

Olsztyn, 20 grudnia 2024 r.

Prof. dr hab. inż. Leszek Małyszko

Katedra Mechaniki i Konstrukcji Budowlanych
Instytut Geodezji i Budownictwa Wydziału Geoinżynierii
Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego w Olsztynie
ul. J. Heweliusza 4, 10-724 Olsztyn

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Maryny Solovej

pt. *Dynamic stability analysis of tensegrity domes*
(Analiza stateczności dynamicznej kopuł tensegrity)

Promotor: dr hab. inż. Paulina Obara, prof. PŚk

1. Uwagi formalne

Rada Naukowa dyscypliny Inżynierii Lądowa, Geodezja i Transport Politechniki Świętokrzyskiej wyznaczyła mnie na recenzenta uchwałą z dnia 9 października 2024 roku. Stosowne dokumenty, w tym umowę na wykonanie recenzji zawartą z dyrektorem naukowym dyscypliny prof. dr. hab. inż. Jerzym Wawrzeńczykiem oraz egzemplarz rozprawy w postaci papierowej i elektronicznej otrzymałem 25 października. Podstawę prawną opracowania recenzji stanowią przepisy ustawy z dnia 20 lipca 2018 roku – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2023 r. poz. 742).

2. Charakterystyka i informacja o rozprawie

Rozprawa, napisana w języku angielskim, składa się siedmiu rozdziałów i liczy 155 stron formatu A4, w tym 11 to wykaz literatury. Zawiera jednostronicowe streszczenia w języku polskim i angielskim oraz trzy wykazy: czterostronicowy oznaczeń symboli, pięciostronicowy rysunków i dwustronicowy tablic. Kandydatka do stopnia naukowego doktora zamieściła na końcu trzy załączniki, zawierające programy obliczeniowe stworzone na potrzeby rozprawy. Załącznik A pt. *Spectral analysis of Geiger dome* to kod źródłowy programu do analizy spektralnej kopuły Geigera, napisany w środowisku *Mathematica* (14 str.). Załącznik B pt. *Genetic algorithm* to kod programu napisanego w środowisku *Python* (9 str.) według algorytmu genetycznego do określania stanu równowagi statycznej konstrukcji przy braku obciążenia, tj. w stanie samonapężenia. Załącznik C pt. *Dynamic stability analysis of Geiger dome* to kod źródłowy programu analizy stateczności dynamicznej kopuły Geigera, napisany w środowisku *Mathematica* (31 str.). Całość opracowania liczy 210 stron.

Wykaz literatury zawiera 212 pozycji z zakresu rozprawy, głównie w języku angielskim, ułożonych według kolejności cytowania w tekście. Wykaz zawiera cztery artykuły naukowe ze współautorstwem Kandydatki, opublikowane w czasopismach indeksowanych w bazie *Web of Science*. W bazie jest pięć publikacji Kandydatki z lat 2023-24, liczba cytowania bez autorskich odwołań wynosi 6, a jej *H-index* 2.

W **rozdziale 1** pt.: *Introduction* (Wprowadzenie - 6 stron, odwołania do 44 publikacji), Kandydatka przedstawiła przedmiot rozważań na podstawie literatury światowej i krajowej oraz przyjęte założenia. Sformułowała trzy hipotezy badawcze w odniesieniu do kopuł tensegrity: (1) kontrolowanie parametrów statycznych i dynamicznych jest możliwe tylko wtedy, gdy występuje w nich mechanizm infinitezymalny, (2) zmiany konstrukcyjne mogą poprawić albo pogorszyć odpowiedź na obciążenie zewnętrzne, (3) rozkład obszarów niestateczności dynamicznej pod obciążeniem okresowym zależy od poziomu wstępnego sprężenia. Chociaż dwie pierwsze hipotezy są znane, to jednak ich zbadanie w odniesieniu do wybranych kopuł jest potrzebne i celowe. Trzecia hipoteza ma największy ładunek nowości. Kandydatka określiła cel i zakres pracy, wynikający z hipotez. Ogólnym celem pracy jest zbadanie odpowiedzi kopuł pod okresowym obciążeniem dynamicznym na podstawie badań teoretycznych i symulacji numerycznych. Szczegółowe cele zostały określone w postaci siedmiu pytań, na które Kandydatka odpowiedziała w ostatnim rozdziale.

Rozdział 2 pt.: *Concept and application of tensegrity structures* (Koncepcja i zastosowanie konstrukcji tensegrity – 7 stron, 5 rysunków, odwołania do 100 publikacji) zawiera zwięzły, chociaż ogólny przegląd literatury z wyodrębnieniem aktualnych obszarów badań. Znajdują się w nich badania odpowiedzi konstrukcji w zależności od poziomu stanu samonapężenia oraz kopuły o konstrukcji tensegrity. Kandydatka przedstawiła ogólną koncepcję konstrukcji, ich historię oraz ewolucję od pomysłu do stosowania z naciskiem na kopuły prętowo-ciężnowe. Należy podkreślić, że literatura na temat konstrukcji tensegrity jest w zakresie badań różnych dyscyplin naukowych i bardzo obszerna, zatem wstrzemięźliwość Kandydatki należy tu ocenić pozytywnie.

Rozdział 3 pt.: *Geometrically nonlinear mathematical model* (Geometrycznie nieliniowy model matematyczny – 4 strony, 1 rysunek, 11 wzorów, odwołania do 7 publikacji) to opis pręta metody elementów skończonych z materiału liniowo sprężystego i z dużymi gradientami przemieszczeń. Po zaimplementowaniu do programu metody elementów skończonych został wykorzystany w symulacjach numerycznych zachowania kopuł jako kratownic przestrzennych o konstrukcji prętowo-ciężnowej w stanie samonapężenia i pod obciążeniem zewnętrznym. Kandydatka przedstawiła równania równowagi statycznej konstrukcji, które w rozprawie są stosowane w analizach jakościowych i ilościowych kopuł.

Rozdział 4 pt.: *Analysis of tensegrity structures* (Analiza konstrukcji tensegrity – 10 stron, 1 rysunek, 26 wzorów, odwołania do 22 publikacji) opisuje zwięzłe sposoby analizy tytułowych konstrukcji. Za pomocą analizy jakościowej Kandydatka identyfikuje stany samonapężenia oraz mechanizmy infinitezymalne. Wykorzystuje dwie metody: (1) analizę spektralną macierzy równań równowagi kratownicy oraz (2) algorytm genetyczny. Za pomocą analizy ilościowej ocenia wpływ poziomu samonapężenia na parametry statyczne: sztywność i wyężenie oraz na parametry dynamiczne: częstotliwości własne i swobodne. Sztywności odpowiada parametr *GSP* określony jako stosunek energii odkształcenia sprężystego konstrukcji dla dwóch poziomów stanu samonapężenia. Wyężenie konstrukcji określa parametr W_{max} odniesiony do maksymalnie wyężonego pręta jako iloraz siły do nośności. Za pomocą ilościowej analizy

stateczności dynamicznej Kandydatka bada obszary niestateczne w zakresie małych drgań liniowych wokół położenia równowagi statycznej z poziomem samonapężenia pod obciążeniem harmonicznym. Na płaszczyźnie amplitudy siły wymuszającej oraz jej częstotliwości w bezwymiarowych parametrach cyklu obciążenia, wykorzystuje parametr λ zdefiniowany jako stosunek pól obszarów niestatecznych dla dwóch poziomów stanu samonapężenia.

Rozdziały trzeci i czwarty są napisane na podstawie prac promotorki, mają charakter porządkowy i są konieczne do dalszych analiz.

Rozdział 5 pt.: *Geiger domes* (Kopuły Geigera – 57 stron, 45 rysunków, 22 tabele, odwołania do 45 publikacji) to najobszerniejszy rozdział w całej rozprawie. Poza przeglądem literatury od patentu kopuły Geigera w 1973 roku po najnowsze badania jej modyfikowanych wariantów Kandydatka zamieściła wyniki analiz jakościowych i ilościowych. Analizowała dwa zasadnicze typy kopuł o różnej liczbie dźwigarów nośnych: (typ *A*) kopuła klasyczna z dolnymi cięgnami obwodowymi i jednym stanem samonapężenia oraz kopuła z dodatkowymi cięgnami górnymi i zastrzałami o trzech stanach samonapężenia (typ *B*). Zamieściła przykłady analizy małych kopuł i w skali rzeczywistej oraz obciążonych w różnych węzłach.

Na podstawie dość obszernych symulacji numerycznych Kandydatka stwierdziła m.in., że poziom stanu samonapężenia wpływa na zachowanie kopuły Geigera, co oznacza możliwość kontrolowania jej zachowania. Jego wpływ na przemieszczenia jest nieliniowy. Odpowiedź na obciążenie zewnętrzne jest zależna od jego umiejscowienia. Kopuła jest podatna na asymetryczne obciążenie, wywołujące przemieszczenia zgodne z mechanizmami infinitezymalnymi. Dodatkowe cięgna obwodowe nie poprawiają sztywności, zatem z uwagi na dominujące obciążenie grawitacyjne kopuła klasyczna jest lepszym rozwiązaniem.

W analizie dynamicznej otrzymała m.in. nieliniową zależność między częstotliwościami drgań własnych zgodnymi z mechanizmem infinitezymalnym i poziomem samonapężenia. Wzrost poziomu wywoływał dodatkowe częstotliwości drgań własnych kopuł *A*, w odróżnieniu od kopuł *B*. Poziom stanu samonapężenia kopuł *A* wpływał liniowo także na niektóre częstotliwości drgań własnych, które nie odpowiadały mechanizmom infinitezymalnym. Częstotliwości drgań własnych kopuł *A* nie zależą od liczby dźwigarów nośnych.

Analiza stateczności dynamicznej wykazała, że obszary niestateczności kopuł *B* są większe niż kopuł *A*, dla których występują one tylko przy małym poziomie samonapężenia i maleją wraz z jego wzrostem. Liczba obszarów niestateczności zależy od liczby mechanizmów infinitezymalnych, zatem kopuły *B* mają ich więcej. Dodatkowo obszary występują blisko siebie, a niektóre z nich pokrywają się, co skutkuje większym ryzykiem wystąpienia drgań wzbudzenia. Częstotliwości rezonansowe kopuły Geigera są wrażliwe na poziom stanu samonapężenia, co wymusza wprowadzanie większych wartości naprężeń początkowych. Różne wartości i umiejscowienie obciążenia zewnętrznego powodowały zmianę minimalnego poziomu samonapężenia, za wyjątkiem zwykłej kopuły typu *B* z 6 dźwigarami nośnymi.

Przeprowadzone analizy dowiodły, że najbardziej optymalnym rozwiązaniem, w którym jest możliwy najniższy minimalny poziom naprężeń wstępnych, a obszary niestateczności zależą wyłącznie od wartości obciążenia jest kopuła opatentowana przez Geigera. W przypadku kopuł Geigera zamknięta górna część skutkuje mniejszą liczbą mechanizmów infinitezymalnych, a tym samym zmniejszeniem wrażliwości na zmianę początkowego

naprężenia wstępnego. Z kolei modyfikacja układu w postaci dodatkowych cięgien obwodowych nie wpływa na poprawę odpowiedzi statycznej konstrukcji, a może wpłynąć negatywnie na stabilność dynamiczną kopuły.

Rozdział 6 pt.: *Levy domes* (Kopuły Levy'ego – 41 stron, 41 rysunków, 14 tabel, 32 odwołania do publikacji) zawiera wyniki analiz jakościowych i ilościowych kopuł typu Levy'ego analogicznie do rozdziału poprzedniego. Kandydatka wykonała przegląd literatury wraz z rysem historycznym w zakresie geometrii i rozwiązań konstrukcyjnych kopuł. Analizowała dwa typy kopuł różniące się obecnością mechanizmu infinitezimalnego: typ *A* bez mechanizmu oraz typ *B* z modyfikacją górnej części i jednym mechanizmem z nią związanym. Zachowanie kopuł Levy'ego jest odmienne od kopuł Geigera. Reakcja konstrukcji kopuły Levy'ego na obciążenie zewnętrzne w dużym stopniu zależy od obecności mechanizmu. Kopuła *A* zachowuje się jak tradycyjna konstrukcja prętowa, a poziom stanu samonapężenia ma niewielki wpływ na parametry statyczne. Kopuła *B* zachowuje się podobnie do kopuły Geigera, niemniej jednak wpływ poziomu stanu samonapężenia jest znacznie mniejszy.

Z analizy dynamicznej wynika, że wartości częstotliwości drgań własnych kopuł *A* nie są związane z liczbą dźwigarów nośnych konstrukcji, a wpływ poziomu stanu samonapężenia jest niewielki. Wartości częstotliwości drgań własnych kopuł *B* w dużym stopniu zależą od liczby dźwigarów nośnych, a wpływ stanu samonapężenia jest duży i nieliniowy. W kopułach *B* pojawiają się dodatkowe częstotliwości drgań własnych, zależne od stanu samonapężenia. Częstotliwości własne kopuł *A* nie zależą ani od poziomu stanu samonapężenia, ani od wartości obciążenia lub jego umiejscowienia, w odróżnieniu od kopuł *B*.

Z dynamicznej analizy stateczności wynika, że niestateczne obszary występują tylko dla kopuły *B* i są zależne od położenia obciążenia. Kopuła *A* jest niewrażliwa na zmianę zmian częstotliwości rezonansowych i jest mniej wrażliwa na warunki obciążenia zewnętrznego.

Wyniki analiz pokazują, że możliwe jest kontrolowanie zachowania kopuły *B* za pomocą poziomu stanu samonapężenia, chociaż wymaga to wyższej wartości.

Rozdział 7 pt.: *Conclusions* (Wnioski – 5 stron, 1 tabela) to podsumowanie pracy, w którym Kandydatka przedstawiła główne wnioski i osiągnięcia. Zamieściła odpowiedzi na pytania szczegółowe z rozdziału pierwszego, które otrzymała w trakcie analiz, opisanych w rozdziałach piątym i szóstym.

W trakcie czytania tekstu rozprawy pojawiają się pytania, które zdaniem recenzenta wymagają wyjaśnienia lub komentarza i mogą mieć wpływ na kierunek dalszych badań. Nie obniżają one pozytywnej oceny rozprawy.

Do oceny wpływu poziomu samonapężenia na parametry statyczne wykorzystywany jest globalny parametr sztywności *GPS* zależny od energii odkształcenia sprężystego konstrukcji mierzonej według wzoru jak dla liniowej zależności między siłami a przemieszczeniami.

(1) Z uwagi na nieliniowość geometryczną, zależność między przemieszczeniami konstrukcji a poziomem samonapężenia powinna być nieliniowa. Jak można oszacować wpływ nieliniowości na sztywność?

(2) Parametr *GPS* odnosi się do jednego stanu samonapężenia. W jaki sposób jest wyznaczany, jeśli konstrukcja ma ich więcej?

Za pomocą analizy stateczności dynamicznej Kandydatka bada obszary niestateczne wykorzystując parametr λ zdefiniowany dla jednego stanu samonapężenia.

(3) Jak wyznaczany jest parametr λ , jeśli konstrukcja ma więcej stanów samonapężenia?

Ocena wpływu poziomu samonapężenia na wyężenie konstrukcji przeprowadzana jest za pomocą parametru W_{max} pod obciążeniem statycznym.

(4) Czy na podstawie wykonanych obliczeń konstrukcji pod obciążeniem dynamicznym jest możliwe wyznaczenie wyężenia statyczno-dynamicznego, np. z uwzględnieniem zmęczenia?

3. Ocena rozprawy

Kandydatka podjęła istotny temat badawczy z zakresu mechaniki konstrukcji tensegrity. Przyjęte metody badawcze są zgodne z aktualnym stanem wiedzy oraz na dobrym poziomie naukowym. Na podstawie obszernych obliczeń numerycznych za pomocą programów własnego autorstwa, wykonała analizę dwóch najbardziej znanych kopuł tensegrity, kopuły Geigera i kopuły Levy'ego w zakresie wpływu poziomu stanu samonapężenia na parametry statyczne konstrukcji, ich sztywność i wyężenie oraz na parametry dynamiczne, częstotliwości drgań i na rozkład obszarów niestateczności dynamicznej. Osiągnęła istotny cel badawczy i potwierdziła sformułowane hipotezy.

Należy docenić decyzję Kandydatki o udostępnieniu w załącznikach kodów źródłowych programów obliczeniowych, wykorzystywanych w rozprawie.

Do oryginalnych osiągnięć badawczych Kandydatki można zaliczyć:

- opracowanie programów umożliwiających analizę statyczną i dynamiczną kopuł tensegrity metodą elementów skończonych jako geometrycznie nieliniowych układów prętowo-ciężnowych, w tym z wykorzystaniem algorytmu genetycznego;
- wykonanie symulacji numerycznych w zakresie wpływu poziomu stanu samonapężenia na parametry statyczne i dynamiczne kopuł, w tym na rozkład obszarów niestateczności dynamicznej.

4. Podsumowanie

Rozprawa Pani mgr Maryny Solovej stanowi oryginalne rozwiązanie problemów naukowych w zakresie dyscypliny Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport. Kandydatka zaprezentowała ogólną wiedzę teoretyczną i odpowiedni warsztat naukowy, zwłaszcza w badaniach numerycznych. Wykazała się umiejętnością prowadzenia pracy naukowej. W moim przekonaniu rozprawa spełnia w wystarczającym stopniu wszystkie wymagania stawiane rozprawom doktorskim według obowiązującej ustawy o stopniach naukowych wraz z jej uaktualnieniami.

Wnioskuję o jej przyjęcie i dopuszczenie do publicznej obrony.

*Recenzję myślałam zgodną
z wyrażeniem*

Lenek Marynko

DYREKTOR NAUKOWY DYSCYPLINY
Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport

prof. dr hab. inż. Jerzy Wawrzeńczyk