

Prof. dr hab. inż. Wojciech Gilewski  
Instytut Inżynierii Budowlanej  
Wydział Inżynierii Lądowej  
Politechnika Warszawska

e-mail: [wojciech.gilewski@pw.edu.pl](mailto:wojciech.gilewski@pw.edu.pl)

Warszawa, 21 lipca 2023

## Opinia

o pracy doktorskiej mgr inż. Justyny Tomasiak

pt. „ANALIZA PARAMETRYCZNA DWUWARSTWOWYCH KRATOWNIC TYPU TENSEGRITY –  
MODEL DYSKRETNY I KONTYNUALNY”

wykonanej pod kierunkiem  
dr hab. inż. Pauliny Obary, prof. PŚk

### Podstawa opracowania

Podstawą do wykonania recenzji jest pismo Dyrektora Naukowego Dyscypliny Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport, prof. dra hab. inż. Jerzego Wawrzeńczyka z dnia 10 maja 2023 r. i Uchwała Nr 7/2023 Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport Politechniki Świętokrzyskiej z dnia 26 kwietnia 2023 r.

### Ogólna charakterystyka dysertacji

Recenzowana rozprawa dotyczy ciekawego zagadnienia opisu własności mechanicznych dwuwarstwowych konstrukcji typu tensegrity, ograniczonych dwiema płaszczyznami, które można określić mianem struktur typu płytowego. Praca ma charakter teoretyczno-numeryczny i zawiera obszerny materiał który pochodzi z badań własnych Autorki. Symulacje wykonano za pomocą dwóch modeli: dyskretnego (w zakresie teorii III-go i II-go rzędu) i kontynualnego.

Rozprawa składa się z 8 rozdziałów (288 stron), spisu treści, streszczenia w języku polskim i angielskim oraz zestawienia 281 pozycji literatury. Rozprawa napisana jest w języku polskim. Do pracy dołączono Załącznik (58 stron) w postaci procedur obliczeniowych napisanych w programie *Mathematica*.

### Treść rozprawy

*Rozdział 1 – Wstęp – 4 strony*

We wprowadzeniu określono przedmiot rozważań jako konstrukcje ciągnowo-prętowe typu tensegrity. Autorka określiła cel pracy, jej zakres oraz założenia przyjęte w rozważaniach. Przedstawiono układ i zawartość poszczególnych rozdziałów pracy.



## *Rozdział 2 – Dwuwarstwowe kratownice typu tensegrity – 24 strony*

W rozdziale przedstawiono krótko rys historyczny tensegrity, a następnie omówiono podstawowe struktury i moduły tensegrity. Dokładniejszy i metodyczny opis dotyczy struktur dwuwarstwowych ograniczonych dwiema płaszczyznami – tzw. płyt typu tensegrity. Zwrócono uwagę na nieliczne prace w tym zakresie, które dotyczą struktur powłokowych, tzn. ograniczonych dwiema powierzchniami.

## *Rozdział 3 – Charakterystyczne cechy struktur tensegrity – 22 strony*

W części pierwszej rozdziału uzupełniono rozważania z rozdziału poprzedniego opis znanych w literaturze definicji oraz metod poszukiwania form strukturalnych (ang. *form finding*). W części drugiej przedstawiono matematyczny model dyskretny opisu kratownic według teorii II rzędu i przedstawiono wybrane sposoby identyfikacji charakterystycznych dla tensegrity stanów samorównoważnych sił podłużnych i mechanizmów infinitezimalnych. Umożliwiło to przedstawienie ogólnej definicji struktur tensegrity i typu-tensegrity. Rozdział uzupełniają przykłady ilustrujące przedstawioną definicję.

## *Rozdział 4 – Model matematyczny struktur tensegrity – 27 stron*

Po wprowadzeniu literaturowym przedstawiono szczegółowy opis matematycznego modelu struktur tensegrity według nieliniowej geometrycznej teorii III rzędu. W kolejnej części opisano sformułowanie według sześcioparametrowej teorii powłok w ograniczeniu do struktur płaskich. Podano dwa przykłady prostych rozwiązań analitycznych w postaci zamkniętej. Ostatnia część rozdziału dotyczy opisu kontynualnego struktur tensegrity na bazie liniowej teorii sprężystości oraz teorii gradientowej. W omawianym rozdziale tym samym opisano szczegółowo narzędzia wykorzystywane do symulacji numerycznych zawartych w rozprawie.

## *Rozdział 5 – Jakościowa ocena konstrukcji – 66 stron*

W obszernym rozdziale zastosowano techniki identyfikacji cech struktur tensegrity (przedstawione w Rozdziale 3) do oceny 5 modułów i 19 struktur płytowych. Przeprowadzona analiza pozwala jakościowo ocenić, czy rozważana struktura spełnia, a jeśli tak, to w jakim stopniu cechy wykorzystywanej w pracy definicji tensegrity.

## *Rozdział 6 – Ilościowa ocena konstrukcji – 95 stron*

Najobszerniejszy rozdział pracy, w którym przeprowadzono symulacje parametryczne modułów i struktur tensegrity ocenianych jakościowo w rozdziale poprzednim. Przedmiotem analiz były wybrane przemieszczenia, globalny parametr sztywności i wyężenie elementów. Obliczenia przeprowadzono według teorii III rzędu, za pomocą autorskich programów napisanych w środowisku *Mathematica*.

## *Rozdział 7 – Weryfikacja modelu kontynualnego – 9 stron*

Rozdział zawiera 4 przykłady zastosowania modelu kontynualnego liniowego i gradientowego.

## *Rozdział 8 – Podsumowanie – 4 strony*

W rozdziale podsumowano przeprowadzone analizy, wyciągnięto wnioski i określono dalsze kierunki badań.

## *Literatura – 21 stron*

Literatura obejmuje spis 281 prac, wśród których odnaleźć można raporty z badań, rozprawy doktorskie, referaty konferencyjne, książki i publikacje w czasopismach naukowych.



Załącznik – Procedury obliczeniowe – 58 stron

W załączniku przedstawiono autorskie programy napisane w środowisku *Mathematica*, które dotyczą kolejno: analiz spektralnych, teorii II i III rzędu w opisie dyskretnym, model kontynualny oraz przykłady rozwiązań zamkniętych ugięć płyty swobodnie podparte i pasma płytowego.

## Ocena rozprawy i uwagi krytyczne

### Uwagi wstępne

Recenzowana praca jest w znacznej mierze kompilacją wcześniej opublikowanych przez Justynę Tomasik i Paulinę Obarę wspólnych artykułów. Artykuły opublikowane po angielsku w rozprawie prezentowane są po polsku, z zachowaniem struktury wzorów i rysunków. Rzutuje to negatywnie na spójność opisu, w tym spójność oznaczeń oraz sposób wyciągania wniosków. Ponadto opis matematyczny i oprogramowanie procedur nieliniowego modelu dyskretnego jest tożsame z opublikowanymi samodzielnymi pracami dr hab. inż. Pauliny Obary, co znacznie utrudnia identyfikację autorskiego, oryginalnego wkładu mgr inż. Justyny Tomasik w napisanie rozprawy. Autorka nie napisała w pracy co uważa za samodzielny wkład. Podstawy teoretyczne modelu kontynualnego bazują z kolei na pracach innych autorów i publikacji własnej. W przedstawionej do recenzji pracy, w porównaniu z opublikowanymi artykułami, znacznie rozszerzono bazę przykładów do analiz parametrycznych, oraz przedstawiono samodzielnie opracowane (lub samodzielnie modyfikowane) oprogramowanie napisane w środowisku *Mathematica*. Umożliwiło to nie korzystanie z oprogramowania komercyjnego, co stanowi istotną zaletę rozprawy. Podkreślę jednak po raz drugi, że szkoda iż Autorka nie podkreśliła swoich oryginalnych osiągnięć w tekście rozprawy.

### Ocena trafności wyboru tematyki

Wybór tematyki rozprawy został dokonany trafnie. Tematyka rozprawy i narzędzia zastosowane do zrealizowania jej celów są poprawne, a opracowanie jest na poziomie wiedzy współczesnej.

### Zawartość i układ rozprawy

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

### Ocena pracy; uwagi krytyczne i dyskusyjne; pytania; uwagi szczegółowe

W Rozdziale 1, w podrozdziale Przedmiot rozważań Autorka przedstawiła jedynie krótko koncepcję tensegrity, ale nie uzasadniła podjęcia tematu np. brakiem odpowiednich studiów w literaturze lub wyzwaniami konstrukcyjnymi. Takiego uzasadnienia nie znajdziemy także w dalszych opisach literatury przedmiotu.

W podrozdziale Cel, zakres, założenia napisano, iż „Zasadniczym celem pracy jest statyczna analiza parametryczna dwuwarstwowych kratownic typu tensegrity z wykorzystaniem



podejścia dyskretnego i kontynualnego”. Celem rozprawy doktorskiej nie może być „analiza” - jest to bowiem metoda badawcza, która może (powinna) pozwolić na rozwiązanie problemu badawczego. Metoda ta polega na wyodrębnieniu z danej całości (którą jest struktura tensegrity) jej elementów (wybranych parametrów) i badaniu każdego z nich osobno. Tak też zrobiono w recenzowanej pracy.

Zdaniem recenzenta celem pracy jest: ocena jakościowa i ilościowa wpływu wybranych parametrów na własności mechaniczne dwuwarstwowych kratownic typu tensegrity. Taki też mógłby być tytuł rozprawy.

Opisując zakres pracy Autorka pomieszała zagadnienia znane i wyzwania jakie przedstawiła sobie w rozprawie. Zbudowanie nieliniowego modelu dyskretnego oraz modelu kontynualnego to zagadnienia znane, które w pracy wykorzystano jako narzędzie do realizacji problemu badawczego. Postawionym problemem badawczym jest natomiast ocena jakościowa wybranych struktur ciągnowo-prętowych z punktu widzenia cech tensegrity, oraz ocena ilościowa wpływu wstępnego sprężenia (i innych parametrów) na przemieszczenia konstrukcji, jej nośność i sztywność (nazwana oceną ilościową).

Tak postawiony cel i zakres pracy należy uznać za poprawny.

Pozytywnie ocenić należy precyzyjne zdefiniowanie przez Autorkę założeń przyjętych w pracy. Recenzent nie rozumie jednak założenia 6, które mówi, że nieciągłość elementów ściskanych powoduje, że nie są one narażone na duże obciążenia wyboczeniowe – zapewne stwierdzenie takie należy dokładnie uzasadnić. Ponadto w matematycznym modelu dyskretnym kratownic występują przemieszczenia węzłów – co zatem Autorka ma na myśli w ostatnim z założeń, pisząc o dużych gradientach przemieszczeń ?

Str. 12, wiersz 12 od dołu – zamiast „... na zadaniu zachowania ...” powinno być „... na zbadaniu zachowania ...”

Rozdział 2 – Dwuwarstwowe kratownice tensegrity obejmuje na wstępie autorski rys historyczny oraz opis podstawowych modułów tensegrity. Grupowe cytowanie literatury na str. 20 jest niepotrzebne i nic nie wnosi do pracy. Zasadniczą częścią rozdziału jest opis tzw. płyt tensegrity, zawarty w podrozdziale 2.4. Opis ten jest wyczerpujący w zakresie struktur zawartych między dwoma płaszczyznami. W przekonaniu recenzenta do rozdziału niepotrzebnie wpleciono struktury typu powłokowego (zawarte między dwoma powierzchniami) – str. 28, 33, 34 i 37, które nie stanowią przedmiotu pracy. Szczególne wątpliwości budzi modelowanie geometryczne w programie *Grasshopper*, przedstawione na rys. 2.27 – struktury te, interesujące architektoniczne nie mają najważniejszych cech tensegrity, tzn. mechanizmów infinytezymalnych stabilizowanych przez samorównoważne układy sił podłużnych. Przedstawiony opis powinien być uzupełniony o spostrzeżenia, które mogłyby stanowić ważne uzasadnienie podjęcia tematu rozprawy, w szczególności jej celu naukowego. Reasumując, z przedstawionej analizy literatury nie wynika konieczność i celowość podjęcia badań zrealizowanych w opiniowanej pracy.



We wprowadzeniu do Rozdziału 3 – Charakterystyczne cechy struktur tensegrity – przywołano opisy cech, które w literaturze uznawane są jako typowe dla tensegrity. Wskazano analizę spektralną macierzy kratownic, jako wybór techniki określania cech immanentnych tensegrity. Przedstawiony w podpunkcie 3.2 opis matematyczny ma na celu wyprowadzenie macierzy wykorzystywanych w podpunkcie 3.3 do identyfikacji stanów samorównoważnych sił podłużnych i mechanizmów.

Opis ten jest jednak niespójny – na stronie 41 Autorka wskazuje wykorzystanie metody elementów skończonych (MES), podając dwie pozycje literatury, na stronie 42 podaje (bez powołania się na źródła) równania algebraiczne teorii I rzędu kratownic, sugerując, że macierz wydłużeń  $\mathbf{B}$  należy wyznaczać za pomocą typowego dla MES wzoru (3.5), a następnie na str. 43 podaje MES-owski wzór na macierz sztywności geometrycznej (3.8). Gwoli ścisłości wszystkie wzory w podrozdziale 3.2 można wyprowadzić w sposób czysto algebraiczny (bez wykorzystania MES), lub zgodnie z formalizmem MES, co jednak wymagałoby wprowadzenia po kolei wszystkich pojęć tej metody, począwszy od macierzy funkcji kształtu. Mieszanie tych dwóch sformułowań jest, zdaniem recenzenta, nieeleganckie matematycznie.

Podane w podrozdziale 3.2 macierze służą Autorce do przedstawienia w podrozdziale 3.3 (bez dowodów lub powołania się na konkretne pozycje literatury) technik identyfikowania samorównoważnych układów sił podłużnych i mechanizmów skończonych lub infinitezymalnych. Rozważania poprzedzono podaniem klasycznych wzorów Maxwella. Techniki te są potrzebne do podania znanej w literaturze klasyfikacji struktur tensegrity (Tabela 3.1-str. 47), która z kolei stanowi podstawę analizy jakościowej wykorzystywanej w dalszej części pracy.

Elementarne przykłady zamieszczone w podrozdziale 3.5 nie wnoszą do pracy nic twórczego i mogą być pominięte bez szkody dla wartości rozprawy. Przykłady zawierają pewne nieścisłości – np. na rys. 3.2 nie przedstawiono graficznej interpretacji wektora wydłużeń (3.13), co czytamy w podpisie; obiekt (3.18) powinien być macierzą jednokolumnową; macierze (3.19) nie są, jak napisano, wektorami własnymi – wektory te znajdują się natomiast w kolumnach macierzy (3.19); w jakim celu podano dwie wersje wzorów (3.19), oraz odpowiednich rysunków, skoro powszechnie wiadomo, że wektory własne są określone z dokładnością do znaku; podając wzór (3.36) nie zdefiniowano macierzy sprężystości  $\mathbf{E}$ . Wymienione powyżej nieścisłości powtarzają się w całym podrozdziale. Dlaczego do podrozdziału tego wybrano aż 4 konstrukcje, które nie są tensegrity, a tylko jedną o cechach tensegrity klasy 2 ?

Rozdział 4 rozprawy nosi tytuł Model matematyczny struktur tensegrity. Rozdział ten w zakresie podpunktów 4.1 i 4.2 bazuje na rozprawie habilitacyjnej P. Obarę [175], co jednak nie zostało podane w pracy. Prezentowany tu model dyskretny jest w pełni geometrycznie nieliniowy (III rzędu), co odróżnia go od teorii II rzędu opisanej w podpunkcie 3.2. Zdaniem recenzenta lepszym rozwiązaniem byłaby sekwencja odwrotna, w której teoria II rzędu byłaby szczególnym przypadkiem teorii III rzędu. Pozwoliłoby to także uniknąć wspomnianych wcześniej niespójności opisu w podpunkcie 3.2. Przywołanie w rozprawie rozważań zawartych



w pracy [175] nie jest błędem, gdyż na ich podstawie zbudowane zostały autorskie programy komputerowe, ale nie powołanie się na pracę [175] należy już uznać za niedopatrzenie.

Podrozdział 4.3 nosi tytuł Sześcioparametrowa teoria powłok, choć dotyczy tylko struktur płaskich. Struktury takie, w języku klasycznej mechaniki, nazywamy tarczownicami. Podrozdział ten zawiera błędy, które wymagają wyjaśnienia.

1. Wyrażenie macierzowe (4.30) jest błędne, o ile prawdą jest (co napisano w rozprawie), że pochodzi z wyrażenia (4.29) przez pominięcie naprężeń normalnych po grubości tarczownicy.
2. Opis wyników zamieszczonych w podpunkcie 4.3.3 jest bardzo nieprecyzyjny. Brak jest rysunków, komentarza i odwołania do pozycji literatury z której rozwiązania pochodzą. Przykład 1 dotyczy płyty swobodnie podpartej obciążonej tzw. górką sinusoidalną (4.76). Otrzymane rozwiązanie jest w postaci zamkniętej (4.77), (4.78). Nieprawdziwe jest zatem stwierdzenie zawarte w pracy, że mamy do czynienia z obciążeniem równomiernie rozłożonym  $p$ .

Zdaniem recenzenta przedstawianie w ocenianym rozdziale rozwiniętej postaci zwięzłych równań w zapisie wskaźnikowym (Tabele 4.1-4.6) jest niepotrzebne i nic wartościowego do pracy nie wnosi.

Opis modelu kontynualnego zawarty w Rozdziale 4.4 bazuje na pracy [64] i został opublikowany w nie cytowanej pracy: P.Obara, J. Tomasik, Validation of the continuum orthotropic model of tensegrity beam-like and plate-like structures, Archives of Mechanics, 2023. Niestety zarówno oceniany rozdział rozprawy, jak i wspomniana publikacja zawierają liczne błędy:

1. We wzorach (4.83)-(4.84) nie zdefiniowano wielkości  $r$ ,  $p$  i  $q$ . Są to zapewne obrotowe ruchy sztywne oznaczone na str. 85 literami greckimi „fi”.
2. Na str. 84 napisano, że „W opisie wykorzystano zapis wskaźnikowy”. O którym opisie mowa – w podrozdziale 4.4 nie wykorzystuje się zapisu wskaźnikowego.
3. Brak w tekście wyraźnego wskazania, że opisywany model dotyczy teorii II rzędu – zdaniem recenzenta założenie takie wymaga wyjaśnienia, zwłaszcza, że w pierwszej części rozdziału 4 opisywana jest teoria III rzędu.
4. Wzór (4.87) – nie zdefiniowano macierzy transformacji  $T_1$ .
5. Nie zdefiniowano macierzy transformacji  $T_2$ .
6. Wzór (4.89) jest błędny.
7. Wyjaśnienia wymaga uwzględnianie lub pomijanie w opisie wydłużeń w kierunku  $z$  – por. wzór (4.84) i opis pod wzorem (4.90), oraz komentowane wcześniej wyrażenie (4.30).
8. Nie zdefiniowano macierzy transformacji  $T_3$ .
9. Wzór (4.91) jest błędny.
10. Wzór (4.93) jest błędny – zamiast macierzy transponowanej powinna być macierz odwrotna.
11. Uzasadnienia wymaga sens dokonywania kondensacji statycznej, której wynikiem jest wzór (4.93). Kondensuje się niewiadome w układzie równań – opis czwartej transformacji zawarty poniżej wzoru (4.92) jest nieprecyzyjny i wymaga korekty.



W załączniku do pracy zamieszczono opis procedury *Mathematica*, która bazuje na oryginalnej pracy [64] i zapewne jest napisana prawidłowo. Zaciekawienie recenzenta budzi jednak angielski opis czwartej transformacji (str. 48 załącznika). Opis pochodzi z Wikipedii, ale dlaczego jest w rozprawie w języku angielskim i dlaczego pojawił się w załączniku? Dlaczego w tekście rozprawy i cytowanej poniżej pracy nie uwzględniono tego opisu. Być może stanowiłby on przyczynek do wzmiankowanego koniecznego uzasadnienia punktu 11.

Przedstawione w dalszej części rozprawy przykłady nie rozwiewają przedstawionych powyżej wątpliwości, a wręcz je pogłębiają, o czym będzie mowa w ocenie Rozdziału 7.

W Rozdziale 5 przedstawiono jakościową ocenę analizowanych konstrukcji, co oznacza zbadanie czy obiekt spełnia i w jakim stopniu reguły przedstawionej w Tabeli 3.1 klasyfikacji. Rozdział ten stanowi istotne i wartościowe rozszerzenie wcześniej opublikowanych w pracy [180] wyników. Przedstawiono tu nie tylko obszerną analizę parametryczną, ale dokonano oceny uzyskanych wyników, przez co zrealizowano znaczną część celu rozprawy, w rozumieniu przedstawionym na początku tego rozdziału recenzji. Recenzent ma następujące uwagi krytyczne do Rozdziału 5:

1. Autorka używa skrótu SVD, co zapewne oznacza Singular Value Decomposition. Rozkład ten nie jest jednak wzmiankowany w żadnym miejscu rozprawy. Podobnie nie wyjaśniono oznaczeń  $\mathbf{H}$ ,  $\mathbf{L}$ ,  $\mathbf{K}_{T1}$ ,  $\mathbf{O}$ ,  $\mathbf{x}$ . Symbolu  $\mathbf{L}$  użyto na stronie 75 w innym kontekście. Oznaczenia te pochodzą z pracy Autorki i Pani Promotor [180], gdzie znaleźć można część prezentowanych tu wyników.
2. W rozprawie nie wyjaśniono jaką w obliczeniach macierzy  $\mathbf{O}$  przyjęto macierz stałych sprężystych  $\mathbf{E}$  i jako poziom sił samorównoważnych. Niemożliwe jest tym samym powtórzenie obliczeń Autorki.
3. Moduł Expanded Octahedron powinien być zwymiarowany także na Rys. 5.13. Z rysunku nie wiadomo, jaki jest rozstaw zastrzałów w każdym z trzech kierunków. Nie rozważano też różnych rozstawów zastrzałów.
4. Zdaniem recenzenta analiza jakościowa i cechy pojedynczych modułów tensegrity są znane w literaturze i nie wnoszą nic nowego do rozprawy.
5. W ocenianym rozdziale Autorka używa określenia „nieustabilizowany mechanizm”, nie wyjaśniając co to oznacza. W odniesieniu do mechanizmów w literaturze stosuje się raczej określenia „skończony, ang. *finite*” lub „infinitesimalny, ang. *infinitesimal*”.

Rozdział 6 dotyczy ilościowej oceny analizowanych konstrukcji. Podobnie jak w rozdziale poprzednim znajdziemy tu istotne i wartościowe rozszerzenie wcześniej opublikowanych w pracy [181] wyników. Przedstawiono także obszerną ilościową analizę parametryczną, w tym szczególnie wartościową analizę wpływu rodzaju warunków brzegowych na wyniki, oraz dokonano oceny uzyskanych wyników. Zrealizowano tym samym kolejną znaczną część celu pracy, w rozumieniu przedstawionym na początku tego rozdziału recenzji. Recenzent ma następujące uwagi krytyczne do Rozdziału 6:

1. Szkoda, że nie narysowano obciążenia i warunków podparcia pojedynczych modułów, co znacznie ułatwiłoby czytanie rozdziału.



2. Wprowadzenie przedstawione na str. 155 jest błędne i nie dotyczy analizy ilościowej. W szczególności wzory (6.1) i (6.2) dotyczą zupełnie innych zagadnień.
3. Wzór (6.3) wymaga objaśnienia, co oznaczają indeksy „i”, „j”, oraz dlaczego znajdują się na różnych poziomach.
4. Na str. 155 Autorka używa określenia „stateczność”, podczas gdy na str. 248 innego terminu „stabilność”. W żadnym miejscu pracy nie znajdziemy wyjaśnienia, jak rozumiane są te określenia i czy oznaczają różne zjawiska. Stwierdzenie ze str. 155, że stateczność rozumiana jest jako dodatnia określoność „odpowiedniej macierzy sztywności” nie wyjaśnia wątpliwości, a nawet je pogłębia. Która macierz sztywności jest odpowiednia, a która odpowiednia nie jest? Zdaniem recenzenta w rozprawie brakuje głębokiego wyjaśnienia zagadnienia stateczności stanów równowagi rozważanych konstrukcji. Recenzent jest przy tym przekonany, że w obliczeniach Autorka kontroluje zachowanie stateczności analizowanych konstrukcji.
5. Wyjaśnienia, lub powołania się na odpowiednią literaturę, wymaga wybór wskaźników, które podlegają ocenie ilościowej: wybranego przemieszczenia, globalnego parametru sztywności GPS i wyężenia elementów W-max. Dlaczego użyto tych, a nie innych wskaźników?
6. Niezrozumiałe, a wydaje się, że błędne są dwa zdania akapitu 3, podrozdział 6.7, str. 247, zaczynające się od słów „W przypadku konstrukcji ...”.
7. Zdaniem recenzenta głębszych studiów wymaga ocena wyników gdy występuje kilka lub kilkanaście stanów samorównoważnych sił podłużnych. Różne solvery zagadnienia własnego mogą generować różne wektory własne i ich interpretacja może być trudna i niejednoznaczna. Autorka sygnalizuje ten problem na str. 247.
8. Na str. 248 Autorka używa określenia „stabilność konstrukcji”. Określenie to nie zostało zdefiniowane w rozprawie, w szczególności nie wiadomo, czym się różni od terminu „stateczność”?

Rozdział 7 nosi tytuł Weryfikacja modelu kontynualnego, zawiera 4 przykłady i składa się z nieco ponad 8 stron. Choć w tytule pracy model kontynualny jest wymieniony obok modelu dyskretnego, jako jedno z dwóch narzędzi analizy, to jednak udział tych narzędzi w treści rozprawy nie jest jednakowy. Trudno jest ocenić rozdział 7, ponieważ jest to jedynie wprowadzenie do modelowania kontynualnego, co zresztą zauważa Autorka w Podsumowaniu na str. 256. Pełna weryfikacja tego modelu to jeszcze bardzo daleka droga. Recenzent ma następujące uwagi krytyczne i wątpliwości do ocenianego rozdziału:

1. Moduł pierwszej analizowanej struktury (Rys. 7.1) nie jest tensegrity, jednak wykazuje kilka stanów samorównoważnych sił podłużnych (np. w „kratach X” na każdej ze ścian). Nie jest zatem prawdziwe stwierdzenie zawarte w drugim wierszu od dołu na str. 249 rozprawy.



2. Jeśli w modelu dyskretnym w zadaniu z Rys. 7.1 c,d przyjęto obciążenie równomiernie rozłożone (co napisano na str. 250), to porównywanie wyników z rozwiązaniem zamkniętym od „górk sinusoidalnej” (str. 251) jest nieuprawnione.
3. Dlaczego macierz (7.1) ma wymiar  $5 \times 5$ ? Sugeruje to przyjęcie założeń, których nie opisano w pracy. Jeśli wykorzystano macierz w postaci (4.30), to we wcześniejszym fragmencie recenzji wskazano, że wzór ten jest błędny. Jeśli zrobiono inaczej, to należało to opisać w pracy.
4. Zdaniem recenzenta współczynniki super-modułu z Rys. 7.3, opisane wzorami (7.2) są błędne i powinny zależeć od poziomu sił samorównoważnych. Ponownie wyjaśnienia wymaga wymiar macierzy (tak, jak w punkcie powyżej). Dlatego też trudno jest ocenić wpływ zastosowania pełnej procedury na wyniki liczbowe (Rys. 7.4 i wzory (7.3)). Tym bardziej nie sposób ocenić poprawność wyników zawartych na Rys. 7.7.
5. Pozostaje ważna i nie wyjaśniona za pomocą przykładów uwaga 11 recenzji dotycząca punktu 4.4, tzn. teoretycznych podstaw modelu.

Reasumując, recenzent jest zdania, że zastosowanie modelu kontynualnego do oceny własności mechanicznych tensegrity wymaga oddzielnych i dogłębnie przemyślanych badań. Rozważania rozdziału 7 i 4.4 nie wnoszą dodatkowych wartości do opiniowanej rozprawy i mogłyby być pominięte bez wpływu na pozytywny wniosek końcowy recenzji.

Rozdział 8 nosi tytuł Podsumowanie i, oprócz podsumowania, zawiera także wnioski i wskazanie kierunków dalszych prac. Sprecyzowane na str. 261-262 wnioski potwierdzają sugestię recenzenta, że celem pracy była ocena własności mechanicznych struktur tensegrity. Recenzent zgadza się z wnioskami dotyczącymi modelu dyskretnego. Próby wyciągania wniosków na podstawie wyników z modelu kontynualnego uważam za przedwczesne, co zauważa chyba też Autorka na końcu wniosku nr.8.

Kierunki dalszych badań wskazano może nieco na wyrost i zbyt ogólnie.

Bogata Bibliografia opracowana jest bez należytej precyzji podawania źródła. W bardzo wielu pozycjach pominięto numery stron, numery woluminów lub zeszytów, a nawet wszystkie szczegóły cytowanego źródła (np. nr. [19]). Bardzo utrudnia to studiowanie rozprawy i zmusza czytelnika do żmudnego poszukiwania cytowanych publikacji, zgodnie z zasadą „znajdź sobie sam”.

Pracę uzupełnia wartościowy Załącznik – Procedury obliczeniowe. Załącznik pokazuje ogrom pracy, który włożyła Autorka w przygotowania własnych programów obliczeniowych w środowisku *Mathematica*. Procedury te, w zakresie analizy spektralnej i modeli dyskretnych, stanowią autorską wersję programów źródłowych opracowanych przez Panią dr hab. inż. Paulinę Obarę przy pisaniu monografii habilitacyjnej [175]. Szkoda, że Doktorantka nie opisała, w jakim stopniu programy te uległy modyfikacjom lub ulepszeniom. Pozwoliłoby to bardziej precyzyjnie określić jej wkład własny.



Zagadką dla recenzenta pozostaje anglojęzyczny „wikipedyczny” komentarz na str. 48, wspomniany wcześniej w recenzji.

### Język i redakcja pracy

Praca zawiera pewne drobne nieścisłości i błędy językowe, co nie wpływa na wartość rozprawy. Recenzent zaleca, aby unikać w tekście określeń: „w oparciu” – str. 81 i „stworzonych” – str. 262. Pozostawmy oparcie krzesłom i fotelom, a stwarzanie Stwórcy. Literatura cytowana jest w pracy poprzez podanie nazwisk autorów i roku publikacji. Taki sposób cytowania nie jest uzasadniony gdy wykorzystywane publikacje są ponumerowane, a tak jest w opiniowanej rozprawie.

### Wniosek końcowy

Pomimo przedstawionych powyżej uwag krytycznych należy stwierdzić, że Autorka recenzowanej rozprawy doktorskiej przeprowadziła badania na wysokim poziomie naukowym. Wymagały one szerokiej wiedzy, a także umiejętności.

Autorka rozwiązała w sposób oryginalny postawiony problem badawczy. Próbę włączenia do oceny modelu kontynualnego tensegrity recenzent uważa za przedwczesną i niepotrzebną.

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

Recenzja zgodna z wymogami recenzji  
W. Głencki

DYREKTOR NAUKOWY DYSCYPLINY  
Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport

prof. dr hab. inż. Jerzy Wawrzeńczyk