np. bardzo często stosowana metoda FDM).
8. Opisana procedura poszukiwania formy tensegrity przy użyciu algorytmu genetycznego pochodzi z artykułu Pauliny Obary, Maryny Solovej i Justyny Tomasik [182]. Autorka nie wskazała co jest jej oryginalnym wkładem w algorytm.
9. Podobna uwaga dotyczy metod obliczeniowych opisanych w podrozdziale 4.3, zastosowanych w statycznych i dynamicznych analizach kopuł tensegrity. Czy któraś z tych metod jest oryginalną metodą opracowaną przez Autorkę? Czy oprogramowanie procedur obliczeniowych jest jej wkładem własnym?
10. W pierwszym zdaniu w podrozdziale 4.3.1 powinno chyba być „cannot” zamiast „can”.
11. Moje wątpliwości budzi stosowanie pojęcia „qualitative analysis” w odniesieniu do wyznaczania liczby mechanizmów infinitezimalnych i równoważących je stanów *self-stress* w konstrukcjach tensegrity. Ocena jakościowa kojarzy się raczej z opisem charakteru pewnych zjawisk czy zachowania się konstrukcji, a nie z tak precyzyjnymi obliczeniami matematycznymi jakimi jest np. analiza spektralna macierzy kratownic, której wynikiem są konkretne liczby, pozwalające na ilościowe porównanie między sobą różnych systemów konstrukcyjnych. Należy jednak podkreślić, że mimo wątpliwości co do przyjętej nomenklatury, przyjęty konsekwentnie w całej pracy podział na dwa typy analiz w bardzo przejrzysty sposób porządkuje przedstawione w niej rozważania.

Rozdziały 5 i 6

12. Wyniki przedstawione w rozdziałach 5 i 6 są zaprezentowane w bardzo przejrzysty, czytelny sposób. Na początku każdego przykładu obliczeniowego Autorka definiuje przedmiot analizy/porównania, a także ich cel, na końcu zaś formułuje wnioski, odnosząc się do wcześniej zdefiniowanego celu.
13. W podrozdziałach 5.2.1 i 6.2.1 Autorka prezentuje rozważane w pracy układy kopuł Geigera i Levy’ego. Ponownie zabrakło tu jasnej informacji czy proponowane rozwiązania są oryginalnymi strukturami zaprojektowanymi przez Autorkę, tym bardziej, że kilka z nich znalazło się we wcześniejszych wspólnych publikacjach Maryny Solovej i Pauliny Obary (np. kopuły z sześcioma i dwunastoma dźwigarami). Podkreślę jednak, że w porównaniu z opublikowanymi artykułami, w przedstawionej pracy znacząco rozszerzono bazę przykładów analizowanych kopuł tensegrity.
14. Na rysunku 5.3 brakuje opisu osi. Należy to uzupełnić w przypadku publikowania wyników rozprawy.
15. Nie jest dla mnie jasny cel podrozdziałów 5.2.2 i 6.2.2, w którym Autorka prezentuje rozwiązania kopuł Geigera i Levy’ego z literatury. Czytając te rozdziały, spodziewałam

- się, że kopuły te zostaną przeanalizowane i porównane z rozwiązaniami zaproponowanymi przez Autorkę, jednak nie zostały one uwzględnione w analizowanych przykładach.
16. Dlaczego Autorka rozważa kopuły o małych rozpiętościach (średnica 12 m)? Wybór małej skali byłby zrozumiały, gdyby prowadzono dodatkowo badania doświadczalne, jednak przy samych rozważaniach analitycznych można by rozważyć zastosowanie większej skali i dodatkowo, porównanie zaproponowanych rozwiązań z konstrukcjami opisanymi w podrozdziałach 5.2.2 i 6.2.2.
 17. Jaki jest cel podrozdziałów 5.3.3 i 6.3.2? Wcześniej Autorka napisała, że „The genetic algorithm (GA), can be used in cases when the existing self-stress state is not sufficient, and an appropriate set of forces must be introduced to the structure.” Czy z takim przypadkiem mamy do czynienia w przypadku analizowanych w pracy przy użyciu algorytmu genetycznego kopuł? Użycie algorytmu genetycznego wydaje się szczególnie w przypadku regularnych kopuł Geigera niezasadne i tylko komplikuje obliczenia, które jak sama Autorka pisze, w przypadku regularnych konfiguracji, mogą być przeprowadzone przy użyciu bardzo prostej i dokładnej metody polegającej na rozwiązaniu równań równowagi w węzłach (podrozdział 5.3.1).
 18. Na jakiej podstawie zostały wybrane akurat takie wartości sił: $P=1$ kN i $P=5$ kN, przyjęte w analizach statycznych?
 19. W podrozdziałach 5.4.2 i 6.4.2 Autorka przedstawiła wyniki analizy statycznej kopuł, które określiła mianem „realistic-scale”. Geometria konstrukcji została uzyskana poprzez przeskalowanie konfiguracji wcześniej rozważanych jako „small-scale” – struktury o średnicy 12 m zostały przeskalowane do średnicy 20 m. W moim odczuciu ciężko tu mówić o znaczącej zmianie skali czy też o realnych konstrukcjach. Kopuły opisane w literaturze, przedstawione w podrozdziałach 5.2.2 i 6.2.2, mają średnice rzędu 80-130 m. Ponadto kopuły określone mianem realnej skali zostały przeanalizowane pod innym typem obciążenia niż kopuły w małej skali, co znacznie utrudnia oszacowanie efektu skali czy porównanie wyników.
 20. Na rys. 5.42 brakuje opisu czarnych linii w legendzie.
 21. Rozdziały 5 i 6 Autorka zakończyła obszernym podsumowaniem, w którym przedstawiła wnioski z przeprowadzonych w pracy analiz. W rozdziale 5 udało się wskazać jedno rozwiązanie, które Autorka określiła mianem optymalnego ze względu na najmniejszy spośród analizowanych rozwiązań poziom wstępnego sprężenia i występowanie obszarów niestateczności, które zależą wyłącznie od wartości zewnętrznego obciążenia. Podsumowanie rozdziałów oceniam bardzo pozytywnie.

Rozdział 7

22. W rozdziale tym Autorka podsumowała wyniki analiz przedstawionych w pracy, odpowiadając szczegółowo na wszystkie pytania postawione we wstępie. Udowodniła, że przeprowadzone badania pozwoliły potwierdzić hipotezy zdefiniowane na początku rozprawy. Wnioski są poprawnie sformułowane i wynikają bezpośrednio z przeprowadzonych analiz. Należy stwierdzić, że Autorka zrealizowała w pełni określone na początku pracy cele i udowodniła postawione hipotezy.

23. W rozprawie nie przedstawiono jawnie kierunków dalszych badań. Autorka odniosła się jednak w pewnym sensie do tego problemu, odpowiadając na ostatnie z postawionych pytań, dotyczące wytycznych do projektowania kopuł tensegrity. Wskazała, że konieczne jest przeprowadzenie dalszych analiz, z uwzględnieniem badań eksperymentalnych i nieliniowości fizycznych materiału.
24. Jedyna krytyczna uwaga do rozdziału związana jest z pominięciem we wnioskach wyników dla konstrukcji określanych wcześniej realną skalą. Jeżeli Autorka zdecydowała się zawrzeć takie analizy w rozdziałach 5 i 6, to należałoby się odnieść do nich również we wnioskach.

Literatura

25. Autorka korzystała w pracy z rozpraw doktorskich, referatów konferencyjnych, książek i publikacji w czasopismach naukowych. Dobór i sposób wykorzystania źródeł oceniam bardzo dobrze.

Język i redakcja pracy

Praca zawiera drobne nieścisłości i błędy językowe, nie wpływa to jednak na jej wartość merytoryczną. Zaleca się stosowanie spójnej pisowni albo brytyjskiej albo amerykańskiej, a w pracy te dwie pisownie się przeplatają. Praca jest zredagowana w sposób prawidłowy, staranny, a materiał ilustracyjny jest bardzo dobrej jakości i odpowiednio dobrany do przedstawionych rozważań.

5. Podsumowanie i wniosek końcowy

Autorka recenzowanej rozprawy doktorskiej sformułowała ciekawy problem badawczy i przeprowadziła badania na wysokim poziomie naukowym. Wymagały one szerokiej wiedzy z zakresu mechaniki i matematyki, a także umiejętności posługiwania się oprogramowaniem matematycznym. Przedstawione uwagi mają w większym stopniu charakter dyskusyjny niż krytyczny i nie mają wpływu na pozytywną ocenę pracy. Autorka sformułowała i rozwiązała w sposób oryginalny postawiony problem badawczy oraz zrealizowała cele pracy.

Za oryginalne rozwiązanie problemu naukowego w przedmiotowej rozprawie doktorskiej należy uznać przeprowadzone analizy statyczne i dynamiczne zaproponowanych układów kopuł Geigera i Levy'ego, ze szczególnym uwzględnieniem oceny wpływu mechanizmów infinitesimalnych na możliwość sterowania parametrami statycznymi i dynamicznymi tych struktur, a także ocenę wpływu wstępnego sprężenia na rozkład obszarów niestateczności dynamicznej w kopułach tensegrity poddanych obciążeniom cyklicznym.

Rozprawa doktorska mgr inż. Maryny Solovej stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego i prezentuje ogólną wiedzę Doktorantki w dyscyplinie Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej.

Recenzowana rozprawa doktorska spełnia wymagania Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2023 r. poz. 742) i dlatego stawiam wniosek o dopuszczenie pracy mgr inż. Maryny Solovej do publicznej obrony oraz o ubieganie się Doktorantki o uzyskanie stopnia naukowego doktora nauk technicznych w dyscyplinie Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport.

Recenzja spełnia wymagania formalne

DYREKTOR NAUKOWY DYSCYPLINY
Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport

prof. dr hab. inż. Jerzy Wawrzeńczyk

A. Zawadzka