

dr hab. inż. Piotr Iwicki, prof. uczelni
Katedra Konstrukcji Inżynierskich
Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska
Politechnika Gdańska
ul. Narutowicza 11/12
80-233 Gdańsk
e-mail: piwicki@pg.edu.pl

Gdańsk, 03.01.2025

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Maryny Solovei
pt. „**Dynamic stability analysis of tensegrity domes**”

1. Podstawa opracowania

Podstawą opracowania recenzji jest uchwała Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport Politechniki Świętokrzyskiej nr 23/2024 z dnia 9 października 2024 r. oraz pismo Dyrektora Naukowego Dyscypliny Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport prof. dr hab. inż. Jerzego Wawrzeńczyka z dnia 15 października 2024. Do pisma została dołączona rozprawa doktorska mgr inż. Maryny Solovei pt. „Dynamic stability analysis of tensegrity domes”, której promotorem jest dr hab. inż. Paulina Obara, prof. PŚk.

2. Ogólna charakterystyka pracy

Recenzowana rozprawa dotyczy analizy stateczności dynamicznej kopuł tensegrity. Rozważania obejmują najbardziej znane kopuły tensegrity, tj. kopułę Geigera i kopułę Levy'ego. Analiza kopuł tensegrity obejmuje wpływ stanu samonapężenia na odpowiedź konstrukcji. Przeprowadzono analizy jakościowe i ilościowe kopuł tensegrity. Analizy jakościowe polegały na wyznaczeniu stanów samonapężenia i mechanizmów infimezymalnych kopuł. W ramach analiz ilościowych wykonano trzy rodzaje obliczeń, tj. analizę statyczną, analizę dynamiczną i analizę stateczności dynamicznej. Rozważono wpływ wstępnego sprężenia na parametry statyczne (przemieszczenia, sztywność i maksymalne wyężenie), parametry dynamiczne (częstotliwości drgań własnych i swobodnych), a przede wszystkim na rozkład obszarów niestateczności.

Rozprawa została napisana w języku angielskim, liczy 155 stron formatu A4 i składa się z siedmiu numerowanych rozdziałów. Pracę uzupełniają wykaz skrótów i symboli, streszczenia w języku polskim i w języku angielskim, listy rysunków i tabel, wykaz literatury i 3 załączniki liczące 35 stron. Praca zawiera 44 wzory, 93 rysunków, 37 tabel oraz 212 pozycji literatury uporządkowanych w kolejności cytowań. Rysunki i tablice są numerowane w ramach rozdziałów.

wpłynęło dnia:
2025 -01- 0 9
Data
Podpis 

3. Tematyka i zakres rozprawy

Na początku pracy umieszczono streszczenia w języku angielskim i w języku polskim oraz wykaz zastosowanych symboli i oznaczeń w kolejności pojawiania się w tekście.

Rozdział pierwszy o objętości 6 stron składa się z trzech podrozdziałów. W pierwszym przedstawiono wprowadzenie do tematyki badawczej. Opisano rozwój badanych konstrukcji zarówno z perspektywy analiz architektonicznych, jak i mechaniki konstrukcji. W podrozdziale drugim zaprezentowano cel, zakres, założenia pracy i zastosowane narzędzia badawcze. Problem badawczy obejmuje analizę zachowania kopuł tensegrity poddanych obciążeniu okresowemu. W szczególności rozważany jest wpływ początkowego poziomu naprężenia wstępnego na parametry statyczne i dynamiczne konstrukcji. Sformułowano następujące hipotezy badawcze:

1. kontrola parametrów statycznych i dynamicznych jest możliwa tylko dla kopuł tensegrity, które wykazują nieskończenie mały mechanizm (infinitesimalny),
2. modyfikacje strukturalne mogą zarówno poprawić, jak i pogorszyć reakcję kopuł na obciążenie zewnętrzne,
3. początkowy poziom naprężenia wstępnego wpływa na rozkład dynamicznych niestabilnych obszarów w kopułach tensegrity poddanych obciążeniom okresowym.

W podrozdziale trzecim opisano zawartość kolejnych rozdziałów rozprawy.

Rozdział drugi składa się z trzech podrozdziałów obejmujących łącznie 7 stron. W podrozdziale pierwszym przedstawiono ogólną ideę statyki struktur tensegrity. W podrozdziale drugim historię i ewolucję konstrukcji tensegrity. Przedstawiono przegląd literatury na temat istniejących badań nad strukturami tensegrity, a także aktualny stan wiedzy w dziedzinie dynamicznej analizy stateczności tensegrity. W podrozdziale trzecim opisano badania nad kopułami tensegrity, ich genezę, historię, sposoby obliczania i zastosowanie.

W **rozdziale trzecim** (4 strony) składającym się z trzech podrozdziałów opisano sposób modelowania struktur tensegrity. Najpierw omówiono wymagania i problemy związane z modelowaniem konstrukcji tensegrity. W podrozdziale drugim przedstawiono geometrycznie nieliniowy model teoretyczny dla pojedynczego elementu skończonego. W podrozdziale trzecim opisano równania dla złożonej struktury w ujęciu macierzowym.

Rozdział czwarty (10 stron) poświęcono przedstawieniu koncepcji jakościowych i ilościowych analiz struktur tensegrity. Rozdział składa się z trzech podrozdziałów, z których pierwszy stanowi wstęp. Podrozdział drugi jest poświęcony metodom jakościowym analiz struktur tensegrity. W dwóch częściach podrozdziału opisano metody jakościowe, tj. analizę spektralną macierzy kratownic i algorytm genetyczny. Metody jakościowe pozwalają za

identyfikację stanów naprężeń własnych (naprężeń wstępnych) i nieskończenie małych mechanizmów. W podrozdziale trzecim opisano ilościową analizę powłok tensegrity. Podrozdział ten podzielono na trzy części, w których opisano zagadnienia statyki, dynamiki i stateczności dynamicznej. Analizy te zostały wykorzystane do zbadania wpływu początkowego poziomu naprężeń na parametry statyczne (przemieszczenia, sztywność i maksymalne wyężenie konstrukcji), parametry dynamiczne (częstotliwości drgań własnych i swobodnych), a także na rozkład obszarów niestatecznych.

Rozdział piąty o objętości 54 stron, składający się z pięciu podrozdziałów, poświęcono przedstawieniu wyników analiz kopuł Geigera. Na wstępie w pierwszym podrozdziale opisano klasyfikację kopuł Geigera. W drugim zostały przedstawione charakterystyki geometryczne kopuł Geigera. Opisano własne propozycje kopuł oraz konstrukcje na podstawie literatury. W podrozdziale trzecim, podzielonym na trzy części, przedstawiono wyniki analiz jakościowych. Opisano wyniki analiz teoretycznych, analiz spektralnych macierzy kratownic tensegrity oraz wyniki obliczeń wykonanych za pomocą algorytmów genetycznych. Podrozdział czwarty dotyczący prezentacji wyników analiz ilościowych został podzielony na części poświęcone kolejno analizom statycznym kopuł w małej i w rzeczywistej skali, analizom dynamicznym i analizom stateczności dynamicznej. W podrozdziale piątym przedstawiono wnioski z przedstawionych analiz.

Rozdział szósty (41 stron) został podzielony na pięć podrozdziałów. Najpierw przedstawiono wstęp poświęcony opisowi drugiego typu analizowanych kopuł tensegrity, tj. kopuł Levy'ego. W podrozdziale drugim opisano zaproponowane rozwiązania projektowe z różnymi wariantami konstrukcji oraz rozwiązania opisane w literaturze. W podrozdziale trzecim w dwóch częściach przedstawiono wyniki przeprowadzonych analiz numerycznych w zakresie jakościowym, najpierw wyniki analiz spektralnych, a potem wyniki analiz genetycznych. W kolejnym podrozdziale zostały zaprezentowane analizy ilościowe. W kolejnych podpunktach można zapoznać się z wynikami analiz statycznych dla kopuł w małej skali i w skali rzeczywistej, a następnie wynikami analiz dynamicznych, a także wynikami obliczeń wykonanych za pomocą dynamicznych analiz stateczności. Na koniec zostały przedstawione wnioski z analiz kopuł Levy'ego.

Rozdział siódmy (5 stron) zawiera podsumowanie prowadzonych badań oraz ocenę uzyskanych wyników, wnioski i osiągnięcia badawcze pracy doktorskiej. W szczególności przedstawiono analizę wyników w świetle postawionych hipotez badawczych.

Pracę uzupełnia lista rysunków, tabel i odniesień. Praca zawiera 212 pozycji literatury w kolejności cytowań, 93 rysunki, 37 tabel i 44 wzory numerowane w ramach rozdziałów.

Szczegółowe procedury obliczeniowe, opracowane w programach Mathematica i Python, przedstawiono w 3 załącznikach. Załącznik pierwszy zawiera procedurę obliczeniową kopuły Geigera zapisaną w programie Mathematica, załącznik drugi – algorytm obliczeniowy bazujący na metodzie genetycznej napisany w programie Python, załącznik trzeci – kod procedury wyznaczania stateczności dynamicznej w programie Mathematica.

4. Ocena rozprawy

Recenzowana rozprawa doktorska dotyczy struktur tensegrity, które, oprócz ciekawych form architektonicznych, mają cechy oryginalności i innowacyjności. Z konstrukcyjnego punktu widzenia struktury tensegrity zachowują stabilność przy minimalnej liczbie elementów. W rozprawie skoncentrowano się na analizach kopuł tensegrity, w szczególności najbardziej znanych: kopuły Geigera i Levy'ego. W konstrukcjach tych mogą występować samozrównoważone układy sił wewnętrznych (wstępnego sprężenia), które stabilizują nieskończenie małe mechanizmy geometrycznej zmienności konstrukcji, tzw. mechanizmy infinitezymalne. Badano również kopuły, w których nie występowały mechanizmy infinitezymalne oraz kopuły z różnymi modyfikacjami konstrukcyjnymi, takimi jak liczba dźwigarów nośnych, sposób konstruowania górnej sekcji kopuły (zamknięta lub otwarta górna sekcja) lub zastosowanie dodatkowych kabli w kierunku obwodowym (kopuły Geigera). Ponadto w analizach kopuł uwzględniono wpływ wielkości i rozkładu obciążeń zewnętrznych.

W pracy opracowano geometrycznie nieliniowy model matematyczny zachowania się konstrukcji tensegrity. W modelu uwzględniono duże gradienty przemieszczeń, ale małe gradienty odkształceń i warunek początkowych naprężeń związanych z wprowadzeniem stanu samonapężenia. Podstawą do sformułowania równań struktur tensegrity była nieliniowa teoria sprężystości w ujęciu Total Lagrangian – TL (stacjonarny opis Lagrange'a).

Zaproponowana analiza struktur tensegrity przebiegała w dwóch etapach. Najpierw przeprowadzona została analiza jakościowa, której celem była identyfikacja cech struktury. Analiza jakościowa pozwala na właściwą klasyfikację, a w rezultacie lepsze zrozumienie pracy kopuły. Do jakościowej oceny struktur tensegrity zastosowano spektralną analizę macierzy kratownic (singular value decomposition SVD). Zidentyfikowane zostały charakterystyczne cechy kopuł tensegrity, takie jak liczba i kształt mechanizmów infinitezymalnych oraz stany samonapężenia. Do identyfikacji stanu naprężenia własnego zastosowano autorski algorytm genetyczny. Operatory genetyczne wykorzystano do naturalnej selekcji wartościowych rozwiązań, stosując mechanizmy genetyczne, takie jak selekcja, krzyżowanie i mutacja.

Drugim krokiem w analizie kopuł tensegrity było podejście ilościowe. W tym zakresie przeprowadzono analizę statyczną, analizę dynamiczną i analizę stateczności dynamicznej. Rozważono wpływ wstępnego sprężenia na parametry statyczne (przemieszczenia, sztywność i maksymalne wyężenie), parametry dynamiczne (częstotliwości drgań własnych i swobodnych), a przede wszystkim na rozkład obszarów niestateczności.

W analizie statycznej zbadano wpływ stanu samonapężenia na przemieszczenia, sztywność i współczynnik wyężenia konstrukcji. Analizę przeprowadzono przy założeniu hipotezy dużych przemieszczeń (teoria III rzędu) oraz porównano z wynikami analiz II rzędu. Zdefiniowano globalny parametr sztywności (GPS) potrzebny do miarodajnego określenia wpływu stanu samonapężenia na całkowitą sztywność struktury przy zadanym obciążeniu dla konstrukcji o wielu stopniach swobody. Wprowadzony parametr określono jako stosunek dwóch energii odkształcenia mierzonych odpowiednio przy minimalnym oraz przy i -tym poziomie stanu samonapężenia. Przeprowadzone analizy statyczne wykazały, że wpływ stanu samonapężenia na całkowitą sztywność struktury jest najbardziej znaczący przy małych wartościach sił wstępnego sprężenia oraz w konstrukcjach z mechanizmami infinitezymalnymi. W przypadku kopuł bez mechanizmów infinitezymalnych wpływ poziomu samosprężenia na odpowiedź statyczną konstrukcji był mały.

Najważniejszym zagadnieniem analizowanym w pracy było określenie wpływu stanu samonapężenia na dynamiczne właściwości struktur tensegrity. W wyniku przeprowadzonych badań stwierdzono, że wpływ stanu samonapężenia na niektóre częstotliwości drgań własnych maleje wraz ze wzrostem wartości obciążenia, podczas gdy inne częstotliwości drgań własnych są niewrażliwe na zmiany stanu samonapężenia. Stwierdzono, że liczba częstotliwości drgań własnych, które są zależne od wstępnego sprężenia, równa jest liczbie mechanizmów infinitezymalnych.

Głównym celem pracy była odpowiedź na pytanie, który typ rozwiązania konstrukcyjnego jest bardziej wrażliwy na ryzyko drgań niestatecznych. Rozważano małe drgania konstrukcji tensegrity wokół położenia równowagi statycznej pod wpływem zewnętrznego obciążenia węzłowego, którego parametr zawierał poza składową stałą P także część harmoniczną o amplitudzie P_i o różnych częstotliwościach wymuszenia. Za pomocą analizy stateczności dynamicznej zidentyfikowano częstotliwości rezonansowe obciążeń okresowych, a w konsekwencji określono obszary rezonansowe (obszary niestabilne) z uwzględnieniem wpływu wstępnego sprężenia. Przeprowadzona analiza stateczności dynamicznej wykazała, że w przypadku struktur tensegrity powierzchnia głównych obszarów niestateczności jest ściśle związana ze stanem samonapężenia. Liczba tych obszarów zależy od liczby mechanizmów.

Wykazano, że największa powierzchnia niestateczności jest przy minimalnym poziomie samonaprężenia, a wraz z jego wzrostem zakres obszarów niestateczności się zmniejsza. Wykazano, że możliwość kontroli parametrów statycznych i dynamicznych za pomocą wstępnego sprężenia jest możliwe tylko w przypadku istnienia mechanizmów infinitezimalnych.

Do najważniejszych osiągnięć Doktorantki można zaliczyć kompleksowe analizy numeryczne statyczne i dynamiczne klasycznych i zmodyfikowanych kopuł tensegrity w zakresie jakościowym i ilościowym wykonane za pomocą autorskich procedur. W pracy zawarto syntetyczne podsumowanie przeprowadzonych badań, w którym podano wyniki analiz w zależności od geometrii analizowanych konstrukcji, liczby mechanizmów infinitezimalnych i stanów samonaprężenia, a także obciążeń kopuł. Praca stanowi zwarte i spójne opracowanie umożliwiające lepsze zrozumienie pracy kopuł typu tensegrity.

Z przeprowadzonych analiz wynika, że jest możliwe projektowanie kopuł dachowych tensegrity z wykorzystaniem unikalnych i wyjątkowych właściwości konstrukcji umożliwiających sterowanie parametrami statycznymi i dynamicznymi. Przeprowadzona analiza potwierdziła postawione na wstępie hipotezy badawcze.

Doktorantka zwróciła uwagę na możliwe nowe pola zastosowań struktur tensegrity. Mogą one być wykorzystane w projektowaniu konstrukcji składalnych i w budownictwie inteligentnym do projektowania struktur charakteryzujących się takimi cechami, jak: samo-sterowanie, samodiagnoza, samonaprawa.

Część wyników badań zostało opublikowanych w czterech artykułach naukowych [124, 155, 182, 191]. Recenzowana rozprawa doktorska wpisuje się w nurt badawczy konstrukcji typu tensegrity rozwijanych pod kierunkiem dr hab. inż. Pauliny Obary, prof. PŚk. Badania mają głównie charakter teoretyczny.

W pracy brakuje pewnych aspektów praktycznych zarówno w zakresie weryfikacji doświadczalnej, jak i analiz numerycznych nośności konstrukcji. Swoje zastrzeżenia Recenzent przedstawia w poniższym wykazie uwag krytycznych, pytań i wątpliwości:

1. Większość przeprowadzonych analiz wykonano dla kopuł w małej skali. Wyniki mogą więc być przydatne do projektowania małych kopuł, na przykład konstrukcji składanych. W badaniach brakuje podobnych kompleksowych analiz konstrukcji o wymiarach większych przekryć dachowych. Czy wnioski z analiz kopuł o niewielkich wymiarach można zastosować do konstrukcji w skali rzeczywistej?
2. Czym się kierowano przy zakładaniu wartości i rozkładów obciążenia? W analizach brakuje zebrania obciążeń na podstawie norm oraz obciążeń ciężarem własnym warstw

konstrukcji kopuł. Dopiero takie analizy pozwoliłyby na uzasadnienie przyjętych rozkładów i wartości obciążeń. Normowe analizy obciążeń śniegiem lub wiatrem mogą stanowić racjonalną podstawę do przyjmowania obciążeń w symulacjach kopuł.

3. W analizie obciążenia ciężarem pokrycia zmienia się również masa pokrycia dachu. W pracy przyjmowano obciążenia siłami skupionymi bez uwzględnienia masy, co może mieć wpływ na wnioski z przeprowadzonych analiz. Nie sprawdzono wpływu dodatkowej masy związanej z pokryciem dachowym.
4. Na rys. 6.32 b-d widać przecinanie się zależności częstotliwości w funkcji poziomu samosprężenia. Czy w tym przypadku zmieniają się postacie drgań kopuły?
5. Wyniki analiz numerycznych wykonanych za pomocą autorskich procedur w programach Python lub Mathematica powinny być zweryfikowane, na przykład za pomocą obliczeń z wykorzystaniem programów komercyjnych. Czy próbowano przeprowadzić analizy statyczne lub dynamiczne przy pomocy programów komercyjnych?
6. We wnioskach pada stwierdzenie, że istniejące na świecie konstrukcje tensegrity są konstrukcjami bez mechanizmów infinitezimalnych. W tym wypadku większość zjawisk związanych z wpływem stanu samonapężenia ma mały wpływ lub nie występuje. Dlaczego zdaniem Doktorantki rzeczywiste konstrukcje nie mają mechanizmów infinitezimalnych?
7. W przykładach podano charakterystyki prętów ściskanych i ciągłych rozciąganych. Jak uwzględniano możliwość utraty stateczności prętów ściskanych?
8. W analizach nieliniowych konstrukcji istotne znaczenie mają imperfekcje, które są często zakładane w formie postaci wyboczenia lub drgań własnych konstrukcji. Czy w przeprowadzonych analizach nieliniowych brano pod uwagę imperfekcje geometryczne?
9. Rezultatem analiz dynamicznych są częstotliwości i postacie drgań własnych oraz tzw. dodatkowe postacie drgań własnych. W pracy zostały zaprezentowane postacie związane z mechanizmami infinitezimalnymi. Jak wyglądają przykładowe postacie drgań dodatkowych, niewrażliwe na zmiany stanu samonapężenia?
10. Z przeprowadzonych analiz wynika, że w kopułach tensegrity z mechanizmami infinitezimalnymi stan samonapężenia wpływa na zachowanie się struktury w zakresie statycznym i dynamicznym. Spadek stanu samonapężenia może wpływać na zagrożenie stateczności konstrukcji. W rzeczywistych strukturach ciągnowych, na przykład w mostach, z uwagi na bezpieczeństwo konstrukcji system podwieszenia

wymaga okresowych przeglądów. Kontrolowane są siły napinające ciągna, ponieważ w trakcie eksploatacji obiektu mogą zajść zmiany w układzie sił, spowodowane m.in. zjawiskami reologicznymi, osiadaniem podpór, korozją spłotów lub ich uszkodzeniami mechanicznymi lub na skutek zmian temperatury konstrukcji. Z uwagi na skomplikowany układ cięgien podobne problemy mogą występować w kopułach tensegrity, a więc mieć negatywny wpływ na bezpieczeństwo konstrukcji. Jakże jest zdanie Doktorantki na temat niekorzystnych zmian stanu samonapężenia na bezpieczeństwo konstrukcji?

5. Wniosek końcowy

Recenzowana praca wpisuje się w aktualny nurt badawczy jakim są badania stateczności dynamicznej kopuł typu tensegrity. Praca stanowi oryginalne rozwiązanie postawionego problemu naukowego. Wnioski z badań mogą być przydatne do analiz przyszłego zastosowania kopuł tensegrity w inżynierii lądowej. Niezależnie od zamieszczonych uwag krytycznych lub dyskusyjnych należy stwierdzić, że rozprawa doktorska mgr inż. Maryny Solovej pt. „Dynamic stability analysis of tensegrity domes” zawiera istotne wartości poznawcze w zakresie stateczności dynamicznej kopuł tensegrity. Stwierdzam, że opiniowana rozprawa spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim przez Ustawę z dnia 20 lipca 2018 roku „Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce” (Dz. U. z 2023, poz. 742) i stawiam wniosek o dopuszczenie Pani mgr inż. Maryny Solovej do jej publicznej obrony.



dr hab. inż. Piotr Iwicki, prof. uczelni

Recenzję przyjęto zgodnie
z umową

DYREKTOR NAUKOWY DISCYPLINY
Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport

prof. dr hab. inż. Jerzy Wawrzeńczyk