

dr hab. inż. Paulina Obara, prof. PŚk  
Katedra Teorii Konstrukcji i BIM  
Wydział Budownictwa i Architektury  
Politechnika Świętokrzyska  
Al. Tysiąclecia Państwa Polskiego 7  
25-314 Kielce  
tel. 606-145-610  
e-mail: paula@tu.kielce.pl

Kielce, 11.09.2023

  
DZIEKAN  
Wydziału Inżynierii Lądowej  
prof. dr hab. inż. Andrzej Garbacz

WPEŁNYŁO

15.09.2023

501 / 2023

## RECENZJA DYSERTACJI DOKTORSKIEJ

mgra inż. Andrzeja Rutkiewicza

### „EKSPERYMENTALNE I NUMERYCZNE BADANIA KONSTRUKCJI TENSEGRITY W PROJEKTOWANIU WIEŻ”

#### 1. Podstawa formalna

Podstawę opracowania recenzji stanowi Uchwała nr 712/2023 Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport Politechniki Warszawskiej z dnia 06.06.2023.

Podstawę prawną niniejszej recenzji stanowi art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce.

#### 2. Podstawowe dane o pracy

Przedmiotem oceny jest rozprawa doktorska mgra inż. Andrzeja Rutkiewicza pt. „Eksperymentalne i numeryczne badania konstrukcji tensegrity w projektowaniu wież”. Promotorem pracy doktorskiej jest prof. dr hab. inż. Leszek Małyszko.

Rozprawa doktorska została napisana w języku polskim i została opublikowana w formie wydawnictwa książkowego, zgodnie z wymaganiami publikacyjnymi Oficyny Wydawniczej Politechniki Warszawskiej. Praca liczy 180 stron i składa się z 5 rozdziałów, spisu literatury (118 pozycji), spisu rysunków (96 rysunków) oraz spisu tabel (50 tabel). Dopełnieniem pracy są streszczenia w języku polskim i angielskim, umieszczone na początku rozprawy, wykaz ważniejszych oznaczeń, umieszczony przed pierwszym rozdziałem, oraz dwa załączniki (7 stron), umieszczone na końcu rozprawy.

#### 3. Ogólna charakterystyka pracy

Dysertację otwiera **Wprowadzenie** (19 stron, 9 rysunków), składające się z 4-ech podrozdziałów, w których Doktorant przedstawił podstawowe informacje dotyczące idei, rozwoju, zastosowania, definicji i nazewnictwa struktur tensegrity. Ponadto, Doktorant przedstawił geometrię podstawowego modułu tensegrity, tzw. modułu Simplex, który w całej rozprawie nazywany jest modułem T3. Istotną częścią tego rozdziału jest wskazanie szeregu zagadnień stanowiących trudności, a zarazem wyzwanie, w projektowaniu konstrukcji tensegrity. Analiza tych zagadnień posłużyła Doktorantowi do określenia celu pracy oraz do sformułowania głównej tezy rozprawy doktorskiej, tj.: „*Możliwe jest efektywne projektowanie optymalnej konstrukcji wieży tensegrity za pomocą algorytmów wykorzystujących metody gęstości sił i elementów skończonych wspomaganych własnymi implementacjami w znanym środowisku oprogramowania*”. Rozdział pierwszy kończy się określeniem zakresu pracy oraz

przedstawieniem głównych zadań służących do osiągnięcia założonego celu naukowego, a tym samym do potwierdzenia lub zaprzeczenia postawionej tezie.

**Rozdział 2** (45 stron, 44 rysunki, 6 tabel, 6 wzorów (w tym jeden wzór z rozdziału 3-go)) składa się z 4-ech podrozdziałów, które dotyczą badań eksperymentalnych konstrukcji tensegrity pod obciążeniem statycznym i dynamicznym. Doktorant opisał program badań oraz maszyny i urządzenia, które zostały użyte do badań. Zdefiniował również modele badawcze i podał wyniki przeprowadzonych badań. W tym rozdziale została również przeprowadzona dyskusja związana z porównaniem wyników teoretycznych i eksperymentalnych.

W mojej ocenie przeprowadzone przez Doktoranta badania eksperymentalne są bardzo interesujące i wartościowe. Niestety sposób opisu badań i przedstawienia wyników budzi pewne zastrzeżenia. Szczegółowe uwagi i pytania zostaną przedstawione w punkcie 5.2 recenzji.

**Rozdział 3** (49 stron, 27 rysunków, 24 tabele, 75 wzorów) składa się z 4-ech podrozdziałów, które dotyczą badań analityczno-numerycznych. Doktorant opisał program tych badań oraz metody użyte do ich przeprowadzenia. Zdefiniował również modele matematyczne, które obejmują modele jednomodułowe T3: jedno-, dwu- i trójparametrowe oraz modele pięciomodułowe, zbudowane z różnych podstawowych modułów tensegrity. W rozdziale wykonano symulacje numeryczne i dokonano analizy porównawczej. Dodatkowo, przeprowadzono optymalizację modułu tensegrity T3 w zakresie minimalizacji masy.

Przeprowadzone przez Doktoranta symulacje numeryczne są bardzo interesujące. Niestety, tak jak w przypadku rozdziału 2, sposób przedstawienia wyników budzi pewne zastrzeżenia. Szczegółowe uwagi i pytania zostaną przedstawione w punkcie 5.3 recenzji.

**Rozdział 4** (30 stron, 16 rysunków, 16 tabel, 39 wzorów (w tym 3 wzory z rozdziału 3-go)) składa się z 5-ciu podrozdziałów, które dotyczą projektowania wieży widokowej typu tensegrity. Ten rozdział ma charakter praktyczny, stanowiący swojego rodzaju klamrę obejmującą badania eksperymentalne i numeryczne. Co najważniejsze, badania przeprowadzone w tym rozdziale potwierdzają postawioną przez Doktoranta tezę, że *„możliwe jest efektywne projektowanie optymalnej konstrukcji wieży tensegrity za pomocą algorytmów wykorzystujących metody gęstości sił i elementów skończonych wspomaganymi własnymi implementacjami w znanym środowisku oprogramowania”*.

**Rozdział 5** (3 strony) stanowi zwięzłe podsumowanie pracy, w tym najważniejsze wnioski oraz kierunki dalszych badań, zarówno w zakresie badań eksperymentalnych jak i numerycznych. Pracę kończy spis literatury obejmujący książki, artykuły naukowe, normy projektowe, instrukcje oprogramowania oraz strony internetowe. Dobór pozycji bibliograficznych jest trafny i wystarczający.

Po zapoznaniu się z rozprawą doktorską stwierdzam, że praca mgr inż. Andrzeja Rutkiewicza jest bardzo ciekawym i wartościowym opracowaniem łączącym badania doświadczalne z analizą analityczno-numeryczną. Dodatkowym atutem pracy jest aspekt praktyczny, obejmujący zaprojektowanie konstrukcji wieży typu tensegrity, co, biorąc pod uwagę charakter konstrukcji, stanowi duże wyzwanie. Metodyka zrealizowanych badań nie budzi zastrzeżeń. Bardzo pozytywnie oceniam samą ideę i tematykę dysertacji, gdyż dotyczy bardzo ważnego zagadnienia, dotyczącego implementacji idei tensegrity do rozwiązań konstrukcyjnych stosowanych w budownictwie. Realizacja założonego przez Doktoranta celu naukowego dostarczyła oryginalnych wyników, charakteryzujących się dużą wartością poznawczą, niezbędnych do przeprowadzenia procesu projektowania wieży typu tensegrity.

Należy podkreślić, że rozprawa napisana jest poprawną polszczyzną, językiem prostym i zrozumiałym. Nieliczne błędy językowe i stylistyczne nie obniżają naukowo-praktycznych

walorów rozprawy i nie wpływają na ocenę merytoryczną. Niestety przyjęty układ i sposób uporządkowania treści w przekonaniu recenzentki nie jest czytelny. Dyskusja związana z porównaniem wyników teoretycznych i eksperymentalnych powinna mieć miejsce dopiero po przeprowadzeniu obu rodzajów rozważań. Doktorant mógł też przyłożyć większą wagę do prezentacji graficznej. Szczegółowe uwagi dotyczące powyższych zastrzeżeń zamieszczono w punkcie 5 (Ocena merytoryczna rozprawy) niniejszej recenzji.

#### **4. Ocena trafności wyboru tematyki i naukowej wartości rozprawy**

Podjęta w recenzowanej rozprawie doktorskiej tematyka jest aktualna i ważna zarówno z poznawczego jak i z praktycznego punktu widzenia. Praca dotyczy badania zachowania się konstrukcji tensegrity pod obciążeniem statycznym i dynamicznym. Specyfika tych struktur polega na tym, że ich geometryczna forma jest ściśle powiązana z układem sił w konstrukcji, a występujące w nich stany samonapężenia stabilizują istniejące nieskończone małe mechanizmy (mechanizmy infinytezymalne). Trudności w analizie zachowania się układów tensegrity pod wpływem obciążeń związane są w szczególności z określeniem wpływu poziomego stanu samonapężenia na przemieszczenia, wyężenie, sztywność oraz na drgania konstrukcji. Przeprowadzone w pracy badania mają charakter eksperymentalny, analityczno-numeryczny i praktyczny. Takie podejście jest kompleksowe, a uzyskane wyniki i wnioski pozwalają na potwierdzenie postawionej przez Doktoranta tezy. Należy podkreślić, że przeprowadzone badania uzupełniają brakujące eksperymenty w literaturze i prezentują postęp w procesie przejścia z rozważań teoretycznych o strukturach tensegrity do praktycznych realizacji w budownictwie.

Do najważniejszych oryginalnych osiągnięć Doktoranta w zakresie recenzowanej pracy można zaliczyć:

1. Zbudowanie autorskich narzędzi numerycznych (programy napisane w środowisku *Matlab®*), które zostały wykorzystane do analizy struktur tensegrity.
2. Przeprowadzenie analiz parametrycznych (eksperymentalnych i numerycznych) obejmujących określenie wpływu poziomego stanu samonapężenia na parametry statyczne i dynamiczne struktur tensegrity.
3. Zbudowane zmodyfikowanego modułu tensegrity, będącego podstawą do projektowania układów nośnych wież
4. Zbudowane autorskiego algorytmu służącego do optymalnego projektowania konstrukcji typu tensegrity pod obciążeniem statycznym oraz obciążeniem sprężającym.

Chciałam w tym miejscu nadmienić, że bardzo wysoko oceniam nakład pracy, którą Doktorant włożył w przeprowadzenie badań.

Biorąc pod uwagę powyższe osiągnięcia Doktoranta stwierdzam, że założony cel pracy został osiągnięty i w związku z tym pozytywnie oceniam naukową wartość recenzowanej rozprawy.

#### **5. Ocena merytoryczna rozprawy**

Podczas lektury i analizy wyników przedstawionych w recenzowanej rozprawie doktorskiej nasuwają się pewne pytania i uwagi krytyczne, wymagające doprecyzowania lub skomentowania przez Doktoranta.

##### **5.1. Rozdział 1**

1. Rozdział pierwszy jest „wprowadzeniem”, ale znajdujemy w nim dość dużo informacji na temat struktur tensegrity. W związku z czym brakuje mi w tym rozdziale wyjaśnienia czym jest „stan samonapężenia” i „mechanizm infinytezymalny”.

2. W drugim akapicie rozdziału (str. 13) czytamy: „*Wszyscy odkrywcy opatentowali koncepcje modułów typu T3 w zbliżonym czasie tj. w latach 1959-1965 (rys. 1.1)*”. Nie ma wyjaśnienia co to jest „*moduł typu T3*” – objaśnienie znajdujemy dopiero na str. 17 i 21.
3. Na stronie 14 czytamy: „*Liczba realizacji konstrukcji tensegrity w budownictwie lądowym nie jest zbyt duża, chociaż świadomość inżynierów o ich potencjale ciągle wzrasta. Liczba realizacji w inżynierii lądowej jest niewielka, przykładowo można wymienić Most Kurlipa (rys. 1.2b, [Strona int.1])*”. Most Kurlipa nie jest konstrukcją tensegrity, most ten posiada jedynie część cech tensegrity, co udowodnił w pracy doktorskiej dr inż. Andrzej Kasprzak [Kasprzak, 2014], na którą notabene Doktorant powołuje się na stronie 16.
4. „*Na koniec dokonano analizy częstotliwości i drgań własnych wieży oraz analizy parametrycznej*” (str. 31) – co obejmuje analiza parametryczna? Czy analiza drgań własnych w zależności od poziomu stanu samonapężenia nie zalicza się do analizy parametrycznej?

## 5.2. Rozdział 2

1. Program badań eksperymentalnych (Tabela 2.1) powinien znajdować się na końcu rozdziału 2.1, po zdefiniowaniu modeli badawczych. Ponadto, modelami badawczymi (zgodnie z Tabelą 2.1) są również zastrzały, więc powinny być opisane w części „*Modele badawcze*” (str. 36-38). Przyjęty sposób opisu badań eksperymentalnych jest nieczytelny. Zdecydowanie lepiej byłoby, gdyby Doktorant najpierw określił co bada i po co, a następnie czym, tj.:

- 2.1.1. Modele badawcze
- 2.1.2. Program badań eksperymentalnych
- 2.1.3. Maszyny i urządzenia

2. Modele badawcze.

Na stronie 36, w opisie „*Modela badawcze*” czytamy: „*Zbudowano trzy typy modeli badawczych podstawowego modułu tensegrity T3*”:

- typ I – dwa moduły T3 o różnych wysokościach z poliamidowymi cięgnami,
- typ II – dwa moduły T3 o różnych zastrzałach ze stalowymi cięgnami, nazwane modułami A i B,
- typ III – wieża zbudowana z trzech modułów T3.

Wieży nie poddano badaniom eksperymentalnym (o czym Doktorant pisze na str. 38). Niezrozumiałym jest wobec tego uwzględnienie jej w tym miejscu rozprawy (w rozdziale „*Badania eksperymentalne*”). Ponadto, nie opisano jakiego rodzaju są zastrzały i jakich użyto cięgien. Niezrozumiałym jest również plan badań eksperymentalnych (Tabela 2.1), w którym podano, że dla modelu wieży mierzonymi wartościami są „*przyspieszenia, siła wymuszająca – określenie częstotliwości i postaci drgań oraz liczby tłumienia*”.

Rozdział 2.2.2 zatytułowany jest „*Moduł T3*”, a obejmuje tylko analizę modułów T3 typu II, przy czym w planie badań eksperymentalnych (Tabela 2.1) uwzględniono również moduły typu I.

Podsumowując, zarówno opis modeli badawczych jak i opis programu badań eksperymentalnych jest bardzo nieczytelny. Tak naprawdę w rozprawie przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych dla zastrzałów typu A i B oraz dla modułu tensegrity T3 typu A i B. W przypadku modeli typu I i III podano jedynie literaturę, w której znajdują się wyniki badań. Jest to dość nietypowe podejście, gdyż ocenie podlega przedłożona przez Doktoranta rozprawa doktorska a nie cykl publikacji.

3. W rozdziale „*2.2. Statyczne testy ściskania*” znajdziemy wyniki dla jednoosiowego rozciągania (str. 42-43). Dlaczego?

4. Czym był podyktowany dobór poziomów wstępnego sprężenia w prowadzonych testach statycznych (Tabela 2.5)? Dlaczego w badaniach parametrów dynamicznych (Tabela 2.6) przyjęto inne poziomy wstępnego sprężenia? Dlaczego w badaniach parametrów dynamicznych przyjęto różne liczby poziomów dla modeli A i B? Jaka jest jednostka przyjętego wstępnego sprężenia?
5. Czy wartości sił krytycznych dla zastrzałów są poprawne? Dla zastrzałów typu B podano (str. 41) „ $P_E=4332 \text{ kN}$ ”, a dla typu A „ $P_E=56\ 444 \text{ kN}$ ”. Ponadto, na stronie 41 czytamy: „*Silę krytyczną zastrzałów A obliczono na podstawie danych zawartych w tabeli 2.5*” – w tabeli 2.5 podane są poziomy sprężenia. Z kolei na stronie 49 jest napisane: „*W tym celu, obliczono charakterystyczną nośność na wyobczenie zastrzału modułu A równą: oraz modułu B równą:  $N_{b,Rk} = 4,40 \text{ kN}$* ” – brakuje informacji o nośności zastrzału modułu A, a nośność zastrzału modułu B jest równa  $0,001P_E$ .
6. Na jakim poziomie wstępnego sprężenia zastrzały w modelu B ulegają wyobczeniu?
7. Należy wyjaśnić dlaczego „*Dla poziomu 6-tego test modułu B został przerwany przy przemieszczeniu około 3,5 mm*” (str. 45) (na rysunku 2.15 praktycznie nie widać wykresu dla B6), a tym samym dlaczego na rys. 2.16 porównywano poziomy A5 i B5.
8. Na rys. 2.21 znajduje się więcej wykresów niż wynika to z legendy. Czy uwzględniono wszystkie poziomy sprężenia?
9. Jak należy rozumieć ostatni wniosek na str. 52: „*rysunek 2.22 może sugerować, że możliwe jest określenie obciążenia modułu bazując na odległościach zastrzałów od siebie*”?
10. Dyskusja związana z porównaniem wyników teoretycznych i eksperymentalnych (str. 53, 72) powinna mieć miejsce dopiero po rozważaniach teoretycznych. Dziwnym wydaje się podejście porównywania czegoś co jeszcze nie zostało wyjaśnione. Analiza wyników jest niemożliwa bez zapoznania się z rozdziałem 3 (przykładowo legenda na rys. 2.24-2.26, tj. 1-par, 2-par, 3-par, oznacza odpowiednio model jedno- dwu i trójparametrowy, a tego wyjaśnienia nie ma w tekście na stronach 53-56). Może należało najpierw przedstawić badania numeryczne? Niespotykanym jest również powoływanie się na wzory, które dopiero będą wprowadzone w kolejnych rozdziałach (str. 72 – po wzorze (2.3) mamy wzór (3.27), a następnie wzór (2.4)).
11. Dlaczego na rysunkach 2.15-2.17 oś wartości zaczyna się od 800 N, skoro początkowe obciążenie zewnętrzne wynosi 1000 N (str. 44)?
12. Legenda na wykresach w większości przypadków mogłaby być uproszczona, dzięki czemu wykresy byłyby bardziej czytelne, np. rys. 2.9 – jest: „ $S4:wm(wm/P)$ ” – a wystarczyłoby „ $S4$ ”, bo pozostała część legendy to opis osi.
13. Rys. 2.9 – Po co opis linii trendu na wykresie, jeśli są one przedstawione w tekście, zwłaszcza, że funkcje te przedstawione są z różną dokładnością?
14. Podpisy rysunków są zbyt ogólne, co utrudnia analizę wykresów. Ponadto, wykresy 2.32-2.35 są nieczytelne.
15. Dodatkowym utrudnieniem w czytaniu tego rozdziału jest niespójność nazewnictwa, przykładowo: str. 32 „*moduł A, moduł B*”, str. 36 „*wariant A, wariant B*”, str. 37 „*moduły stalowe A i B*”, str. 44 „*modele stalowe modułów T3 typu A i B*”, str. 58 „*model A, model B*”, str. 59 „*moduł niepodatny (1 wers na stronie), model podatny (podpis rys. 2.29)*”, str. 50 „*moduł smukły*” – w odniesieniu do modelu z zastrzałami typu B.

### 5.3. Rozdział 3

1. Dlaczego w tym rozdziale zastosowano inne oznaczenia niż w rozdziale 2? Przykładowo: długość zastrzału –  $b$  (w rozdziale 2 –  $L$ ), siła Eulera –  $P_{cr}$  (w rozdziale 2 –  $P_E$ ).



2. Na stronie 80 czytamy: „*Ramię można wyznaczyć korzystając ze znanego wzoru na odległość prostej od punktu wykorzystując współrzędne podane we wzorze (3.3)*” – wzór (3.3) określa graniczną wartość sztywności podpory  $k_{lim}$ .
3. Na stronie 79 pomiędzy wzór (3.3) a (3.4) wprowadzono wzór (3.24), w którym nie objaśniono wszystkich symboli, np.  $r$ ,  $s$ . Informacje na temat tych parametrów odnajdziemy dopiero na stronie 85.
4. We wzorze (3.42) macierz  $\mathbf{K}_E$  opisana jest jako „*macierz sztywności materiałowej systemu*”. Skąd taka nazwa?
5. W jaki sposób są podparte pojedyncze moduły i wieże opisywane w rozdziale 3.3.2? Sposób podparcia ma wpływ na liczbę stanów samonapężenia.

#### 5.4. Rozdział 4

1. Jak zbudowany jest moduł D6? – str. 126: „*w module podstawowym wprowadzamy dodatkowe trzy cięgna ukośne*”; str. 127: „*Moduł D6 ma większą sztywność i dwukrotnie więcej zastrzałów niż T3*”.
2. Czy moduły przedstawione na rys. 4.2 są właściwie podpisane?
3. Co to znaczy „*dolny moduł D3*” (rys. 4.3)?
4. W tabeli 4.3 przedstawiono m.in. wektor sił w stanie samonapężenia modułu D6. Dlaczego w zastrzałach występują siły dodatnie, a w cięgnach ujemne?
5. Jaka jest klasyfikacja modułu D3 i wieży/modułu 2D6?
6. Na stronie 155 czytamy: „*wykonane obliczenia statyczne wieży 2D6 pozwalają przedstawić następujące wnioski*”. Wnioskiem jest jedynie pierwszy podpunkt. Ponadto, trzy przedostatnie podpunkty dotyczą podsumowania analizy dynamicznej nie statycznej.

#### 6. Uwagi redakcyjne i edytorskie

- Używanie określenia pręt do opisu cięgna jest błędne. Moduł T3 składa się z 12 elementów, w tym 3 zastrzałów (prętów) i 12 cięgien. Jeśli mowa jest o wszystkich składowych konstrukcji to powinno się używać określenia „elementy” a nie „pręty”. Doktorant te dwa określenia stosuje naprzemiennie.
- Stan „*samo-napężenia*” (str. 15, 16, 24, 74) czy „*samonapężenia*” (str. 23, 27, 31, 106)?
- Między wartością liczbową a literowym oznaczeniem miary, stawiamy spację, natomiast między wartością liczbową a oznaczeniem miary za pomocą symbolu spacji nie stawiamy. Poprawny zapis to zatem: np. 5% – praktycznie w całej pracy zasada ta nie jest stosowana.
- Brakuje konsekwencji w oznaczaniu zmiennych na rysunkach (raz styl normalny, raz kursywa, np. rys. 2.11 (normalny), rys. 2.18 (kursywa)). Oznaczenia zmiennych powinny być spójne – takie same we wzorach, w tekście i na rysunkach.
- Różne oznaczenia zmiennych, np. str. 40 – wzór (2.10 –  $w_m$  a na rys. 2.9”  $w_{max}$ ”; str. 41 – wzór (2.2) – „ $L$ ”, na rys. 2.10 „ $l$ ”, a w tekście „ $l$ ”.
- Różne wielkości czcionek na rysunkach (rys. 3.1) – czasami bardzo małe, co za tym idzie nieczytelne (rys. 2.32, 2.33...).
- Różny styl opisu tabel, przykładowo: „*Tabela 3.5*” (str. 105) „*Tab. 3.7*” (str. 106).
- Powtórzenia:
  - „*Zakres pracy obejmuje pięć rozdziałów, dwa dodatki, a także bibliografię i spis oznaczeń, tabel i rysunków*” (str. 30),
  - „*Całość rozprawy uzupełniona jest dwoma dodatkami, spisem literatury i ważniejszych oznaczeń, a także spisem tabel i rysunków*” (str. 31),
  - Macierz jednostkowa opisywana jest na stronach: 99, 101, 141.
- Przykładowe błędy słowne i językowe:

- „przy pomocy algorytmów generycznych”(str. 5) – powinno być: przy pomocy algorytmów genetycznych,
- „przeгляд powstałych wież” (str. 27) – proponuję: przegląd istniejących wież,
- „zbudowanie narzędzi numerycznych służących do analiz i projektowania konstrukcji tensegrity oraz ich dogłębne zrozumienie” (str. 30) – proponuję: zbudowanie narzędzi numerycznych służących do analiz i projektowania konstrukcji tensegrity oraz do dogłębnego zrozumienia tych konstrukcji,
- „pozioma reakcja sprężyny” (str. 79) – proponuję: pozioma reakcja podpory/więzi sprężystej,
- „do analizy statyki”(str. 107, 110, 113, 116, 119) – proponuję: „do analizy statycznej”.
- Co oznaczają następujące sformułowania:
  - „kompletna wieża” (str. 5),
  - „Polska definicja tensegrity” (str. 16),
  - „W pracy pod obciążeniem zewnętrznym w ogólności należy uwzględnić nieliniowość geometryczną” (str. 23),
  - „Eurokod stalowy” (str. 25),
  - „elementy badawcze zawierające zastrzały o różnych przekrojach” (str. 32),
  - „ $s_n, l_n$  są długościami naturalnymi” (str. 79),
  - „sztywności kratownicowe” (str. 85),
  - „Podłużne siły prętowe pod obciążeniem oraz ich wyężenie zestawia tabela” (str. 107, 110, 113, 116, 119).

## 7. Wniosek końcowy

Podsumowując stwierdzam, że recenzowana rozprawa doktorska stanowi rozwiązanie oryginalnego zagadnienia naukowego i wnosi znaczący wkład w rozwój wiedzy w dyscyplinie „inżynieria lądowa, geodezja i transport”. Praca zakończona jest bardzo istotnymi wnioskami dotyczącymi projektowania wież tensegrity. Z treści rozprawy wynika, że Doktorant właściwie sprecyzował cel pracy oraz konsekwentnie go zrealizował. Doktorant wykazał się bardzo dobrą znajomością aktualnego stanu wiedzy w zakresie podjętej tematyki, umiejętnościami programowania i prowadzenia badań analityczno-numerycznych i eksperymentalnych. Zrealizował obszerny zakres tych badań, otrzymał oryginalne wyniki, przeanalizował je, krytycznie ocenił i sformułował poprawne wnioski. Świadczy to o bardzo dobrym przygotowaniu i predyspozycjach Doktoranta do samodzielnego prowadzenia prac naukowo-badawczych.

Uwagi krytyczne wymienione w punktach 5 i 6 nie obniżają dobrego, moim zdaniem, poziomu merytorycznego i ogólnej dobrej oceny dysertacji. Rozprawa jest bardzo interesująca zarówno z naukowego jak i z praktycznego punktu.

Biorąc powyższe pod uwagę stwierdzam, że recenzowana rozprawa doktorska autorstwa mgr inż. Andrzeja Rutkiewicza pt. „Eksperymentalne i numeryczne badania konstrukcji tensegrity w projektowaniu wież”, spełnia wymogi stawiane pracom doktorskim zawartych w ustawie. W związku z tym stawiam wniosek o przyjęcie rozprawy i dopuszczenie jej do publicznej obrony przed Radą Naukową Dyscypliny Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport Politechniki Warszawskiej.

*Paulina Obara*

Paulina Obara