Prof. dr hab. inż. Jarosław Górski
Katedra Mechaniki Budowli
Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska
Politechnika Gdańska
ul. Narutowicza 11/12
80-233 Gdańsk
tel. 606 313 907
e-mail: jgorski@pg.edu.pl

Gdańsk, 03.12.2021

RECENZJA
pracy doktorskiej mgr. inż. **Wojciecha Mochockiego**

Analiza statyczno-wytrzymałościowa wież kratowych w ujęciu probabilistycznym

1. Podstawa opracowania

Podstawą opracowania jest pismo Dyrektora Naukowego Dyscypliny Inżynieria Lądowa i Transport Politechniki Świętokrzyskiej prof. dr. hab. inż. Jerzego Wawrzeńczyka, z dnia 12.10.2021 i dołączona do niego rozprawa doktorska **mgr. inż. Wojciecha Mochockiego** pt. „**Analiza statyczno-wytrzymałościowa wież kratowych w ujęciu probabilistycznym**", wykonana pod kierunkiem **dr hab. inż. Pauliny Obary**, prof. PŚk.

2. Podstawowe dane o pracy

Praca składa się z pięciu rozdziałów zakończonych spisem literatury oraz streszczeniem w języku polskim i angielskim. Materiał przedstawiono na 159 stronach formatu A4. Praca zawiera 120 wzorów, 91 rysunków, 38 tabel oraz przytacza 152 pozycji literatury. Rozprawa jest napisana czcionką 12 punktową w odstępie 1,5 linii.

3. Omówienie struktury pracy

Otwierający pracę **Wstęp** (7 stron) podzielono na cztery podrozdziały. W Rozdziale 1.1 (*Przedmiot rozważań*) uzasadniono potrzebę wprowadzenia analizy probabilistycznej do projektowania w celu ograniczenia awarii konstrukcji kratowych. W Rozdziale 1.2 (*Cel, zakres i założenia przyjęte w pracy*) podkreślono, że w pracy wykonano analizę tradycyjnych kratownic, wież kratowych oraz konstrukcji typu tensegrity. Ponadto sformułowano cel pracy oraz wymieniono przyjęte założenia. W Rozdziale 1.3 (*Układ pracy*) szczegółowo omówiono strukturę pracy z podziałem na pięć rozdziałów. Rozdział 1.4 to *Przegląd literatury*, w którym także można wyróżnić dwie odrębne części dotyczące zagadnień probabilistycznych oraz konstrukcji tensegrity.

W **Rozdziale 2** (38 stron, 20 rysunków, 83 wzory, 6 tabel), zatytułowanym *Niezawodność konstrukcji budowlanych* w sposób encyklopedyczny przedstawiono definicje stanowiące podstawę wykonanych analiz. Omówienie rozpoczęto od *Podstawowych pojęć i definicji* (Rozdz. 2.2). Rozdział 2.3 (*Podstawy probabilistyki*) zawiera definicję *Zmiennych losowych* (Rozdz. 2.3.1), *Wybranych rozkładów prawdopodobieństwa* (Rozdz. 2.32) oraz opisuje dwie metody *Aproksymacji rozkładów prawdopodobieństwa* (2.3.3). Rozdział 2.4 wprowadza klasyczne definicje *Miar niezawodności*. Rozdziały 2.5 i 2.6 omawiają *Niezawodność w ujęciu normowym* oraz *probabilistycznym*. W Rozdziale 2.7 przedstawiono *Metody oceny niezawodności* z podziałem na *Metodę aproksymacji FORM* (2.7.1) i *Niezawodność w ujęciu systemowym* (2.7.2).

Kolejne Rozdziały 3 i 4 są wg Autora najważniejszymi fragmentami pracy.

wpłynęło dnia:
Data 2021 -12- 13
Podpis MKwoner

W **Rozdziale 3** przedstawiono cztery przykłady estymacji niezawodności standardowych konstrukcji kratowych przy zastosowaniu analizy systemowej. Pierwszy przykład dotyczył oceny wpływu różnych warunków podparcia kratownic oraz sposobu ich wykratowania na uzyskane wyniki (Rozdz. 3.2.1. *Wpływ stopnia statycznej niewyznaczalności*). W drugim przykładzie wykonano obliczenia dla wież kratowych o różnych wysokościach, tj. różnej liczbie powtarzalnych modułów (Rozdz. 3.2.2 *Wpływ geometrii wież kratowych*). Trzeci przykład analizuje wpływ rozkładu prętów wież kratowych na wyznaczoną niezawodność (Rozdz. 3.2.3 *Wpływ wykratowania wież kratowych*). W jednym z modeli uwzględniono rzeczywiste obciążenie konstrukcji. Wykorzystano także omówione wcześniej metody aproksymacji rozkładów prawdopodobieństwa. Ostatni czwarty przykład dotyczy estymacji niezawodności kratownic w przypadku awarii pojedynczych prętów konstrukcji (Rozdz. 3.2.3 *Wpływ awarii elementów wież kratowych*).

Rozdział 4 zawiera omówienie wykonanych analiz konstrukcji typu tensegrity. Rozdział otwiera wprowadzenie dotyczące specyfiki tych konstrukcji (4.1.1. *Przykłady zastosowania tensegrity w budownictwie*) oraz ich klasyfikację (4.1.2. *Definicja struktur tensegrity*). W Rozdziale 4.2 (*Model matematyczny*) przedstawiono zestaw wzorów wykorzystany w obliczeniach. Następnie omówiono siedem przykładów określanych przez Autora jako *Analiza jakościowa* (Rozdz. 4.3) oraz trzy przykłady *Analizy ilościowej* (Rozdz. 4.4). Tę część pracy kończy oszacowanie niezawodności wieży tensegrity obciążonej zbiornikiem wodnym.

W **Rozdziale 5** (*Podsumowanie*) przedstawiono wnioski, wskazano elementy oryginalne pracy oraz określono kierunki dalszych badań.

Spis **Literatury** zawiera 152 pozycje oraz adresy dwóch stron internetowych.

Pracę kończą **streszczenia** w języku polskim i angielskim.

W podsumowaniu omówienia struktury pracy należy stwierdzić, że dysertacja składa się z dwóch wyraźnie różnych części. Pierwsza obejmuje analizą niezawodnościową standardowych kratownic, a druga omawia konstrukcje tensegrity. Druga część zawiera oryginalne elementy, takie jak klasyfikacja tego typu konstrukcji, jednak oszacowanie niezawodności wieży tensegrity jest w tym rozdziale tematem ubocznym. Praca jest więc niespójna i nie w pełni odpowiada tytułowi.

4. Uwagi o pracy.

1. Przegląd literatury (Rozdz. 1.4) jest pobieżny; większość cytowanych publikacji to standardowe pozycje.

Odwołania do poszczególnych pozycji literatury w wielu miejscach są przypadkowe lub niewłaściwe, np.:

– str. 5: „Wszystkie te czynniki mają charakter niedeterministyczny co powoduje, że pomimo zachowania procedur normowych konstrukcja może ulec awarii (z pewnym prawdopodobieństwem) [Winkelmann, 2013]",

– str. 14: „Funkcja graniczna nazywana jest również zapasem bądź marginesem bezpieczeństwa [Winkelmann, 2013]",

– str. 19: „Im wyższa jest wartość współczynnika zmienności, tym większe jest względne zróżnicowanie tej cechy w rozkładzie [Jóźwiak i Podgórski, 2012].",

– str. 39: „Wykorzystanie zmiennej losowej zapasu bezpieczeństwa prowadzi, w wielu przypadkach, do uproszczeń przy budowie funkcji granicznej $g(\mathbf{X})$ [Winkelmann, 2013].",

– str. 40: „Funkcja graniczna $g(\mathbf{X})$ może być obarczona błędem wynikającym z opisu realnej konstrukcji za pomocą modelu matematycznego [Melchers, 1999].".

2. Rozdział 2 ma charakter skryptu o zakresie związanym z tematami poruszanymi w pracy. W rozdziale umieszczono jednak wiele zbędnych informacji, jak np. definicja „konstrukcji" czy „elementu konstrukcji" (str. 15). Z kolei inne definicje wydają się odbiegać od ich

standardowych wersji, np. „Awaria – przejaw zawodności obiektu technicznego" (str. 15), „Zawodność/awaryjność (P_f) – umowne prawdopodobieństwo awarii obiektu budowlanego, stanowiące w ujęciu probabilistycznym dopełnienie niezawodności" (str. 15).
Niektóre omówione pojęcia nie są w pracy wykorzystywane; np. rozkład Frecheta. Ponadto w przypadku rozkładu Frecheta Autor stwierdza: „Rozkład ten ma małe znaczenie w zagadnieniach praktycznych [Śniady, 2000]" (str. 25).

3. Nie ma żadnych merytorycznych podstaw aby metody oceny niezawodności podzielić na cztery grupy: standardowe poziomy 1, 2 i 3 oraz wyodrębnioną jako czwartą „analizę systemową" (str. 41). Poziom 3 jest w wielu źródłach (także w książkach cytowanych przez Autora) definiowany w różny sposób. Pojęcie *Poziom 3* jest na tyle obszerne, że analiza systemowa także powinna być przypisana tej grupie metod probabilistycznych.

4. Na stronie 42 stwierdzono, że analiza systemowa jest „rozwijana na przestrzeni *ostatnich lat*" i na poparcie tej opinii cytowana jest literatura z lat 1998-2001. Jest to sprzeczne z oceną umieszczoną w przeglądzie literatury (str. 11): „Brak jest w literaturze prac wykorzystujących do analizy niezawodności wież kratowych ujęcie systemowe." Jednak nawet pobieżny przegląd literatury wskazuje, że można znaleźć takie pozycje (najczęściej dotyczą procesu optymalizacji niezawodnościowej), przykładowo:
– A. Kaveh, K. B. Hamedani, M. Kamalinejad: *Set Theoretical Variants of Optimization Algorithms for System Reliability-based Design of Truss Structures*. Periodica Polytechnica Civil Engineering, 65(3), pp. 717–729, 2021;
– C. K. Prasad Varma Thampan, C. S. Krishnamoorthy: *System reliability-based configuration optimization of trusses*. Journal of Structural Engineering, 127(8), 2001;
– M. Zaeimi, Z. Ghoddosain: *System Reliability Based Design Optimization of Truss Structures with Interval Variables*. Periodica Polytechnica Civil Engineering, 64(1), pp. 42–59, 2020.
W spisie literatury nie znalazły się także prace z własnego ośrodka Autora dotyczące analizy systemowej kratownic, np.: K. Kubicka, P. Obara, U. Radoń, W. Szaniec: *Asessment of steel truss fire safety in terms of the system reliability analysis*. Archives of Civil and Mechanical Engineering 2019 19(2): 417-427.

5. Omawiając wzór (79) dotyczący geometrycznej zmienności konstrukcji Autor wspomniał, że identyfikacja mechanizmów zniszczenia odbywa się za pomocą autorskiego programu MES. Brakuje jakichkolwiek informacji na ten temat; jedynie we wstępie (str. 7) i podsumowaniu (str. 147) wspomniano o wykorzystaniu programu Mathematica. Dodatkowo w Rozdz. 3.2 (str. 51) stwierdzono, że: „ ... generowane są wszystkie możliwe kombinacje danej liczby elementów i budowana jest macierz sztywności liniowej". Czy obliczenia analizą systemową przebiegają automatycznie w autorskim programie MES? W jaki sposób to przebiega?
Odpowiedź na to pytanie ma kluczowe znaczenie dla oceny skuteczności proponowanych algorytmów obliczeniowych. Nie jest możliwe „ręczne" poszukiwanie możliwych mechanizmów zniszczenia kratownic. Autor na str. 63 zwrócił uwagę, że „... identyfikacja występowania mechanizmów przy rosnącej liczbie segmentów jest bardzo czasochłonna".
W pracy zostało umieszczonych wiele schematów ilustrujących mechanizmy zniszczenia kratownic, niektóre z nich zajmują kilka stron, np. rys. 42. W jaki sposób one powstały? Czy taka rozbudowana analiza była przeprowadzana „ręcznie", czy za pomocą autorskiego programu komputerowego?
Wydaje się, że wykonanie podobnych obliczeń przy wykorzystaniu standardowych programów inżynierskich (np. Robot czy ABAQUS) jest trudne. Może właśnie z tego powodu stosunkowo niewielka liczby badaczy zajmuje się tą ścieżką analizy probabilistycznej?

6. Czy przyjęte w Rozdz. 3 schematy kratownic (rys. 27, 28, 31-34, 38) oraz ich wymiary (np. proporcje wysokości do długości) mają jakiekolwiek odniesienie do rzeczywistości? Dotyczy to szczególnie kratownicy z nieprzesuwnymi podporami z rys. 28.

Dlaczego w Rozdz. 3.2.2 schematy kratownic opisywane są jako wieże kratowe? Wydaje się, że analizowane są kratownice płaskie a nie struktury przestrzenne; są to więc raczej kratownice „wspornikowe".

7. W Rozdz. 3.3.4 bardzo krótko omówiono awarie wież kratowych (w opisie zabrakło m.in. pracy: J. Szafran: *An experimental investigation into failure mechanism of a full-scale 40 m high steel telecommunication tower*. Engineering Failure Analysis, 54 (2015), 131-145).
Z różnych przyczyn mogących powodować awarię kratownic Autor wybrał wpływ wyłączenia pojedynczego elementu. Nie podano jakiegokolwiek uzasadnienia dlaczego właśnie taki schemat jest rozpatrywany.
W jaki sposób Autor interpretuje „zniknięcie" pojedynczego pręta? Przykładowo, nie można za taką przyczynę uznać korozji, bo taka degradacja dotyczy w mniejszym lub większym stopniu wszystkich prętów, a pozostałe pręty w przeprowadzonych obliczeniach są w pełni sprawne. Analiza uszkodzonych kratownic wydaje się odbiegać od rzeczywistych możliwych scenariuszy i z tego powodu uzyskane wyniki mają jedynie teoretyczny charakter.

8. W obliczeniach probabilistyczny jako alternatywę zastosowano program Numpress Explore (Tabela 14, str. 81). Takie podejście wydaje się niewłaściwe, gdyż obliczenia wykonane za pomocą tego programu dotyczą konkretnego scenariusza zniszczenia, podczas gdy obliczenia systemowe analizują rzeczywistą pracę całej konstrukcji. Autor wyjaśnił te różnice obliczeniowe na str. 82.
Mimo tej prawidłowej oceny w Rozdz. 5 (str. 148) sformułowano następujący wniosek: „Inne metody analizy niezawodności nie oddają realnych zależności pomiędzy elementami. Jest to widoczne na przykładzie metody FORM, w której wskaźnik niezawodności osiąga podobny poziom bez względu na liczbę elementów w systemie, ponieważ metoda ta bazuje na niezawodności jedynie najbardziej wytężonego elementu.". Wydaje się, że nie powinno się utożsamiać wyników programu Numpress Explore (zastosowanego przez Autora w niewłaściwy sposób) z analizą FORM.

9. W Rozdz. 3.3.2 analizowana jest wieża kratowa obciążona zbiornikiem. Na rys. 50 przedstawiona jest ona jako konstrukcja przestrzenna jednak kolejne rysunki i schematy wskazują, że analizowano kratownicę 2D.
Na rysunku 51 we wszystkich 3 schematach podpora z prawej strony jest podporą przesuwną, która nie powinna wystąpić w przypadku konstrukcji wieży. Z kolei jeżeli obie podpory są nieprzesuwne to poziomy pręt je łączący nie ma żadnego wpływu na mechaniczne zachowanie kratownicy.
W analizie awarii konstrukcji zmieniono schemat wież modelując obie podpory jako nieprzesuwne (porównaj rys. 51a i 52). Dlaczego nie jest analizowany ten sam schemat kratownicy?
Na rys. 53 pokazano kratownicę „po awarii elementu". Jednak nie jest wskazane czy jednego z czterech, czy może jednocześnie dwóch elementów z jednej strony wieży?
Na tym samym rysunku (53c) pokazano schemat obciążenia poziomego. Wydaje się, że jedyną interpretacją takiego obciążenia jest wiatr, który jednak może oddziaływać z obu stron. Dlaczego więc przyjęto obciążenie z prawej strony skoro bardziej niekorzystne jest obciążenie z lewej strony, prowadzące do utraty stateczności dolnego pręta (prętów)?

10. Jaki jest sens wykonywania obliczeń niezawodności przy założeniu połączenia wszystkich elementów kratownicy w sposób szeregowy (oszacowanie dolne) skoro możliwa jest dokładna estymacja niezawodności konstrukcji? Sformułowane na tej podstawie wnioski, przykładowo „... wartość wskaźnika niezawodności utrzymuje się na zdecydowanie niższym poziomie, z tendencją malejącą wraz ze wzrostem liczby elementów konstrukcji." (str. 85) są oczywiste

i nie wymagają żadnych obliczeń. Pełna przybliżona analiza wymagałaby estymacji także trudnego do wyznaczenia „oszacowania górnego", a w rezultacie przedziału niezawodności.

11. Autor deklaruje (na str. 89), że „. W pracy do opisu zachowania się obciążenia wiatrem zastosowano rozkład Gumbela." Jednak w tabeli 19 przedstawiono obliczenia, w których obciążenie wiatrem jest opisane także rozkładem Normalnym. Niemniej aproksymacja rozkładu Gumbela rozkładem Normalnym (metodą momentów probabilistycznych oraz kolokacji) wprowadza uporządkowanie opisu wszystkich analizowanych zmiennych i jest istotną propozycją usystematyzowania probabilistycznych obliczeń.

12. Przedstawiona w Rozdz. 4. obszerna analiza tensegrity jest wyróżniającym elementem pracy. Autor prezentuje analizę standardowych modułów Simplex i Quartex, używanych m.in. do budowy igieł Snelsona. Wydaje się więc, że Rozdz. 4 ma jedynie teoretyczny charakter. Analiza niezawodnościowa wieży tensegrity obciążonej zbiornikiem na wodę nie ma większego znaczenia praktycznego. Potwierdzają to fragmentaryczne obliczenia probabilistyczne polegające jedynie na określeniu zmiany niezawodności w funkcji sprężenia elementów składowych (rys. 91).

13. Model matematyczny pozwalający na obliczenia struktur typu tensegrity (Rozdz. 4.2) zbudowany przez Autora od podstaw (prawdopodobnie w środowisku Mathematica; nie jest to w pracy opisane) zasługuje na wyróżnienie.
Nasuwa się jednak pytanie: czy tego typu konstrukcje można analizować za pomocą powszechnie dostępnego komercyjnego oprogramowania stosowanego w obliczeniach inżynierskich?

14. Podsumowanie (rozdz. 5) zawierają wiele wniosków, także takich, które nie wymagających żadnych analiz ani obliczeń. Przykładowo:
– „Wzrost liczby połączeń o charakterze szeregowym powoduje znacznie szybszy spadek wskaźnika niezawodności niż wzrost liczby połączeń o typie mieszanym ...",
– „Typ rozkładu prawdopodobieństwa obciążenia zmiennego ma istotny wpływ na wskaźnik niezawodności."

5. Inne uwagi

1. W pracy nie umieszczono spisu rysunków i tablic oraz spisu ważniejszych symboli i oznaczeń, co utrudnia jej czytanie.
2. Większość rysunków w rozdz. 2.3.2 są odręcznymi szkicami, bez podania parametrów wykorzystanych przy ich tworzeniu. Rysunki rozkładów odniesione do konkretnych wartości liczbowych znacznie podniosłyby poziom tej części pracy.
3. Podawane są wzory bez cytowania ich źródeł oraz bez opisu elementów tych wzorów (np. 12, 13).
4. Nie zachowano jednolitego stylu cytowania literatury.
5. Wyjaśnienia dotyczące analizy systemowej (system szeregowy, równoległy i mieszany) są przedstawione podobnie jak w książce A. Biegusa: *Probabilistyczna analiza konstrukcji stalowych*. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa-Wrocław 1999. Stosowane są te same definicje i podobne rysunki. Dlaczego nie ma odniesienia do tej pozycji literatury chociaż jest umieszczona w spisie?
6. Pracy zawiera błędy językowe, niezręczne sformułowania, itp.; przykładowo:

– fragment „praca się składa z *sześciu* rozdziałów", jest błędny, gdyż w pracy jest ich tylko *pięć* (str. 8),

– błędnie ponumerowane tytuły rozdziałów (także w spisie treści):
„2.5.1. METODA APROKSYMACYJNA", a powinno być 2.7.1,
„2.5.2. NIEZAWODNOŚĆ W UJĘCIU SYSTEMOWYM" zamiast 2.7.2,

– Fissler zamiast Fiessler, Rossnbluth (Rosenbluth), Machowksia (Machowski) (str. 10),

– skrót SGU odpowiada angielskiemu SLS, a nie ULS (str. 13),

– w pracy dwa razy występuje słowo „wacha" zamiast „waha" (str. 79, 140),

– błędne użycie „posiadać": „Wymienione dziedziny posiadają bogatą literaturę" (str. 10)

– sformułowanie: „Współczynnik zmienności dla efektu oddziaływań przyjęto w sposób deterministyczny na poziomie $\nu_S = 0{,}06\%$." (str. 97) także budzi wątpliwości; może Autor miał na myśli, że przyjęto „a priori"?

6. Ocena rozprawy.

Praca omawia ważny temat analizy probabilistycznej konstrukcji inżynierskich. Wydaje się, że szacowanie niezawodności konstrukcji w niedalekiej przyszłości uzupełni standardowe obliczenia inżynierskie. Praca wpisuje się więc w aktualny nurt badawczy.

Celem pracy jest rozwijanie metod obliczeniowych umożliwiających estymację niezawodności konstrukcji kratowych i w dalszej perspektywie ich optymalizację. Ponadto przedstawiono unikatową klasyfikację i analizę konstrukcji typu tensegrity, których zastosowanie w praktyce inżynierskiej spotyka się z coraz większym zainteresowaniem. Autor wykazał wszechstronność zainteresowań zagadnieniami probabilistycznymi oraz zaawansowanymi metodami obliczeniowymi; stworzył własne oprogramowanie umożliwiające kompleksową analizę niezawodności konstrukcji kratowych i tensegrity.

Wyniki pracy wnoszą wiele ciekawych elementów poznawczych. Uzyskano konkretne liczbowe relacje dotyczące wpływu stopnia statycznej niewyznaczalności, doboru schematów statycznych, a także awarii poszczególnych elementów na niezawodność konstrukcji kratowych. Przedstawione wyniki pozwalają na dalszą kontynuację podjętych tematów.

Pracę cechuje logiczny układ rozdziałów, sformułowanie wartościowych wniosków, odpowiedni język i dobrze dobrana literatura.

Uwagi krytyczne nie podważają znaczenia pracy i uzyskanych przez Autora wyników.

7. Wniosek końcowy

Recenzowana rozprawa doktorska stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, wykazuje ogólną wiedzę teoretyczną Autora, a także Jego umiejętności w samodzielnym prowadzeniu pracy naukowej. Stwierdzam więc, że rozprawa spełnia warunki stawiane pracom doktorskim (Ustawa z dnia 14 marca 2003 roku oraz Rozporządzenie Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 22 września 2011 roku) i stawiam wniosek o dopuszczenie Pana mgr. inż. Wojciecha Mochockiego do jej publicznej obrony.

Janusz Gi[illegible]