

dr hab. inż. Jacek Szafran, prof. PŁ
Katedra Mechaniki Konstrukcji
Wydział Budownictwa, Architektury i Inżynierii Środowiska
Politechnika Łódzka, Al. Politechniki 6, 90-924 Łódź
email: jacek.szafran@p.lodz.pl

WPLYNEŁO
Data 31.08.2023
L. Dr. H. Pr. / 457 / 2023

Przyjęto 05/08/2023
DZIEKAN
Wydziału Inżynierii Łądowej
prof. dr hab. inż. Andrzej Garbacz
Łódź, 22 sierpnia 2023 r.

RECENZJA DYSERTACJI DOKTORSKIEJ
mgra inż. Andrzeja Rutkiewicza
„EKSPERYMENTALNE I NUMERYCZNE BADANIA KONSTRUKCJI
TENSEGRITY W PROJEKTOWANIU WIEŻ”

1. Podstawa formalna

Formalną podstawę opracowania recenzji stanowi pismo z dnia 19 czerwca 2023 roku Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Łądowa, Geodezja i Transport Politechniki Warszawskiej podpisane przez Przewodniczącego Rady Naukowej w/w Dyscypliny dra hab. inż. Konrada Lewczuka, prof. uczelni, który zwraca się z prośbą o przyjęcie przeze mnie obowiązków recenzenta rozprawy doktorskiej Pana mgra inż. Andrzeja Rutkiewicza.

Merytoryczną podstawę opracowania recenzji stanowi załączona do ww. pisma rozprawa doktorska Pana mgra inż. Andrzeja Rutkiewicza.

Prawną podstawę opracowania recenzji stanowią obowiązujące przepisy Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce i wymagania określone w art.187 tej Ustawy.

2. Sylwetka doktoranta

Mgr inż. Andrzej Rutkiewicz ukończył jednolite studia magisterskie na Wydziale Nauk Technicznych Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego w Olsztynie. Pracę magisterską obronił 30 listopada 2012 roku. Z przesłanych dokumentów wynika, że nie ubiegał się do tej pory o nadanie stopnia doktora.

Przebieg zatrudnienia mgr. inż. Andrzeja Rutkiewicza przedstawia się następująco:

- od sierpnia 2011 roku do października roku 2012 pracował jako inżynier budowy w trzech różnych przedsiębiorstwach budowlanych,
- od marca 2013 do dziś pracuje na stanowisku asystenta w „Katedrze Mechaniki i Konstrukcji Budowlanych” Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego w Olsztynie.

Dokonania publikacyjne Doktoranta przedstawiają się w sposób następujący:

- trzy artykuły w czasopismach naukowych (*Materials, Applied Sciences, Inżynieria i Budownictwo*),
- cztery prace w indeksowane w bazie Web of Science,
- 17 rozdziałów w monografiach (głównie w ramach międzynarodowej konferencji „*Lightweight Structures in Civil Engineering*”).

3. Zawartość dysertacji

Dysertacja doktorska mgr inż. Andrzeja Rutkiewicza pt. „*Eksperymentalne i numeryczne badania konstrukcji tensegrity w projektowaniu wież*” została napisana w języku polskim pod kierunkiem prof. dr. hab. inż. Leszka Małyszko. Rozprawa składa się z pięciu rozdziałów, streszczenia (w języku polskim i angielskim), spisu literatury, załączników (Dodatek A i B), oraz spisu rysunków i tabel. Sama rozprawa zajmuje 180 stron. W pracy zacytowano łącznie 118 pozycji literaturowych, z czego 7 stanowi publikacje Doktoranta (3 prace autorskie i 4 prace wieloautorskie), a 5 przedmiotowe normy do projektowania. Kolejność rozdziałów i podrozdziałów ma logiczny układ i odzwierciedla proces myślowy przyświecający Doktorantowi przy rozwiązywaniu problemów naukowych na poszczególnych etapach recenzowanej pracy.

W **rozdziale pierwszym** („*Wprowadzenie*”) Autor określa przedmiot rozważań, którym są w tym przypadku konstrukcje typu tensegrity. Rozdział ten podzielony jest na następujące podrozdziały:

- *Podstawowe koncepcje w konstrukcjach tensegrity* – zaprezentowano genezę samej nazwy, główną ideę powstania, prace rozwojowe na przestrzeni lat, definicję konstrukcji tensegrity (w tym definicję polską podaną przez prof. dr. hab. inż. Wojciecha Gilewskiego), nazewnictwo modułów podstawowych oraz przykłady istniejących konstrukcji wieżowych zbudowanych według tej koncepcji projektowej,
- *Geometria podstawowego modułu T3* – prezentacja podstawowego modułu tensegrity, który Autor poddał rozważaniom w rozprawie,
- *Projektowanie konstrukcji tensegrity* – opis poszczególnych etapów procesu projektowego wraz z konkluzjami własnymi Autora.

Rozdział pierwszy Doktorant kończy opisem wyzwania, które przed sobą postawił, i które zdefiniował następująco: „... *zaprojektowanie takiej wieży jest celem zarówno interesującym, jak i trudnym. Czy możliwe jest zachowanie piękna konstrukcji tensegrity, przy jednoczesnym utrzymaniu wysokich wymagań użyteczności i nośności typowych dla budownictwa? Jakich narzędzi należy użyć, aby sobie poradzić z takim zadaniem?*”

Osobiście uważam, że określenie tego z czym Autor mierzył się podczas powstawania doktoratu jest bardzo potrzebne i adekwatne.

Ostatni podrozdział („*Cel, teza i zakres pracy*”) to jak sama nazwa wskazuje opis trzech głównych charakterystyk rozprawy doktorskiej Autora. Główną tezę pracy Autor zdefiniował następująco: „...*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 drugi („*Badania eksperymentalne*”) to opis aktywności, danych i wyników uzyskanych w trakcie różnego typu badań laboratoryjnych. W rozdziale tym Autor zawarł:

- szczegółowy opis maszyn badawczych,
- opis fizycznych modeli konstrukcji typu tensegrity,
- wyniki próby statycznej ścisania dla dwóch różnych zastrzałów (pręt gwintowany i rura okrągła),
- wyniki badań dotyczące modułu T3, które dotyczyły np. stopnia wstępnego sprężenia, mechanizmu zniszczenia czy też zależności pomiędzy obrotami i przemieszczeniami a siłą zewnętrzną i siłami wewnętrznymi w prętach modułu,
- dyskusja wyników teoretycznych i danych eksperymentalnych (przy czym należy zwrócić uwagę, że dane dotyczące modeli matematycznych znajdują się dopiero w rozdziale czwartym...),
- badania parametrów dynamicznych – badania dotyczyły wyznaczenia parametrów modalnych dla trzynastu stopni wstępnego sprężenia w przypadku modułu A oraz dziesięciu stopni wstępnego sprężenia dla modułu typu B,
- dyskusję związaną z porównaniem wyników teoretycznych i eksperymentalnych w zakresie dynamiki badanych modułów.

Rozdział drugi zakończony jest podsumowaniem całości prac eksperymentalnych. Autor kończąc tą część dysertacji pokusił się o podanie, w moim przekonaniu, dość odważnego wniosku, a mianowicie „... *z faktu skonstruowania wieży tensegrity, można śmiało wnioskować, że utworzenie przenośnej wieży tensegrity do celów przykładowo nadawczo - odbiorczych jest wykonalne...*”. Myślę, że takie stwierdzenie, podane w tym miejscu pracy jest przesadzone, i co najważniejsze, nie mające żadnego oparcia w przeprowadzonych pracach badawczych (efekt skali).

Rozdział trzeci („*Badania numeryczne*”) w całości poświęcony został rozważaniom numerycznym dotyczącym utraty stateczności modułów w zależności od zachowania się zastrzałów. W tej części pracy Doktorant zaprezentował:

- model jednoparametrowy - obliczenia zależności pomiędzy sztywnością podpory a kątem skręcenia, lub przemieszczeniem pionowym dotyczące modułu T3 w stanie wstępnego sprężenia (względnie stanu pod obciążeniem),
- model dwuparametrowy – obliczenia dotyczą sytuacji, w której parametrami są kąt obrotu zastrzału oraz jego aktualna długość,

- model trójparametrowy – moduł T3; parametry to aktualna długość zastrzału, aktualna długość promienia okręgu opisanego na trójkącie podstawy oraz aktualny kąt skręcenia,
- wyniki optymalizacji „ze względu na masę”.

Ta część pracy kończy się podsumowaniem. Doktorant wymienia w tym miejscu kilka wniosków (bardziej lub mniej szczegółowych). W tym miejscu należy przywołać jeden z nich, a mianowicie - „...przedstawione narzędzie numeryczne *doskonale* nadaje się do projektowania ściskanych kolumn tensegrity, zbudowanych z modułów T3 i stanowi kolejną część budowanego zestawu narzędzi numerycznych potwierdzającego tezę rozprawy...”.

Podrozdział 3.3 („Wieże modularne”) zawiera w swej treści:

- opis zastosowanych metod numerycznych, w szczególności metody gęstości sił; opis ten oparty jest, jak wskazuje Autor, na pracach Pellegino i Calladine oraz Tran i Lee,
- określenie częstotliwości i postaci drgań w formalizmie MES,
- analiza statyczna z uwzględnieniem nieliniowości geometrycznej w MES.

Najważniejsza część tego rozdziału z punktu widzenia celu jaki Autor przed sobą postawił jest podrozdział zatytułowany „Symulacje numeryczne”. Doktorant podaje, że „...zostały przeprowadzone obliczenia numeryczne dotyczące pięciu rodzajów wież, zbudowanych z różnych modułów podstawowych...”. Założenia, które zostały przyjęte do analiz w skrócie przedstawiają się następująco:

- wymiary wież zostały dobrane w taki sposób, aby zewnętrzne węzły znajdowały się na powierzchni utworzonej przez walec o średnicy 4,24 m oraz wysokości 15,0 m,
- przyjęto typowe parametry materiałowe stali (normowe),
- przyjęto jeden wspólny przekrój cięgna ukośnego.

Jedno z założeń jest w moim przekonaniu dość problematyczne w interpretacji. Jego treść brzmi następująco: „...dobrano przekroje pozostałych prętów konstrukcji, z katalogu systemowego tak, aby nie przekroczyć 40 % nośności w przypadku cięgien i 50 % nośności w przypadku zastrzałów, które liczone zgodnie z [PN-EN 1993-1-1] (parametr imperfekcji równy 0,21). Dobór był podyktowany minimalizacją masy...”. Do zapisu tego odniosę się w dalszej części niniejszej recenzji.

Przedstawione obliczenia dotyczyły konstrukcji, które symbolicznie opisane były jako: T3, T4, T5, T4n oraz T5z. Zaprezentowano wyniki w postaci: podłużnych sił prętowych pod obciążeniem, całkowitego przemieszczenia wierzchołka wieży, podstawowych postaci częstotliwości drgań konstrukcji. Rozdział kończą podsumowania i wnioski.

Najważniejszy, z punktu widzenia tezy podanej w przedstawionej od oceny dysertacji jest **rozdział czwarty** zatytułowany „Wybrane aspekty projektowania na przykładzie wieży widokowej”. W rozdziale tym Autor przedstawia po kolei:

- optymalny moduł w stanie samonapężenia,
- optymalna konstrukcja wieży w stanie samonapężenia,
- stany graniczne pod obciążeniem statycznym z uwzględnieniem: wymagań projektowych i obciążeń, sprawdzenia stanów granicznych, charakterystyk dynamicznych projektowanej konstrukcji wieżowej.

Autor kończy **rozdział czwarty** następującym, w moim przekonaniu dość odważnym, stwierdzeniem, że „...przedstawione w rozdziale obliczenia koncepcyjne wieży widokowej potwierdzają tezę, że możliwe jest efektywne projektowanie konstrukcji wieży za pomocą algorytmów wykorzystujących metodę gęstości sił oraz własne środowisko narzędzi numerycznych”.

Rozdział piąty zawiera podsumowanie całej dysertacji wraz z obszernymi wnioskami, a także pomysłami i propozycjami dalszych badań.

Streszczając należy podkreślić, że rozprawa napisana jest językiem prostym i zrozumiałym. Bardzo pozytywnie również oceniam samą ideę oraz tematykę dysertacji. Układ rozdziałów i podrozdziałów umożliwia śledzenie procesu analizy, dedukcji i syntezy. Szczegółowe uwagi dotyczące powyższych zastrzeżeń zamieszczono w punkcie 4 niniejszej recenzji.

4. Ocena doboru tematu i naukowej wartości rozprawy

W recenzowanej rozprawie doktorskiej podjęto atrakcyjny i ważny problem badawczy dotyczący projektowania układów nośnych konstrukcji wieżowych przy użyciu systemów typu tensegrity. Moim zdaniem jest to zadanie niezmiernie trudne, w szczególności gdy Doktorant postawił sobie za zadanie by wyniki Jego prac miały charakter praktyczny i użyteczny. O trudności tego zadania niech świadczą słowa Doktoranta podane w streszczeniu dysertacji – „...w inżynierii lądowej wzniesiono niewiele obiektów wykorzystujących tę ideę, a jedynie parę z nich znalazło zastosowanie użytkowe dla ludzi...”.

Moją główną uwagę do przedstawionej do recenzji pracy jest to, że Autor nazbyt optymistycznie podchodzi do wyników, które uzyskał w zakresie zaprojektowania widokowej konstrukcji wieżowej w ujęciu systemu tensegrity. Szczegółowe uwagi zostały przedstawione poniżej.

Po analizie rozprawy uważam, że do głównych osiągnięć naukowych Autora rozprawy można zaliczyć między innymi następujące dokonania:

- przeprowadzenie laboratoryjnych badań eksperymentalnych dotyczących testów pojedynczych elementów oraz całych modułów tensegrity, z całą pewnością badania ta poszerzają obecny stan wiedzy dotyczący tej tematyki (uważam tą część pracy jako najlepszą w rozprawie),

- wykorzystanie własnych narzędzi numerycznych, które posłużyły do analizy konstrukcji tensegrity, bazujących na metodzie gęstości sił oraz liniowej i nieliniowej metodzie elementów skończonych,
- opracowanie oryginalnego planu badawczego zawierającego zarówno badania eksperymentalne, testy numeryczne jak i **próbę** wdrożenia ich wyników w zagadnienia praktyczne.

Należy również nadmienić w tym miejscu, że bardzo wysoko oceniam nakład pracy, którą Doktorant włożył by przeprowadzić tak liczną grupę badań, obliczeń i analiz.

5. Uwagi krytyczne

Podczas lektury i analizy wyników przedstawionych w recenzowanej rozprawie doktorskiej nasuwają się pewne pytania i uwagi krytyczne.

5.1. Ogólne uwagi merytoryczne

- 1) Autor w kilku miejscach w pracy podkreśla fakt, że konstrukcja wieżowa, którą analizował, i która jest **najważniejszą częścią rozprawy doktorskiej** pt. „*Eksperymentalne i numeryczne badania konstrukcji tensegrity w projektowaniu wież*” jest w głównej mierze wykonana na podstawie zapisów podanych i zdefiniowanych w Eurokodach. Poniżej kilka cytatów z rozprawy: „...wyznaczono siły wewnętrzne i zwymiarowano pręty bazując na stanach granicznych wymaganych w Eurokodach...”, lub też „...dokonano sprawdzenia wybranych statycznych stanów granicznych, proponowanych przez Eurokod: zbierając obciążenia, dokonując ich kombinacji, wyznaczając sił wewnętrzne i przemieszczenia oraz dokonując ich weryfikacji..”. Ponadto Doktorant definiując zadania główne, które mają Go prowadzić do potwierdzenia tezy pracy pisze: „...wykonanie koncepcyjnego projektu wieży widokowej o konstrukcji tensegrity, zgodnie z wymaganiami Eurokodów, bazując na zbudowanych narzędziach numerycznych i zdobytej wiedzy...”.

Analiza bibliografii podanej w pracy pozwala stwierdzić, że Autor wykorzystał zapisy podane w następujących normach (zestawionych tabelarycznie poniżej):

<i>PN-EN 1990, Eurokod (2004): Podstawy projektowania konstrukcji.</i>
<i>PN-EN 1991-1-4, Eurokod 1 (2008). Oddziaływania na konstrukcje. Część 1-4: oddziaływania ogólne. Oddziaływania wiatru.</i>
<i>PN-EN 1993-1-1, Eurokod 3 (2006): Projektowanie konstrukcji stalowych, Część 1-1. Reguły ogólne i reguły dla budynków.</i>
<i>PN-EN 1993-1-8, Eurokod 3 (2006): Projektowanie konstrukcji stalowych, Część 1-</i>

8: *Projektowanie węzłów.*

PN-EN 1993-1-11, Eurokod 3 (2008): Projektowanie konstrukcji stalowych. Część 1-11: Konstrukcje cięgnowe.

Jest dla mnie rzeczą całkowicie niezrozumiałą, że w zestawionej literaturze brak jest normy, która w mojej opinii powinna być podstawowym narzędziem w dysertacji: *PN-EN 1993-3-1, Eurokod 3 (2008), Projektowanie konstrukcji stalowych. Część 3-1: Wieże, maszty i kominy. Wieże i maszty.*

Fakt, że tego dokumentu nie ma w bibliografii nie jest być może najważniejszy. Najważniejsze jest to, że Doktorant pozbawiony wiedzy tam przedstawionej wykonuje zadanie projektowe popełniając cały szereg błędów (szczegółowe uwagi poniżej) i wyciągając wnioski, które są po prostu nieprawidłowe. Ponadto sądzę, że w rozprawie, która w tytule posiada zwrot „...projektowanie wież...” duży nacisk powinien być położony na to co w dziedzinie projektowania konstrukcji wieżowych osiągnięto do czasów obecnych. W bibliografii nie ma żadnej pozycji dotyczącej tego tematu. Nie ma podanych prac profesora Kazimierza Rykaluka, który dużą część swojej działalności naukowej poświęcił właśnie tym konstrukcjom. Nie przedstawiono w rozprawie nawet kilku podstawowych definicji i założeń, które w dziedzinie projektowania wież stalowych są obowiązującymi.

Uważam, że jest to podstawowy i największy błąd przeprowadzonych obliczeń i analiz. Błąd, który skutkuje tym, że bardzo trudno jest zgodzić się, że koncepcja projektowa może chociażby nosić znamiona projektu wdrożeniowego. Sądzę, że jest to ten przypadek pracy badawczej, w którym Autor tak bardzo skupił się na badaniach dotyczących systemów tensegrity, że zupełnie nie docenił jak trudną, złożoną i wymagającą dziedziną jest projektowanie stalowych konstrukcji wieżowych.

Biorąc powyższe pod uwagę nie mogę się zgodzić z twierdzeniem Doktoranta, że „...przeprowadzone badania (...) prezentują postęp w procesie przejścia z bogatych rozważań teoretycznych o tensegrity do praktycznych realizacji w budownictwie...”.

- 2) Mam również duże wątpliwości co do tezy sformułowanej następująco: „...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.” Nurtuje mnie następująca wątpliwość: co Autor ma na myśli pisząc o konstrukcji optymalnej? Pod jakim względem ma być ona optymalna? Ciężaru własnego, kosztów wytworzenia, łatwości montażu, sztywności na zginanie, czy też być może czynników produkcyjnych? Jest faktem znanym, że konstrukcje wieżowe mają cały szereg charakteryzujących ich parametrów i to, że jeden z nich jest spełniony w sposób optymalny (np. zminimalizowany ciężar własny) nie oznacza, że inne cechy również

są optymalne (odpowiednio – zminimalizowane koszty produkcji). Sądzę, że Autor powinien jednak bardziej precyzyjnie określić cele i tezę pracy.

- 3) Moje kolejne wątpliwości budzą zagadnienia związane z warunkami brzegowymi modeli obliczeniowych jakie Autor przyjął w swoich analizach konstrukcji wieżowych. Definicja konstrukcji wieżowych podana w jednej z ważniejszych pozycji literatury dotyczącej tej tematyki, a mianowicie monografii „*Konstrukcje stalowe. Kominy. Wieże. Maszty*” autorstwa prof. Kazimierza Rykaluka, brzmi następująco: „...*Wieżami nazywamy wysokie budowle, najczęściej pionowe, które pod względem statycznym są **wspornikami** zamocowanymi sztywno w podstawie...*”. Wypada w tym miejscu również przywołać definicję podaną w normie *PN-EN 1993-3-1, Eurokod 3 (2008), Projektowanie konstrukcji stalowych. Część 3-1: Wieże, maszty i kominy. Wieże i maszty*, gdzie podane jest, że „...*wieża to wolnostojąca **wspornikowa** stalowa konstrukcja kratowa o trójkątnym, kwadratowym lub prostokątnym kształcie przekroju...*”. Jak można zauważyć z tych dwóch przytoczonych definicji kluczowym jest określenie warunków brzegowych podpór, tak by konstrukcja wieżowa była faktycznie konstrukcją wspornikową. Z wielu przykładów obliczeń Doktorant tylko w jednym miejscu wzmiankuje na ten temat. Ma to miejsce w podrozdziale 4.3.1 dotyczącym projektowania konstrukcji wieży widokowej. Autor podaje, że „...*zamocowanie konstrukcji w podłożu odbywa się w trzech przegubowo nieprzesuwnych podporach (odebrano 9 stopni swobody)...*”. W pozostałych przykładach w ogóle nie znalazłem informacji na ten temat.

Nasuują się zatem następujące pytania: 1) czy projektowany obiekt jest wieżową konstrukcją wspornikową?; 2) co to znaczy, że zamocowanie odbywa się poprzez zdefiniowanie trzech podpór jako przegubowo nieprzesuwnych?; 3) dlaczego tak ważny aspekt projektowy został pominięty przez Autora, bez żadnych dodatkowych wyjaśnień czy też najkrótszej chociaż dyskusji?

- 4) Przy projektowaniu konstrukcji wieżowych obciążeniem dominującym i tym samym determinującym wyniki analiz statycznych jest **poziome obciążenie wiatrem**. Obciążenie to jest absolutnie kluczowe w kontekście użytych później profili stalowych na poszczególne elementy konstrukcyjne, a także na całościowe zużycie materiału. Można zatem stwierdzić, że aby wyciągać poprawne wnioski ze swych analiz to należy też bardzo precyzyjnie określać wartości oddziaływania wiatrem (bądź też podawać założenia, względnie ograniczenia w tym zakresie).

Zatem trudno mi zgodzić się z Doktorantem na bardzo ogólne sformułowanie tego problemu. Wartość, kierunek, sposób przyłożenia tego rodzaju obciążenia jest kluczowy, jeśli celem jest wyciąganie poprawnych wniosków natury praktycznej.

W podrozdziale 3.3.2 gdzie Autor testuje różne modele konstrukcji wieżowych nie ma żadnego rysunku przedstawiającego jak owo obciążenie zostało przyłożone (sam opis, że „...*analiza (...) została przeprowadzona dla obciążenia charakterystycznego*

$P_{Ek}=10\text{ kN}$, przyłożonego jako siła skupiona do górnych węzłów w kierunku osi $X...$ ” nie jest wystarczający, gdyż nigdzie nie pokazano jak owe osie są zdefiniowane i czy siła 10 kN została podzielona na 3 węzły, czy też nie.

Odnoszę wrażenie, że Autor nie do końca skupił się na tym aspekcie pracy. Wrażenie to potęguje następujące stwierdzenie podane na stronie 126 rozprawy: „...W poprzednim rozdziale przeanalizowano pięć rodzajów wież obciążonych wiatrem. Z obliczeń wynika, że najkorzystniejsze zachowanie wykazała wieża zbudowana z podstawowego modułu T3. Jednak do celów budowlanych, gdy dominujące są obciążenia pionowe, a obecność mechanizmów nieskończenie małych kłopotliwa, należy zwiększyć sztywność konstrukcji i zmodyfikować moduł...”. Trudno mi się zgodzić by w przypadku wież, które są głównym przedmiotem rozprawy obciążeniami dominującymi były obciążenia pionowe.

- 5) W wielu miejscach rozprawy Autor analizuje dwa bardzo ważne parametry projektowe, a mianowicie: częstotliwość drgań własnych konstrukcji oraz ciężar własny konstrukcji. Ma tutaj bezwzględnie rację, gdyż są to parametry kluczowe w dziedzinie projektowania stalowych konstrukcji wieżowych.

Moje głębokie zaniepokojenie budzi jednak fakt, że Doktorant podchodzi do uzyskanych przez siebie wyników (dotyczących w/w dwóch parametrów) bezkrytycznie.

Częstotliwości drgań własnych pięciu konstrukcji wieżowych o wysokości 15,0 metrów w podrozdziale 3.3.2 („Symulacje numeryczne”) przynoszą różne wartości podstawowych częstotliwości drgań, odpowiednio: 1,50 Hz; 1,20 Hz; 1,04 Hz; 0,47 Hz; 4,91 Hz. Sądzę, że dobrze było by się odnieść do tych wyników w ujęciu czysto inżynierskim tzn. podjąć próbę odpowiedzi na pytanie czy te wyniki są większe/mniejsze porównując je do innych konstrukcji o podobnych wymiarach. Może ku temu służyć np. wzór na podstawową częstotliwość drgań budynków wysokich gdzie $n_1=46/h$ (wzór F.2 normy *PN-EN 1991-1-4, Eurokod 1 (2008)*). Moim zdaniem podniosło by to walory praktyczne pracy i pozbawiłoby wrażenia, że Doktorant przedstawia wyniki bez głębszej inżynierskiej analizy.

Jeszcze większe wątpliwości budzą wyniki częstotliwości projektowanej konstrukcji wieżowej o wysokości 21,0 metrów podane w podrozdziale 4.4 („Charakterystyki dynamiczne wieży”). Na Rys. 4.13 podano informacje, że podstawowa częstotliwość drgań własnych wieży **wynosi 5,50 Hz**. To bardzo duża wartość. Ogromne wątpliwości budzi fakt, że obliczenia przeprowadzono tylko i wyłącznie dla samej konstrukcji tensegrity pomimo tego, że na str. 142 można odczytać, że wewnątrz trzonu wieży znajdują się schody wejściowe i taras widokowy i ta część konstrukcji „...jest samonośna w zakresie ciężaru własnego i użytkowego, przekazuje zaś obciążenia od wiatru na konstrukcję 2D6...”. Jeśli zatem przekazuje oddziaływania poziome od wiatru **to musi być** z modułami tensegrity połączona. Zatem pojawiają się

pytania następujące: 1) gdzie i w jaki sposób dokonano tego połączenia?; 2) jak dokonano modelowego transferu oddziaływania wiatrem?; 3) dlaczego Autor sądzi, że takie połączenie wieży tensegrity z dodatkową konstrukcją wewnątrz trzonu nie wpłynie na zmianę schematu statycznego i na wartość podstawowych częstotliwości drgań własnych?; 4) jaki sens mają analizy zaprezentowane w podrozdziale 4.4.2 dotyczące wpływu zmiany wielkości sprężenia na częstotliwości drgań bez uwzględnienia konstrukcji wymienionej powyżej?

W zakresie prób optymalizacji ciężaru własnego moje wątpliwości budzi fakt, że pojedynczy moduł D6 to masa 7,8 tony, natomiast całą konstrukcją (dwumodułową) to prawie 16 ton czyli można przyjąć, że to wartość podwojona. Z reguły, w przypadku konstrukcji wieżowych dolne elementy przyjmują przekroje i ciężar własny większy, natomiast górne wprost odwrotnie (schemat statyczny wspornika). Zatem można stwierdzić, że jeśli mamy do czynienia z konstrukcją dwu segmentową to ta wyższa powinna być lżejsza niż niższa. Sądzę, że Doktorant aspirując do rozwiązywania problemów na wskroś praktycznych powinien ten fakt skomentować. Poprawiłoby to wartość merytoryczną rozprawy.

Sądzę również, że warto by było odnieść całkowity ciężar własny konstrukcji wieżowej tensegrity do klasycznych kratowych wież stalowych o podobnej wysokości i podobnym rozstawie elementów. Ze swego doświadczenia mogę jedynie stwierdzić, że ciężar własny konstrukcji wieżowej o wysokości 21,0 metrów (bez konstrukcji wewnętrznej) równy 16 ton to dużo (np. dla porównania, ciężar całkowity wieży telekomunikacyjnej kratowej o wysokości 30,0 metrów to ok. 5 ton).

Uprzejmie zatem proszę Doktoranta o odniesienie się do w/w uwag, pytań i wątpliwości.

5.2. Szczegółowe uwagi merytoryczne

Poniżej podano szczegółowe uwagi i spostrzeżenia przypisane do poszczególnych rozdziałów rozprawy doktorskiej. Uwagi podane są wprost do poszczególnych zapisów rozprawy.

Rozdział drugi „Badania eksperymentalne”

- W opisie zadań eksperymentalnych Autor podaje wyniki np. modułu sprężystości E jako „wartości obliczone”, natomiast wartość granicy plastyczności użytej stali jako „dane producenta”. Dlaczego te wartości nie zostały określone eksperymentalnie? Dlaczego w różnych miejscach podane są różne informacje - w Tab. 2.4, że moduły E są obliczone, a w podsumowaniu na stronie 43, że wartości te zostały eksperymentalnie określone?

- Wykonano testy ściskanie dwóch różnych typów elementów: A – rura okrągła 42,4x2,0 oraz B – pręt gwintowany M20. Dlaczego w badaniach nie określono rzeczywistej siły krytycznej, a wartość tą jak podaje Autor obliczono?
- W moim przekonaniu brakuje w tym rozdziale dyskusji na temat uzyskanych wyników w kontekście smukłości elementów A i B.
- W badaniach modułów T3 Autor przedstawia wyniki dla ich osiowego ściskania. Jak te wyniki się mają do późniejszego, głównego zadania w rozprawie, czyli projektowania konstrukcji wieżowej, która takiemu osiowemu ściskaniu nie podlega?
- Czy Autor dobrze przemyślał następujące stwierdzenie, które pojawia się na stronie 76 rozprawy, że „...z faktu skonstruowania wieży tensegrity, można śmiało wnioskować, że utworzenie przenośnej wieży tensegrity do celów przykładowo nadawczo - odbiorczych jest wykonalne...”. Czy efekt skali nie powoduje, że to może być zadanie trudne (modele laboratoryjne miały wysokości 0,75 metra, konstrukcje wieżowe w telekomunikacji to co najmniej 20/25 metrów)? Co z samym przeznaczeniem obiektu jako konstrukcji wsporczej w telekomunikacji? Gdzie i w jaki sposób miałyby być montowane projektowane anteny i moduły radiowe? Jak prowadzona byłaby droga kablowo – włazowa?

Rozdział trzeci „Badania numeryczne”

- Strona 85 – Autor odnosi się do rysunku 3.4b. Rysunek taki nie istnieje. Pewnie chodzi o rysunek 3.5b.
- Doktorant w wielu miejscach pracy pisze o „optymalizacji ze względu na masę”. Sądzę, że zwyczajowo, w analizach dotyczących konstrukcji budowlanych optymalizacji dokonują się, ze względu na ciężar własny elementów/konstrukcji.
- Strona 93 – „...przedstawione narzędzie numeryczne doskonale nadaje się do projektowania ściskanych kolumn tensegrity, zbudowanych z modułów T3 i stanowi kolejną część budowanego zestawu narzędzi numerycznych potwierdzającego tezę rozprawy...” – proszę o odniesienie się do zacytowanego zapisu w kontekście projektowanej konstrukcji wieżowej. Czy konstrukcja wieżowa z rozdziału 4 jest również „ściskaną kolumną tensegrity”? Uważam to za bardzo ważny aspekt rozprawy, dla którego nie znalazłem w pracy komentarza.
- Strona 105 – proszę o wyjaśnienie dlaczego w przypadku analiz numerycznych, które miały na celu znalezienie rozwiązań z minimalnym ciężarem własnym konstrukcji przyjęto, że nośność cięgien miała nie przekraczać 40% wykorzystania nośności elementu, natomiast nośność zastrzałów miała być mniejsza niż 50% nośności teoretycznej. Czy tak postawione warunki brzegowe wytyżeń w kontekście minimalizacji ciężaru własnego mają sens? Proszę o jednoznaczne uzasadnienie.

- Strona 105 – analizowane konstrukcje były oparte o ciągną producenta Halfen-Detan. W pracy podano ponadto, że „...elementy systemu [Halfen Detan, 2020] można stosować, gdy oddziaływania są statyczne i quasi-statyczne w odniesieniu do [PN-EN 1990]...”. Czy można uznać, że w przypadku konstrukcji wieżowych oddziaływania są statyczne, bądź quasi-statyczne?
- W którym kierunku badane były przemieszczenia wierzchołków (nie ma również zaprezentowanego oddziaływania poziomego i jego kierunku)? W pracy podane są wartości, natomiast brak jest informacji (najlepiej w formie graficznej) na temat kierunku analizowanych przemieszczeń.
- Skąd w rozprawie warunek dotyczący granicznych przemieszczeń analizowanych konstrukcji wieżowych zdefiniowany jako $L/500$?
- Dlaczego w obliczeniach przyjęto wartość współczynnika częściowego bezpieczeństwa w kontekście obciążeń równą 1,5? Sugeruję Doktorantowi zapoznanie się z definicjami klasy niezawodności konstrukcji wieżowych podanymi w normie *PN-EN 1993-3-1, Eurokod 3 (2008), Projektowanie konstrukcji stalowych. Część 3-1: Wieże, maszty i kominy. Wieże i maszty*.

Rozdział czwarty „Wybrane aspekty projektowania na przykładzie wieży widokowej”

- Strona 126 – Autor wskazuje, że „...w poprzednim rozdziale przeanalizowano pięć rodzajów wież obciążonych wiatrem...”. W zakresie oddziaływania wiatrem w rozdziale 4 informacji było mało i były nie do końca precyzyjne. Czy oddziaływanie, które Doktorant opisał bardzo lakonicznie na stronie 105 można uznać za oddziaływanie wiatrem? Czy wartości tego oddziaływania mają jakiegokolwiek umocowanie w obliczeniach czy są wartościami założonymi?
- Strona 127 – Doktorant konkluduje, że „... moduł D_6 ma większą sztywność i dwukrotnie więcej zastrzałów niż T_3 , co niewątpliwie korzystnie wpływa na zdolność przenoszenia obciążeń grawitacyjnych...”. W przypadku konstrukcji wieżowych dominującymi są obciążenia poziome pochodzące od ciśnienia prędkości wiatru. Jak zatem rozumieć tak podane stwierdzenie?
- Strona 144 – szacowanie obciążenia wiatrem. Sugeruję by Autor zapoznał się z zapisami normy „*PN-EN 1993-3-1, Eurokod 3 (2008), Projektowanie konstrukcji stalowych. Część 3-1: Wieże, maszty i kominy. Wieże i maszty*” w tym kontekście. Schemat obliczeń zaproponowany w rozprawie jest błędny.
- W jaki sposób Doktorant oszacował współczynniki oporu aerodynamicznego dla przestrzennej konstrukcji tensegrity?
- Strona 149 – czy Autor przedstawia wyniki dotyczące częstości drgań własnych czy też częstotliwości drgań własnych konstrukcji?

5.3. Uwagi dotyczące redakcji rozprawy

W mojej ocenie strona edycyjna pracy mogłaby być na wyższym poziomie. Główne moje zastrzeżenia dotyczą rysunków i grafik. W moim przekonaniu są to elementy, które mają na celu poprawę zrozumienia przedstawionego tekstu np. dodatkowa prezentacja wymiarów modułów tensegrity, kierunku oddziaływania wiatru bądź przemieszczeń. W kilku miejscach rozprawy odczuwałem wyraźny brak tego typu wspomagających rysunków.

W pracy pojawiają się również błędy słowne i językowe np.:

- strona 35: „...zastosowano dodatkowe szybkie anteny (...) obsługiwane przez geodetów...” – język nieformalny;
- strona 76: „...przenośnej wieży tensegrity do celów przykładowo nadawczo-odbiorczych...” – brak precyzji w nazwaniu celu; wieże same w sobie stanowią konstrukcje wsporczą dla telekomunikacyjnego sprzętu nadawczego;
- strona 93: „...model dwuparametrowy jest bardzo szybki...” – język nieformalny;
- strona 93: „...dobór cięgien poziomych różnił się o jeden skok średnicy...” – język nieformalny;
- strona 124: „...nośność prętów jest zazwyczaj wyczerpana na długo przed uzyskaniem mięknienia modelu...” – czy chodziło o uplastycznienie?

6. Wnioski końcowe

Podsumowując stwierdzam, że rozprawa doktorska Pana **mgra inż. Andrzeja Rutkiewicza**, pomimo w/w uwag krytycznych stanowi rozwiązanie oryginalnego zagadnienia naukowego. Doktorant wykazał się dostateczną znajomością aktualnego stanu wiedzy w zakresie podjętej tematyki. Wysoko oceniam badawcze prace laboratoryjne Kandydata i stwierdzam, że ta część Jego aktywności jest więcej niż pozytywna. Stwierdzam również, że wykazuje umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. W swej ewentualnej dalszej pracy badawczej powinien jednak więcej uwagi przykładać do omawiania założeń swych badań, zgłębiać szerzej dostępną literaturę, w szczególności gdy podejmuje się tak trudnych, praktycznych zagadnień inżynierskich. Zalecam również krytyczne podejście do uzyskiwanych wyników badań lub obliczeń.

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

13 