

Drewno jako materiał konstrukcyjny ma szerokie zastosowanie w wielu dziedzinach, głównie w budownictwie i stolarce. Jest ono powszechnie wykorzystywane przy konstruowaniu więźb dachowych, schodów, deskowań w robotach betoniarskich, możliwe jest także wykonanie całej konstrukcji budynku [1]. Ogorzałka wełnista (Ochroma pyramidale) to gatunek drzewa, którego drewno jest znane popularnie jako balsa. Ze względu na swoje właściwości (m.in. niską gęstość, mały ciężar, relatywnie dużą sztywność [2]) posiada szereg zastosowań. W budownictwie wykorzystywana jest jako materiał termoizolacyjny [3], w lotnictwie do usztywnień kadłubów szybowców, a w przemyśle włókienniczym do wykonywania czółenek tkackich. Balsa służy jednak głównie do celów modelarskich.

Drewno jest na ogół bardzo skomplikowanym materiałem w kwestii badań wytrzymałościowych. Zagadnienia dotyczące jego zachowania pod obciążeniem są o wiele bardziej złożone niż w przypadku innych materiałów konstrukcyjnych (np. stali, którą można modelować jako materiał sprężysty, jednorodny, izotropowy). Drewno cechuje bowiem anizotropia właściwości mechanicznych, w tym także sprężystych [4]. Dodatkowym utrudnieniem w badaniach nad drewnem jest jego niejednorodność, występowanie licznych wad w strukturze [5]. Wytrzymałość materiałów i jej zagadnienia opierają się na szeregu założeń. Przyjmuje się, między innymi, że badany materiał ma budowę ciągłą, cechuje go jednorodność i izotropowość. Klasycznym przykładem niespełniającym tych warunków jest właśnie drewno [6]. Wobec tego, w obliczeniach przyjmuje się uproszczone modele, dla których nierzadko występują istotne rozbieżności z rzeczywistymi wynikami.

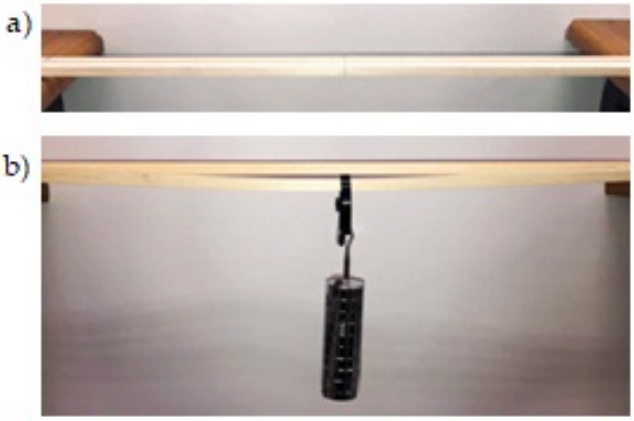
W pracy uwaga skupiona została na analizie balsy jako materiału konstrukcyjnego w skali modelowej. Głównym celem jest sprawdzenie zachowania się modelu wieży pod obciążeniem krytycznym i wyznaczenie postaci wyboczeniowych. Do analizy numerycznej wykorzystano dwa programy oparte na teorii metody elementów skończonych (MES). Autodesk Robot Structural Analysis Professional (ROBOT) jest programem inżynierskim, który wykorzystuje MES do modelowania i analizy obiektów budowlanych. Program ABAQUS, podobnie jak ROBOT, bazuje na metodzie elementów skończonych, aczkolwiek stwarza on znacznie większe możliwości

Phoca PDF

przeprowadzania analizy konstrukcji.

Wyznaczenie MODUŁU YOUNGA

W celu wyznaczenia modułu Younga przeprowadzono badanie rozciągania próbek balsy. Korzystano z maszyny Zwick Roell Z100 i ekstensometru mechanicznego. Badanie przeprowadzono na sześciu próbkach o przekroju kwadratowym, przy czym trzy pierwsze posiadały przekrój 10 x 10 mm, natomiast trzy kolejne – 5 x 5 mm (rys. 1a). Długość całkowita badanych próbek wynosiła 200 mm, natomiast przyjęty rozstaw szczęk założono na poziomie 120 mm, a długość bazy pomiarowej wynosiła 50 mm. Przygotowane próbki poddawano po kolei badaniu w maszynie (rys. 1b). Przyjęto siłę wstępną 10 N i wartość graniczną obciążenia równą 50 N.



Rys. 2. Badanie strzałki ucięcia: a) stanowisko bez obciążenia, b) stan pod obciążeniem.

Dla otrzymanych wyników pomiarów przeprowadzono aproksymację liniową przy użyciu metody najmniejszych kwadratów i wyznaczono moduł Younga (wyniki w tab. 1). Z otrzymanych wartości wyznaczono moduł Younga. Odrzucony został pomiar dla próbki nr 2, wykazujący znaczne

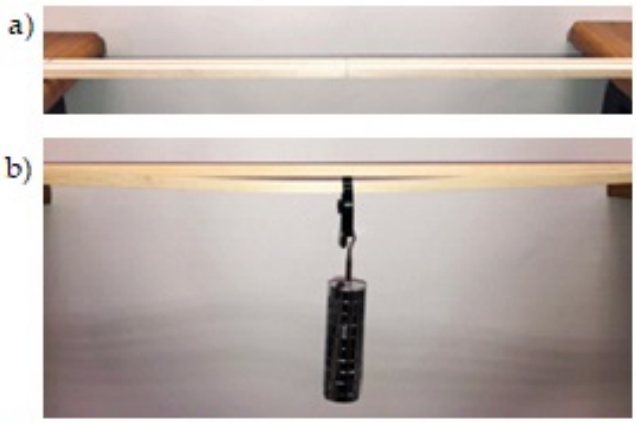
Phoca PDF

Tab. 1. Wyniki pomiarów modułu Younga

Nr próbki	1	2	3	4	5	6
Moduł Younga [GPa]	3,835	7,970	3,495	3,160	4,022	3,628

$$E = \frac{3,835 + 3,495 + 3,160 + 4,022 + 3,682}{5} = 3,638\,\text{GPa} \quad (1)$$

W celu kontroli wartości modułu Younga uzyskanej za pomocą maszyny Zwick wykonano badanie strzałki ugięcia (rys. 2). Doświadczenie przeprowadzono na próbkach z analizowanych beleczek balsy, kolejno o przekroju 10 x 10 mm i 5 x 5 mm. Uwzględniono ułożenie wzdłuż i poprzek włókien.



Rys. 2. Badanie strzałki ucięcia: a) stanowisko bez obciążenia, b) stan pod obciążeniem.

Phoca PDF

Tab. 2. Wyniki pomiarów strzałki ugięcia

Lp.	Ułożenie włókien	Przekrój [cm]	I_x [cm^4]	Długość l [cm]	Masa m [kg]	Ugięcie u [cm]	Moduł Younga E [GPa]
1	w poprzek	10 x 10	0,0833	60	0,5	1,34	1,9766
2	w poprzek	10 x 10	0,0833	60	0,5	1,35	1,9620
3	wzdłuż	10 x 10	0,0833	60	0,5	1,27	2,0856
4	wzdłuż	10 x 10	0,0833	60	0,5	1,19	2,2258
5	w poprzek	5 x 5	0,0052	40	0,2	1,22	4,1170
6	w poprzek	5 x 5	0,0052	40	0,2	1,19	4,2208
7	wzdłuż	5 x 5	0,0052	40	0,2	1,01	4,9730
8	wzdłuż	5 x 5	0,0052	40	0,2	1,00	5,0227

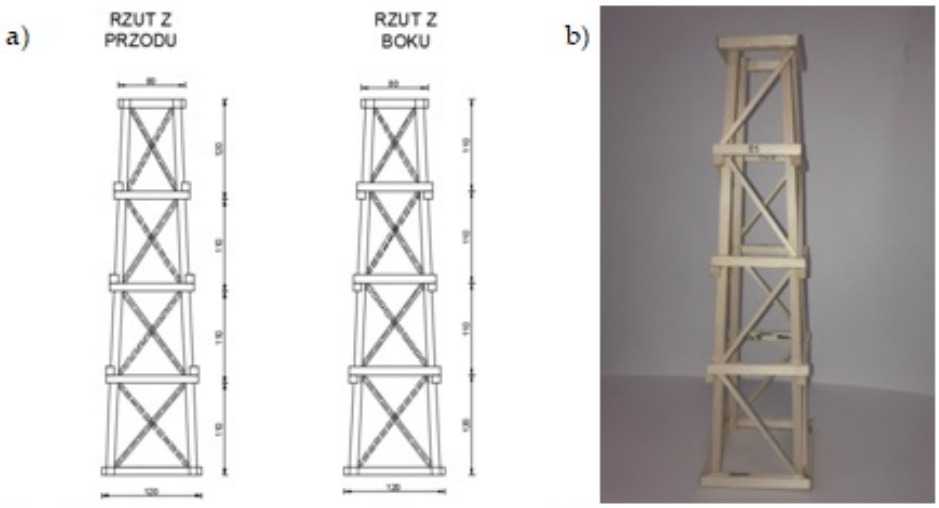
Wartość modułu Younga wyznaczono na podstawie wzoru (2), który jest przekształceniem wzoru na ugięcie środka rozpiętości belki swobodnie podpartej. We wzorze g oznacza przyspieszenie ziemskie, g = 9,81 m/s2. Dla belki 10 x 10 otrzymano zaniżone wartości modułu Younga, natomiast dla belki 5 x 5 wartości są nieco zawyżone. Wynika to, między innymi, z nieprecyzyjności pomiarów. Ponadto, wyniki dla ustawienia wzdłuż włókien są nieco wyższe niż dla ustawienia w poprzek włókien.

Phoca PDF

$$E_i = \frac{m_i \cdot g \cdot l_i^3}{48 \cdot u_i \cdot I_{x,i}} \qquad (2)$$

Model doświadczalny

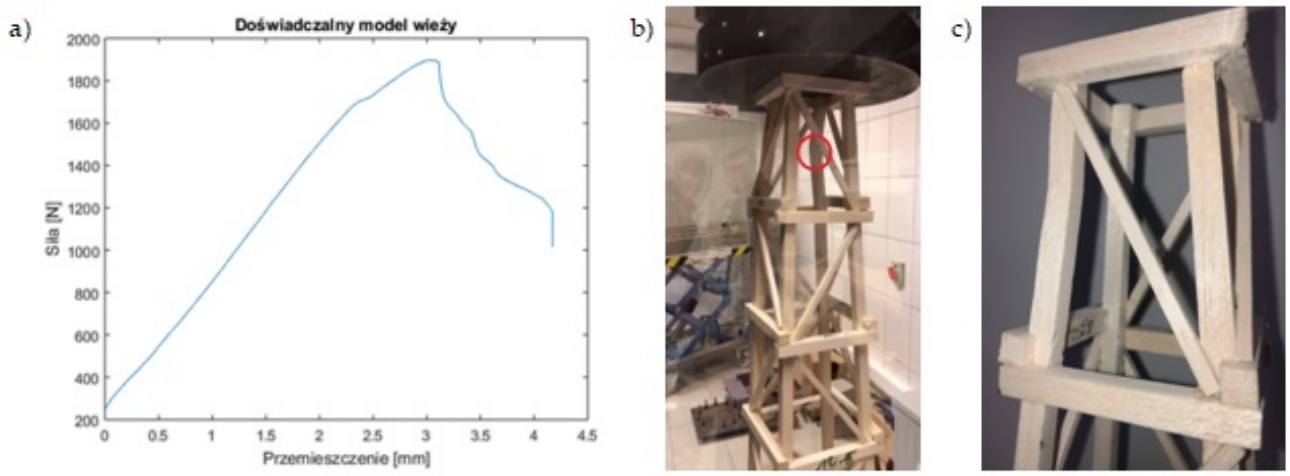
Badanie doświadczalne przeprowadzono na modelu wieży, wykonanym z balsy konstrukcyjnej (rys. 3). Krzyżulce posiadały przekrój 5 x 5 mm, natomiast słupki oraz stężenia poziome skonstruowano z elementów o przekroju 10 x 10 mm.



Rys. 3. Model doświadczalny wieży: a) projekt w programie AutoCAD, b) zdjęcie wykonanego modelu.

Phoca PDF

W celu wyznaczenia granicznej wielkości obciążenia i postaci zniszczenia przeprowadzono badanie w maszynie wytrzymałościowej Zwick Roell Z400. Przyłożona siła wstępna wynosiła 250 N, ruch trawersy odbywał się z prędkością 3 mm/min. Maksymalna siła wyniosła 1897,63 N. Wykres próby przedstawiono na rys. 4a. Wyczerpanie nośności wieży nastąpiło wskutek lokalnej utraty stateczności w górnym przekroju słupka (rys. 4bc).



Rys. 4. Badania eksperymentalne wieży: a) wykres siła-przemieszczenie, b) widok z maszyny wytrzymałościowej, c) zbliżenie na miejsce zniszczenia.

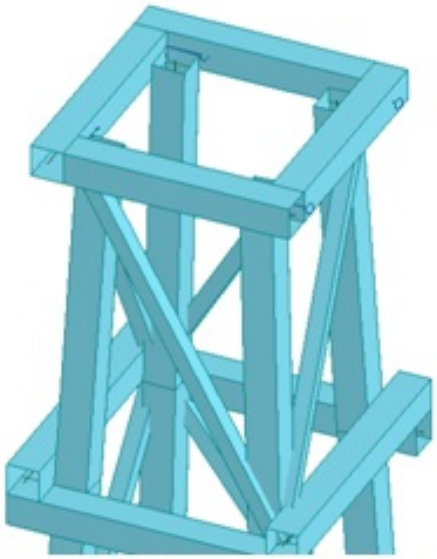
Phoca PDF

Obliczenia numeryczne

MODEL ROBOT

Do modelowania użyty został typ konstrukcji „rama przestrzenna”. Zdefiniowano materiał balsy, przyjmując (zgodnie z wynikami z maszyny wytrzymałościowej) moduł Younga równy E = 3,638 GPa. W oparciu o dane ze źródeł internetowych [7] przyjęto współczynnik Poissona równy v = 0,38 [–]. Założono dwa rodzaje profili zgodnie z modelem doświadczalnym: przekrój kwadratowy pełny 5 x 5 mm oraz kwadratowy pełny 10 x 10 mm). Pręty modelu połączono osiowo, przy czym, w celu odzwierciedlenia modelu rzeczywistego, w węzłach zastosowano odpowiednie offsety (rys. 5). Aby najlepiej oddać warunki podporowe panujące w maszynie wytrzymałościowej, dla podstawy dolnej zablokowano wszystkie trzy translacje, a dla podstawy górnej na tylko kierunki X i Y. Siłę zadano jako obciążenie powierzchniowe po konturze, a jej wartość przeliczona została tak, aby wypadkowa wynosiła 1 kN. Dla przygotowanego modelu przeprowadzono analizę wyboczeniową konstrukcji. Wyznaczono cztery pierwsze siły krytyczne (tab. 3) i skojarzone z nimi postaci wyboczeniowe (rys. 6).

Phoca PDF

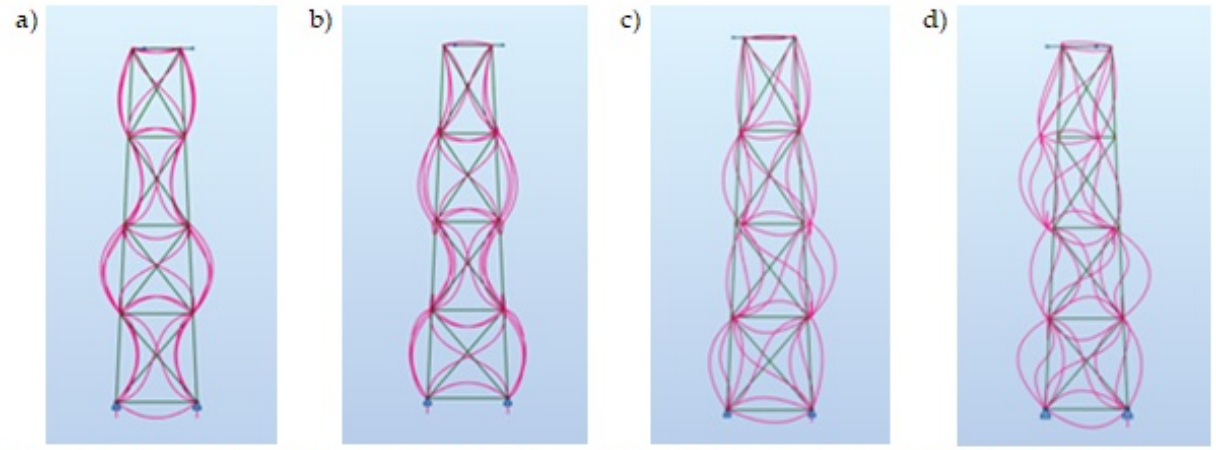


Rys. 5. Zbliżenie na model numeryczny w programie Robot

Tab. 3. Siły krytyczne uzyskane z modelu w programie Robot

Nr postaci	1	2	3	4
Siła krytyczna [kN]	16,850	18,736	20,652	21,507

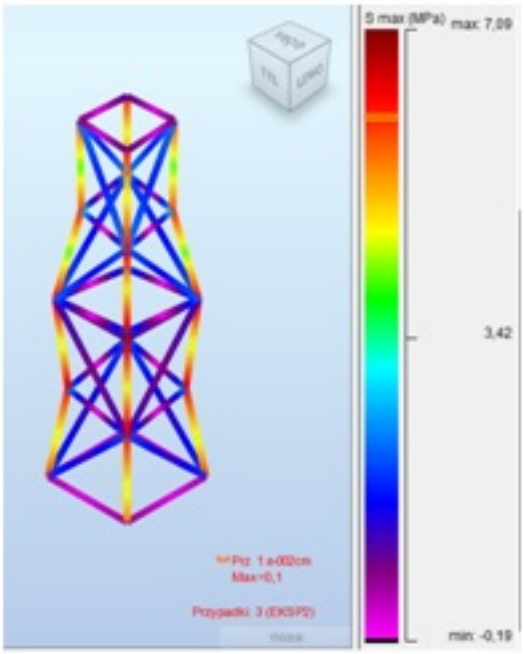
Phoca PDF



Rys. 6. Postacie wyboczeniowe z modelu w programie Robot: a) postać 1, b) postać 2, c) postać 3, d) postać 4.

Na podstawie wyników zaobserwowano, że największe przemieszczenia występują dla słupków. W przypadku pierwszej postaci znaczne deformacje uzyskano w słupkach drugiego piętra, można jednak stwierdzić, iż wyboczenie nastąpiło w górnym słupku ze względu na lokalny charakter działania obciążenia. W celu sprawdzenia panujących w konstrukcji naprężeń maksymalnych, zadano obciążenie równe sile niszczącej wynikającej z modelu doświadczalnego (1,898 kN). Na mapie naprężeń maksymalnych naprężeń normalnych (rys. 7) widać wyraźnie, iż słupki wieży są najbardziej wytężone, przy czym największe wartości naprężeń są uzyskiwane w złączach.

Phoca PDF



Rys. 7. Mapa naprężeń normalnych w programie Robot

MODEL ABAQUS

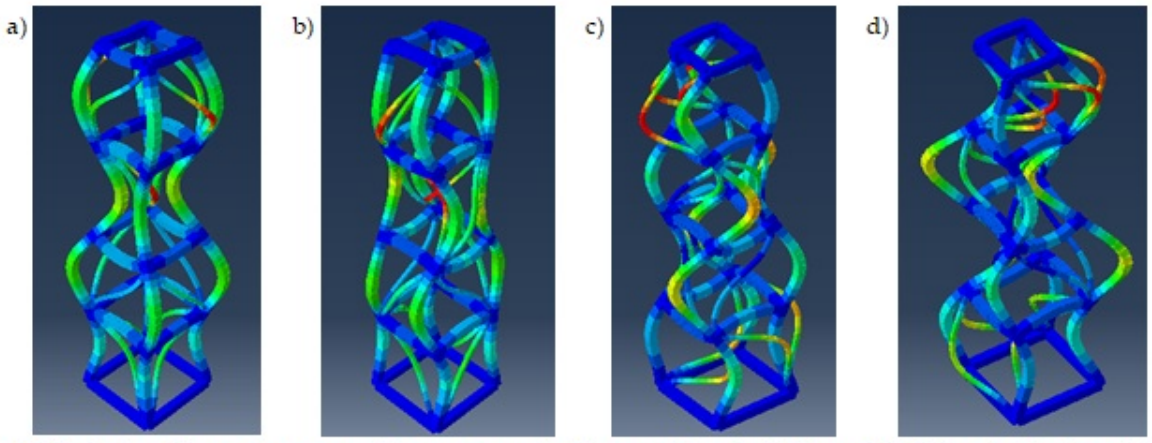
Przygotowując model wieży użyto elementów belkowych (B31). Zdefiniowano materiał balsy oraz przyjęto warunki brzegowe takie same, jak w programie ROBOT. Obciążenie zadano jako liniowe (line load) przyłożone do górnej podstawy, tak aby wypadkowa siła wyniosła 1 kN. Dla przygotowanej konstrukcji przeprowadzono analizę wyboczeniową, uwzględniając cztery pierwsze postacie. Odczytano wartości

Phoca PDF

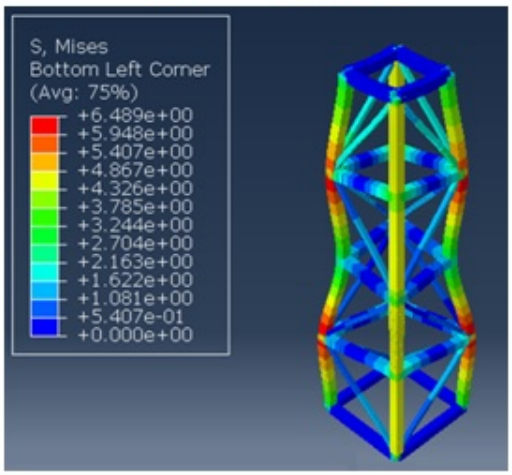
sił krytycznych (tab. 4) oraz zwizualizowano postacie wyboczenia (rys. 8). Dodatkowo, dokonano sprawdzenia wartości naprężeń w konstrukcji pod obciążeniem niszczącym model eksperymentalny. Mapa naprężeń według hipotezy HMH została zaprezentowana na rys. 9.

Tab. 4. Siły krytyczne uzyskane z modelu w programie Abaqus

Nr postaci	1	2	3	4
Siła krytyczna [kN]	16,434	16,449	18,790	18,799



Rys. 8. Postacie wyboczeniowe z modelu w programie Abaqus: a) postać 1, b) postać 2, c) postać 3, d) postać 4.



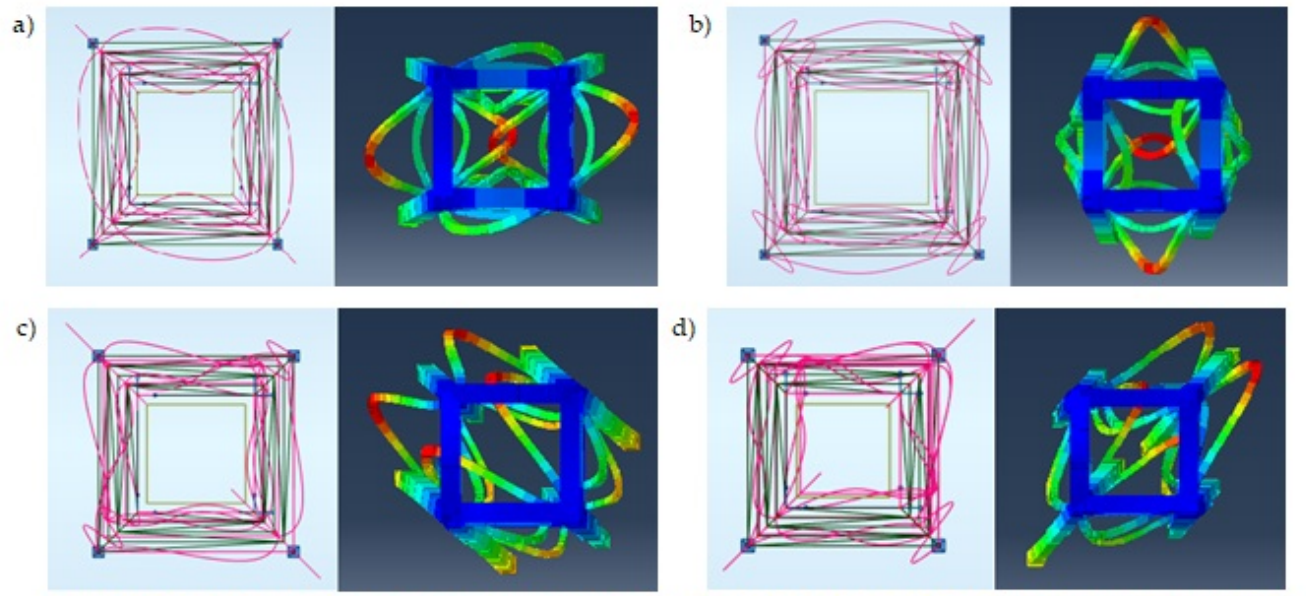
Rys. 9. Mapa naprężeń normalnych w programie Abaqus

Phoca PDF

Porównanie MODELI

Wyniki uzyskane na podstawie obydwu analiz wyboczeniowych w modelach numerycznych porównano ze sobą zestawiając wyznaczone siły krytyczne i postacie wyboczenia. Różnice w wartościach obciążeń krytycznych wynoszą od kilku do kilkunastu procent. Aby porównać postacie wyboczeniowe, pokazano je w rzucie z góry (rys. 10).

Phoca PDF



Rys. 10.Porównanie postaci wyboczeniowych (Robot, Abaqus): a) postać 1, b) postać 2, c) postać 3, d) postać 4.

Widać, że deformacje skojarzone z poszczególnymi postaciami wyboczenia są zbliżone, jednak nie identyczne. Występują pewne różnice jakościowe i ilościowe, które mogą wynikać np. z różnego sposobu przyłożenia obciążenia pionowego w

Phoca PDF

obydwu modelach. Zestawienie map naprężeń dla obydwu modeli wskazuje zgodnie, że newralgicznymi punktami są złącza elementów.

Odnosząc wyniki numeryczne do eksperymentu należy zauważyć, że największe naprężenia normalne pojawiają się w słupkach, a zniszczenie modelu eksperymentalnego wystąpiło właśnie w jednym z nich. Uszkodzenie pojawiło się mniej więcej w środku rozpiętości słupka, jednak mapy naprężeń wskazują, iż najbardziej wytężone są miejsca złącz. Należy jednak przyjąć, że z uwagi na nieuwzględnienie w modelach podatności węzłów, rozkład naprężeń w rzeczywistym modelu jest nieco inny, wobec czego uzyskanie zniszczenia poza złączem nie jest błędem.

Podsumowanie

Modelowanie elementów z drewna jest zagadnieniem bardzo skomplikowanym, ponieważ nie jest ono materiałem ani jednorodnym ani izotropowym. Co więcej, nie jest to także materiał liniowo-sprężysty. Jest to jeden z powodów rozbieżności pomiędzy wynikami doświadczalnymi a numerycznymi. Duży rozrzut pomiędzy wartością siły niszczącej w modelu eksperymentalnym a numeryczną siłą krytyczną może wynikać także z imperfekcji rzeczywistej konstrukcji. Dodatkowo, połączenia elementów nie są węzłami sztywnymi, a tak założono w modelach MES. Warto jednak zauważyć, że zniszczenie modelu doświadczalnego konstrukcji wieży nastąpiło w górnym przekroju słupka, czyli w miejscu wskazanym przez analizę teoretyczną jako jedno z najbardziej wytężonych.
Porównując wyniki obydwu analiz numerycznych można zauważyć, że ich wyniki pokrywają się. Kolejne otrzymane postacie wyboczeniowe z dwóch programów są zbliżone, różnice pomiędzy obciążeniami krytycznymi nie są znaczne. Dodatkowo, bardzo podobne są rozkłady naprężeń normalnych w mapach uzyskanych w obydwu programach, co wskazuje na poprawność przygotowania modeli.

Bibliografia

https://budujemydom.pl/budowlane-abc/budowa-krok-po-kroku/aktualnosci/14822-osmiokondygnacyjny-budynek-w-konstrukcji-z-drewna; dostęp: 12.04.2019.
https://pl.wikipedia.org/wiki/Ogorza%C5%82ka_we%C5%82nista; dostęp 20.03.2019.
https://oknoserwis.pl/art,2620,maszyny,akcesoria,.html; dostęp 16.04.2019.
Lis A., Lis P., Charakterystyka wytrzymałości drewna jako jego podstawowej właściwości mechanicznej, Zeszyty Naukowe Politechniki Częstochowskiej, seria Budownictwo, z. 19 (169), s. 77-86, 2013.
Wilczyński A., Gogolin M., Badanie właściwości sprężystych drewna sosny, buka i dębu, Zeszyty Naukowe Wyższej Szkoły Pedagogicznej w Bydgoszczy, Studia Techniczne 1989 z.15.
Bielewicz E., Wytrzymałość materiałów, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, 2013.
https://www.makeitfrom.com/material-properties/Balsa; dostęp: 28.03.2019.

Magdalena Knak, Andrzej Modrzejewski
Budownictwo, I stopień, VI semestr, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska,

Politechnika Gdańska

Opiekun Naukowy: mgr inż. Erwin Wojtczak



Portal edroga.pl był patronem medialnym tego wydarzenia.

Phoca PDF