



Fundusze
Europejskie
Program Regionalny



Pomorze
Zachodnie

Unia Europejska
Europejskie Fundusze
Strukturalne i Inwestycyjne



Załącznik nr 1

do projektu pn. „Badania przemysłowe i prace rozwojowe nad opracowaniem innowacyjnych konstrukcji wsporczych dla urządzeń drogowych spełniających wysokie standardy w zakresie bezpieczeństwa biernego słupów oświetleniowych i sygnalizacyjnych.”

Mierzyn, 2021



**Zachodniopomorski
Uniwersytet Technologiczny
w Szczecinie**



**Wydział
Inżynierii Mechanicznej
i Mechatroniki**

Raport

Temat:

Badania modelowe z zastosowaniem metody MES (Metoda Elementów Skończonych) oraz weryfikacyjne badania doświadczalne wsporczych urządzeń drogowych - słupów oświetleniowych i sygnalizacyjnych, we wskazanych obszarach statyki i dynamiki konstrukcji.

Praca wykonana na podstawie zamówienia nr 515 – 06 – 011 – 8637 – 05/15 z dnia
30.08.2019r. dla:

MABO Sp. z o.o. 72-006 Mierzyn k/Szczecina, ul. Spółdzielców 8A

Kierownik:


Beata Niesterowicz


DZIEKAN
Wydziału Inżynierii
Mechanicznej i Mechatroniki
prof. dr hab. inż. Mirosław Pajor

Wykonawcy:

Paweł Dunaj

Michał Dołata

Bartłomiej Szymczak

Joanna Jastrzębska

Marcin Chodźko

Szczecin, 6.09.2019

1. Spis treści

1. Spis treści	2
2. Wstęp	3
3. Analizy CAx podzespołów wsporczych urządzeń drogowych	3
3.1. Metoda modelowania	3
3.2. Opracowanie modeli CAD podzespołów wsporczych urządzeń drogowych słupów oświetleniowych i sygnalizacyjnych.....	5
3.3. Opracowanie modeli MES podzespołów nowej rodziny wsporczych urządzeń drogowych słupów oświetleniowych i sygnalizacyjnych.	7
3.4. Analizy wsporczych urządzeń drogowych w zakresie dynamiki konstrukcji.....	23
4. Opracowanie projektu oraz wykonanie stanowiska badawczego do symulacji warunków kolizji ze wsporczym urządzeniem drogowym	39
4.1. Konstrukcja stanowiska badawczego	40
4.2. Rejestracja i akwizycja danych pomiarowych	44
5. Spis ilustracji	49
6. Literatura.....	50

2. Wstęp

Słupy oświetleniowe odgrywają ważną rolę w ruchu drogowym i muszą być umieszczane w pobliżu drogi. Jeżeli nie są one odpowiednio zaprojektowane, wyprodukowane i zainstalowane prawidłowo, mogą one stanowić potencjalne zagrożenie dla pasażerów pojazdów w przypadku ich zderzenia z konstrukcją wsporczą lampy oświetleniowej. Konstrukcje te oprócz wytrzymałości na ciężar własny, muszą być odpowiednio wytrzymałe na działanie czynników zewnętrznych takich jak wiatr czy śnieg. Z drugiej strony konstrukcje te muszą być odpowiednio osłabione tak, aby w momencie uderzenia pojazdu uniknąć ekstremalnych przeciążeń pasażerów. W związku z tym projektuje się słupy, które ulegają zerwaniu lub odpowiedniemu zniekształceniu w momencie uderzenia. Norma PN EN 12767 przewiduje stosowanie konstrukcji trzech typów: NE (niepochłaniających energii), LE (pochłaniających energię w niskim stopniu) oraz HE (pochłaniających energię w stopniu wysokim). Wspomniana norma określa również warunki i zachowania słupa podczas obligatoryjnych testów zderzeniowych. Ze względu na zniszczenia, jakie powstają podczas takich testów, korzystnym jest przeprowadzenie badań modelowych pozwalających na wstępną weryfikację parametrów konstrukcji. Raport przedstawia wyniki badań modelowych właściwości statycznych oraz dynamicznych słupów bezpiecznych z użyciem metody elementów skończonych. W drugiej części raportu przedstawiono zaprojektowane stanowisko do badań dynamicznego zrywania słupów, wykonanego w celu wstępnej oceny zaproponowanych konstrukcji.

3. Analizy CAx podzespołów wsporczych urządzeń drogowych

Na tym etapie przeprowadzono analizy CAx z zastosowaniem techniki obliczeniowej metody elementów skończonych w celu uzyskania parametrów mechanicznych podzespołów wsporczych urządzeń drogowych słupów oświetleniowych i sygnalizacyjnych.

3.1. *Metoda modelowania*

Modelowanie właściwości statycznych i dynamicznych słupa zrealizowano z użyciem klasycznej metody elementów skończonych (MES). Metoda ta jest metodą aproksymacji równań różniczkowych, które wraz z warunkami brzegowymi stanowią matematyczny model pewnego procesu lub stanu układu fizycznego. Istotą metody jest podział obszaru obliczeniowego na podobszary o prostych kształtach, zwane elementami skończonymi. Rozwiązanie modelu matematycznego, opisanego z użyciem równań różniczkowych, uzyskuje się w tzw. węzłach – wierzchołkach elementów skończonych (w niektórych typach elementów skończonych węzły mogą być umieszczone również na bokach i w ich

wnętrzu).

Do opisu rozkładu analizowanej wielkości fizycznej wewnątrz elementu skończonego wykorzystuje się funkcje interpolujące wartości wielkości węzłowych, zwane funkcjami kształtu. Na podstawie funkcji kształtu, zdefiniowanych w poszczególnych elementach skończonych, buduje się funkcje bazowe określone na całym obszarze obliczeniowym. Następnie, z zastosowaniem odpowiednich funkcji wagowych, dokonuje się transformacji modelu opisanego za pomocą równań różniczkowych do modelu zapisanego w postaci układu równań algebraicznych. Rozwiązanie problemu mechaniki konstrukcji z użyciem metody elementów skończonych sprowadza się zatem do rozwiązania układu równań liniowych, zbudowanego najczęściej z macierzy rzadkich. W ogólności równanie ruchu modelu dyskretnego układu fizycznego przyjmuje następującą postać:

$$M\ddot{q}(t) + C\dot{q}(t) + Kq(t) = f(t) \quad (1)$$

gdzie: M, C, K – odpowiednio macierze bezwładności, tłumienia i sztywności modelu, $\ddot{q}, \dot{q}, q$ – odpowiednio wektory uogólnionych przyspieszeń, prędkości oraz przemieszczeń węzłów modelu, f – wektor sił zredukowanych do węzłów modelu.

Metoda elementów skończonych nierozdzielnie związana jest z oprogramowaniem komputerowego wspomagania prac inżynierskich – CAE. W oprogramowaniu CAE kolejne etapy analizy z użyciem MES zrealizowano z użyciem następujących modułów:

1° Preprocesor:

- definiowanie modelu geometrycznego – odwzorowanie geometrii analizowanej konstrukcji;
- dyskretyzacja modelu geometrycznego – budowa siatki elementów skończonych o odpowiedniej gęstości, składającej się z elementów określonego typu;
- nałożenie warunków brzegowych – zdefiniowanie sposobu utwierdzenia, miejsca przyłożenia obciążenia, naprężeń lub przemieszczeń wstępnych.

2° Procesor:

- rozwiązanie zadania – przygotowanie zdefiniowanego w module preprocesora modelu (generowanie funkcji kształtu, wyznaczenie macierzy opisujących model konstrukcji, budowa układu równań etc.) oraz realizacja obliczeń z wykorzystaniem zaimplementowanych metod numerycznych.

3° Postprocesor:

- wizualizacja wyników – przedstawienie zestawu danych liczbowych, uzyskanych w wyniku rozwiązania zadania, w formie graficznej np. w postaci odkształconego modelu konstrukcji z naniesioną mapą przemieszczeń.

W następnym kroku dokonano wyboru matematycznego modelu tłumienia celem opisanie zdolności słupa do rozpraszania energii drgań. Analizie poddano model sztywnościowo-bezwładnościowy Rayleigha (Chowdhury i Dasgupta, 2003; Liu i Gorman, 1995) oraz model tłumienia strukturalnego wyrażony poprzez tzw. sztywność zespoloną (Holanda et al., 2014; Neumark, 1962). Różnice wynikające z zastosowania poszczególnych modeli okazały się nieznaczne. Dlatego też, do opisu właściwości tłumiących modelowanego słupa zastosowano model tłumienia strukturalnego, zgodnie z którym macierz tłumienia C można wyrazić jako:

$$C = i\eta K \quad (2)$$

gdzie: i – jednostka urojona, η – współczynnik strat.

Stąd równanie ruchu belki przyjmuje postać:

$$M\ddot{q}(t) + (K + C)q(t) = f(t) \quad (3)$$

lub:

$$M\ddot{q}(t) + (1 + i\eta)Kq(t) = f(t) \quad (4)$$

przy czym:

$$q(t) = \text{col}\{q_1(t), q_2(t) \dots q_k(t)\} \quad (5)$$

gdzie:

$$q_j(t) = \text{col}\{x_j(t), y_j(t), z_j(t)\}, i = 1, \dots, k \quad (6)$$

gdzie: $x_j(t), y_j(t), z_j(t)$ – odpowiednio przemieszczenia na kierunkach x, y, z ; k – liczba węzłów modelu.

3.2. *Opracowanie modeli CAD podzespołów wsporczych urządzeń drogowych słupów oświetleniowych i sygnalizacyjnych*

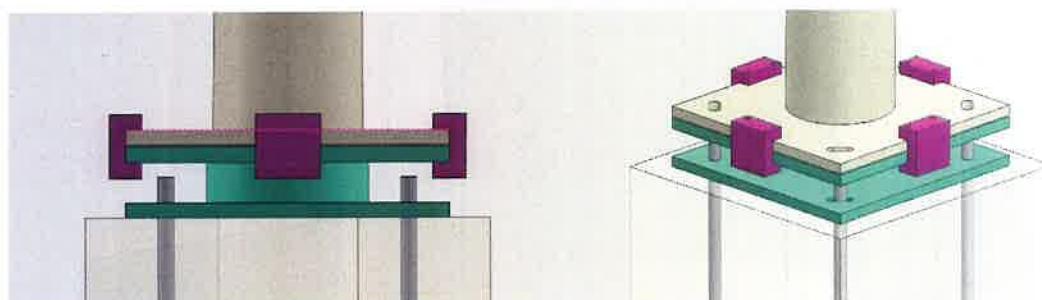
Zadanie obejmowało wykonanie geometrycznych modeli CAD podzespołów wsporczych urządzeń drogowych dla trzech typów słupów: NE, LE oraz HE.

Wykonane podzespoły:

- Zespół kotwiący
- Stalowe maszty
- Wsporniki
- Wysięgniki do mocowania naświetlaczy, opraw oświetleniowych, itp.

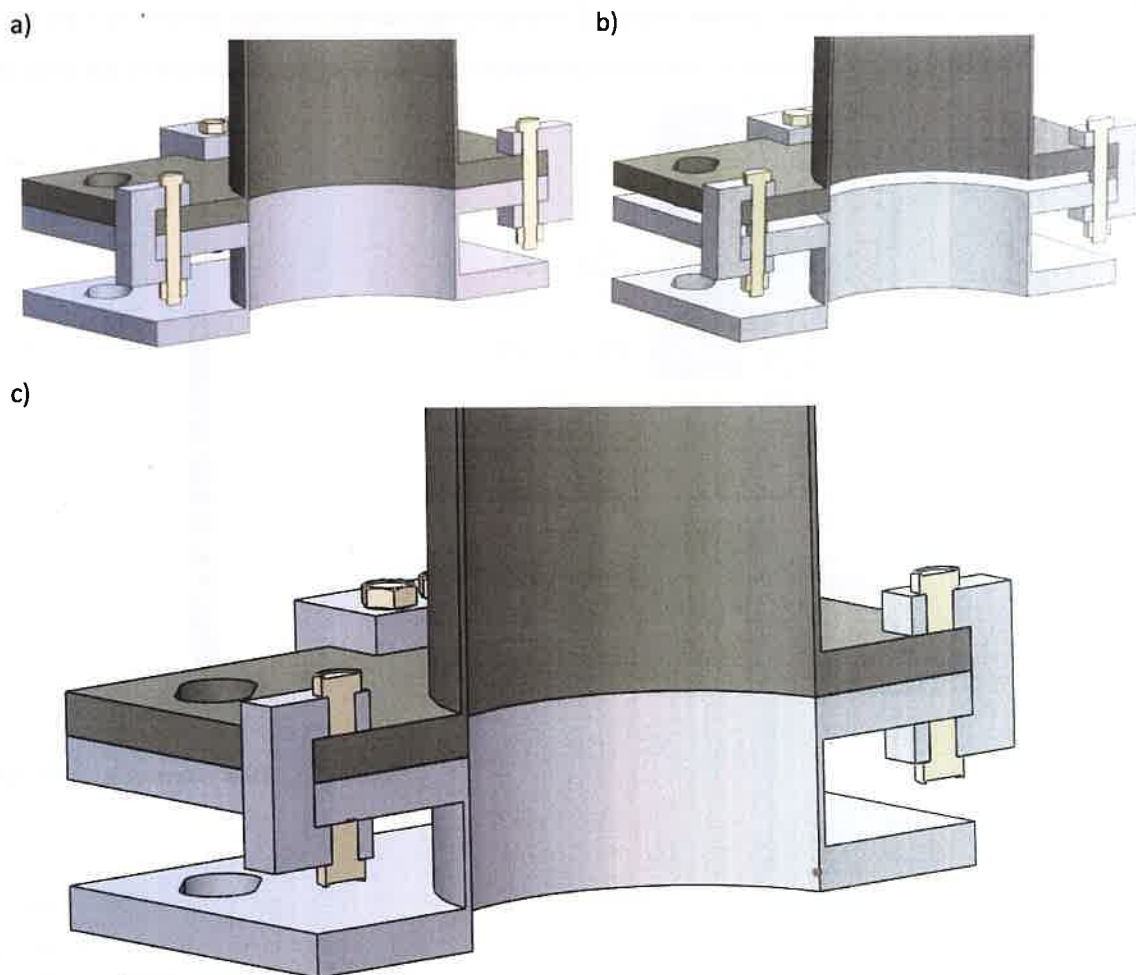
Wszystkie słupy zostały tak przemyślane, aby miały ten sam sposób mocowania do fundamentu. W przypadku słupów NE oraz LE występuje dodatkowa „wkładka” natomiast słup HE jest mocowany bezpośrednio do fundamentu. Na etapie koncepcyjnym dla każdego

rodzaju słupa zostały opracowane po jednym rozwiązaniu konstrukcyjnym. Konstrukcja wsporcza niepochłaniająca energii polega na zastosowaniu wkładki dystansującej. Z jednej strony przymocowana jest do fundamentu, natomiast z drugiej za pomocą zacisków mocowana jest konstrukcja słupa [Rys. 1]. Wkładka ta w momencie uderzenia samochodu w konstrukcję powinna ulec zniszczeniu. Rozwiązanie dla słupa HE polega na zastosowaniu blachy cienkościennej dla całej konstrukcji `wsporczej. Natomiast rozwiązanie LE jest połączeniem obydwu rozwiązań przy doborze odpowiednich parametrów.



Rys. 1 Mocowanie słupów NE oraz LE.

Rozważane rozwiązania konstrukcyjne zostały wytypowane na poprzednim etapie realizacji projektu i zaprezentowane autorom niniejszych analiz w formie koncepcyjnej. Na podstawie dostarczonych informacji wykonano modele przestrzenne poszczególnych koncepcji. Na Rys. 2 przedstawiono poddane analizom koncepcje połączenia słupów NE oraz LE do fundamentu.

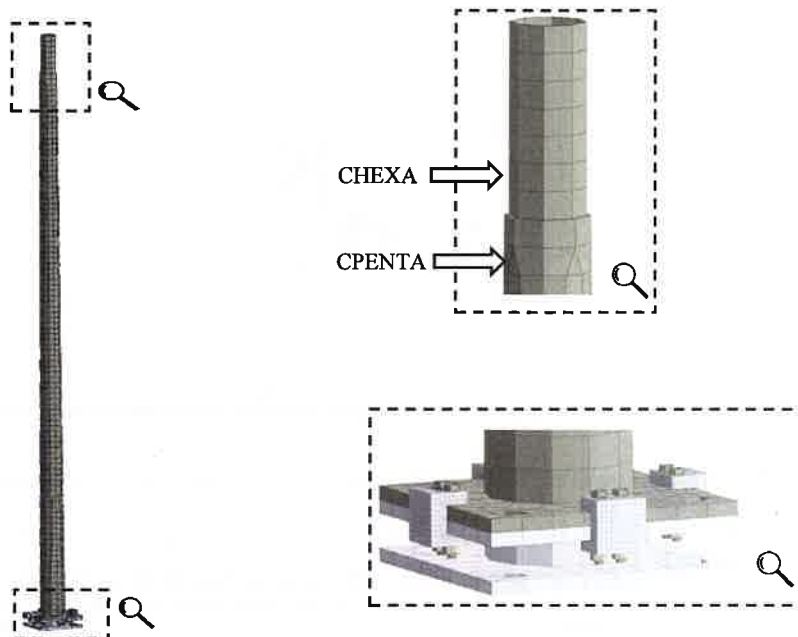


Rys. 2 Rozważane koncepcje połączenia konstrukcji słupa z fundamentem: a) zaciski ściśnięte dwoma śrubami, b) zaciski ściśnięte dwoma śrubami z tulejką, c) zaciski dociśnięte dwoma śrubami

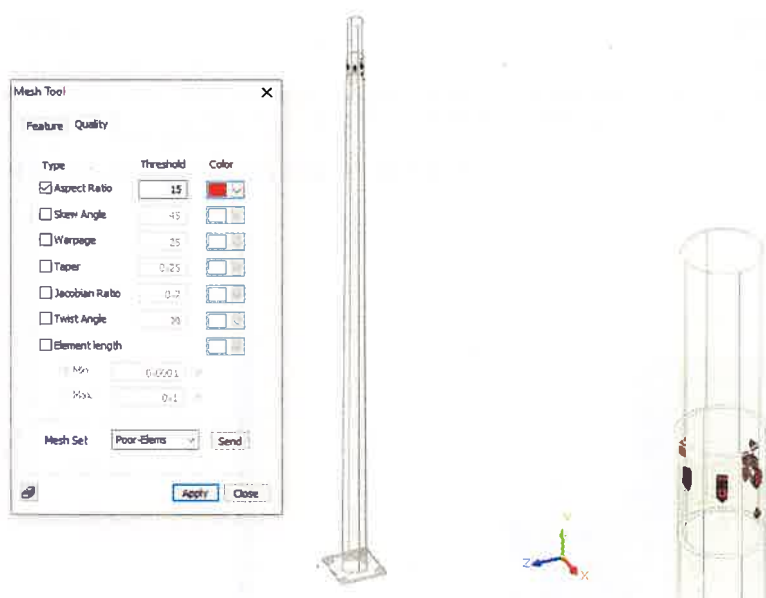
3.3. Opracowanie modeli MES podzespołów nowej rodziny wsporczych urządzeń drogowych słupów oświetleniowych i sygnalizacyjnych.

Na podstawie przyjętych założeń, z zastosowaniem preprocesora Midas NFX (Midas, 2011), przeprowadzono dyskretyzację modelu geometrycznego. Podziału obszaru obliczeniowego dokonano z użyciem ośmiowęzłowych, sześciennych, izoparametrycznych elementów skończonych CHEXA oraz sześciowęzłowych, pięciościennych, izoparametrycznych elementów CPENTA. Zastosowane elementy skończone charakteryzowały się liniowymi funkcjami kształtu oraz trzema translacyjnymi stopniami swobody w każdym węźle. W procesie dyskretyzacji zastosowano siatkę strukturalną. Budowę siatki wspomagano analizą jej jakości rozpatrując współczynnik kształtu oraz nachylenia dla konstrukcji wsporczej słupa HE [Rys. 4] oraz słupów LE i NE z wkładką dystansującą [Rys. 5]. Podsumowując, opracowany model składał się z 102 075 elementów i miał 216 252 stopni swobody; model dyskretny słupa pokazano na Rys. 3. Kontakt pomiędzy poszczególnymi komponentami zdefiniowano jako kontakt powierzchnia do powierzchni typu *bez penetracji*. Zastosowany model kontaktu pozwala na

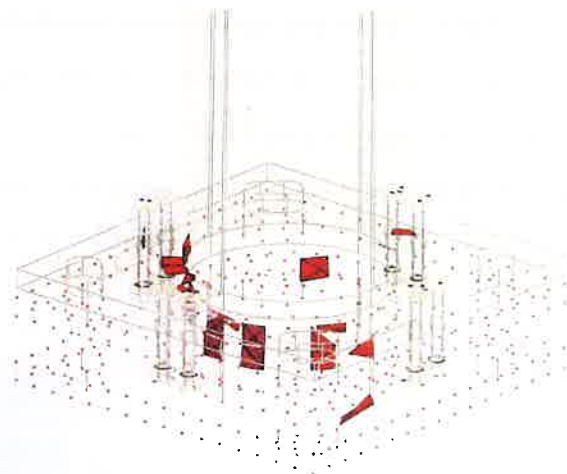
stosunkowo wierne odwzorowanie rzeczywistych połączeń występujących w konstrukcji spełniając dodatkowo podstawowe założenia analizy modalnej o liniowej sztywności analizowanego modelu.



Rys. 3 Model dyskretny słupa



Rys. 4 Sprawdzenie jakości siatki konstrukcji wsporczej słupów HE



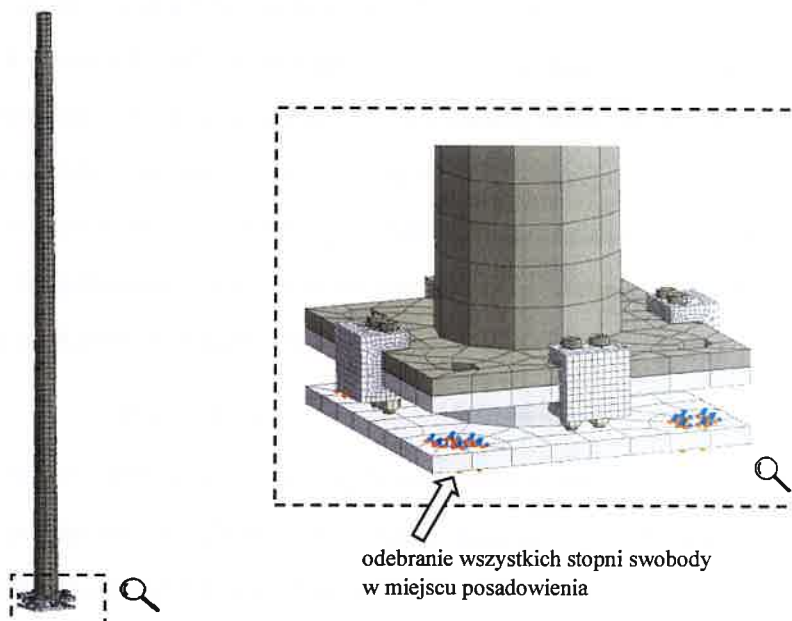
Rys. 5 Sprawdzenie jakości siatki konstrukcji wsporczej słupów z wkładką dystansową (NE i LE)

Wartości właściwości materiałowych zastosowane podczas budowy macierzy M, C, K przedstawiono w tabeli (Tab. 1).

Tab. 1. Wartości własności materiałowych przyjętych do budowy modelu

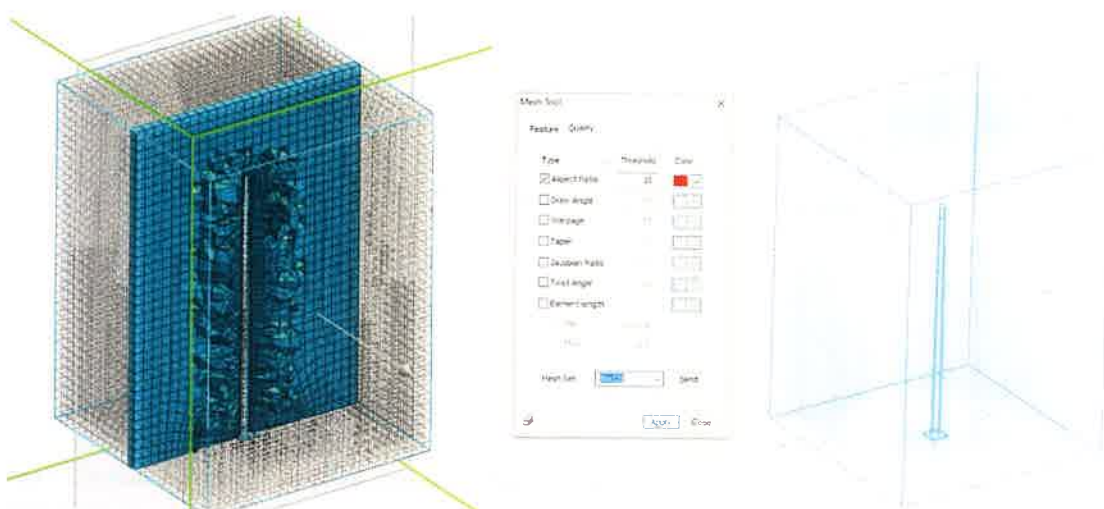
Własność	Wartość
Moduł sprężystości podłużnej E	210 GPa
Liczba Poissona ν	0,28
Gęstość ρ	7700 kg/m ³
Współczynnik strat η	0,0022

Utwierdzenie konstrukcji zostało zamodelowane poprzez odebranie wszystkich stopni swobody w miejscu posadowienia słupa jak na Rys. 6.



Rys. 6 Sposób utwierdzenia słupa

W celu określenia wytrzymałości konstrukcji pod naporem wiatru skorzystano z modułu CFD. Zdefiniowano więc pewien obszar otoczenia słupa, tak aby posiadał właściwości odpowiadające podmuchom wiatru. Następnie obszar ten również poddano dyskretyzacji. Analogicznie jak przy konstrukcji słupa, budowę siatki wspomagano analizą jej jakości rozpatrując współczynnik kształtu oraz nachylenia.



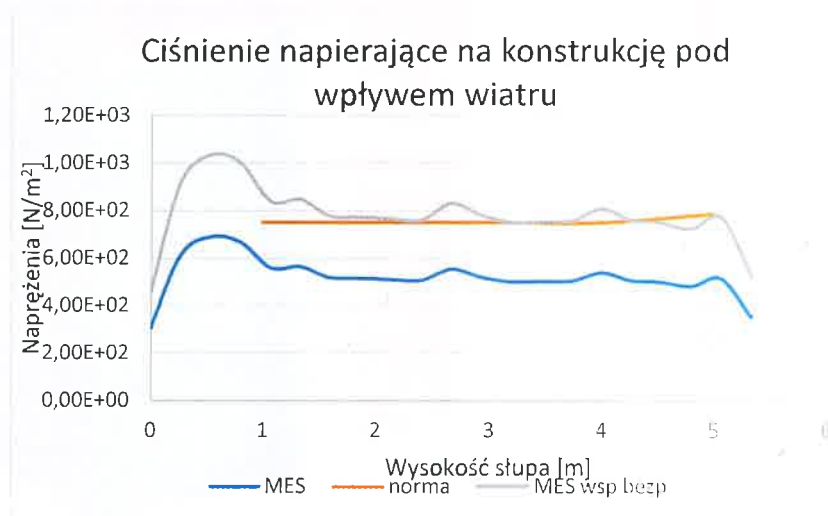
Rys. 7 Model dyskretny otoczenia słupa

Według obecnie obowiązujących przepisów przeprowadzając analizy wytrzymałościowe konstrukcji wsporczych słupów oświetleniowych dla stanu normalnej eksploatacji wpływ wiatru należy brać pod uwagę na podstawie relacji analitycznych zawartych w normie [6]. Przeprowadzanie analiz na podstawie tego standardu wymaga znajomości wielu czynników dotyczących na przykład ekspozycji, topografii itp. Przepisy te pozwalają obliczyć siłę wiatru w zależności od wysokości nad ziemią oraz ciśnienia wynikającego z obciążenia śniegiem. Ze względu na stosunkowo małą powierzchnię na której śnieg mógłby zalegać obliczenia obciążeń wynikających z zalegającego śniegu zostały pominięte w dalszych analizach. Oczekiwane średnie ciśnienie obliczono w przybliżeniu przy użyciu wzoru:

$$q(z) = \delta * \beta * f * c_e(z) * q(10) \left[\frac{N}{m^2} \right] \quad (7)$$

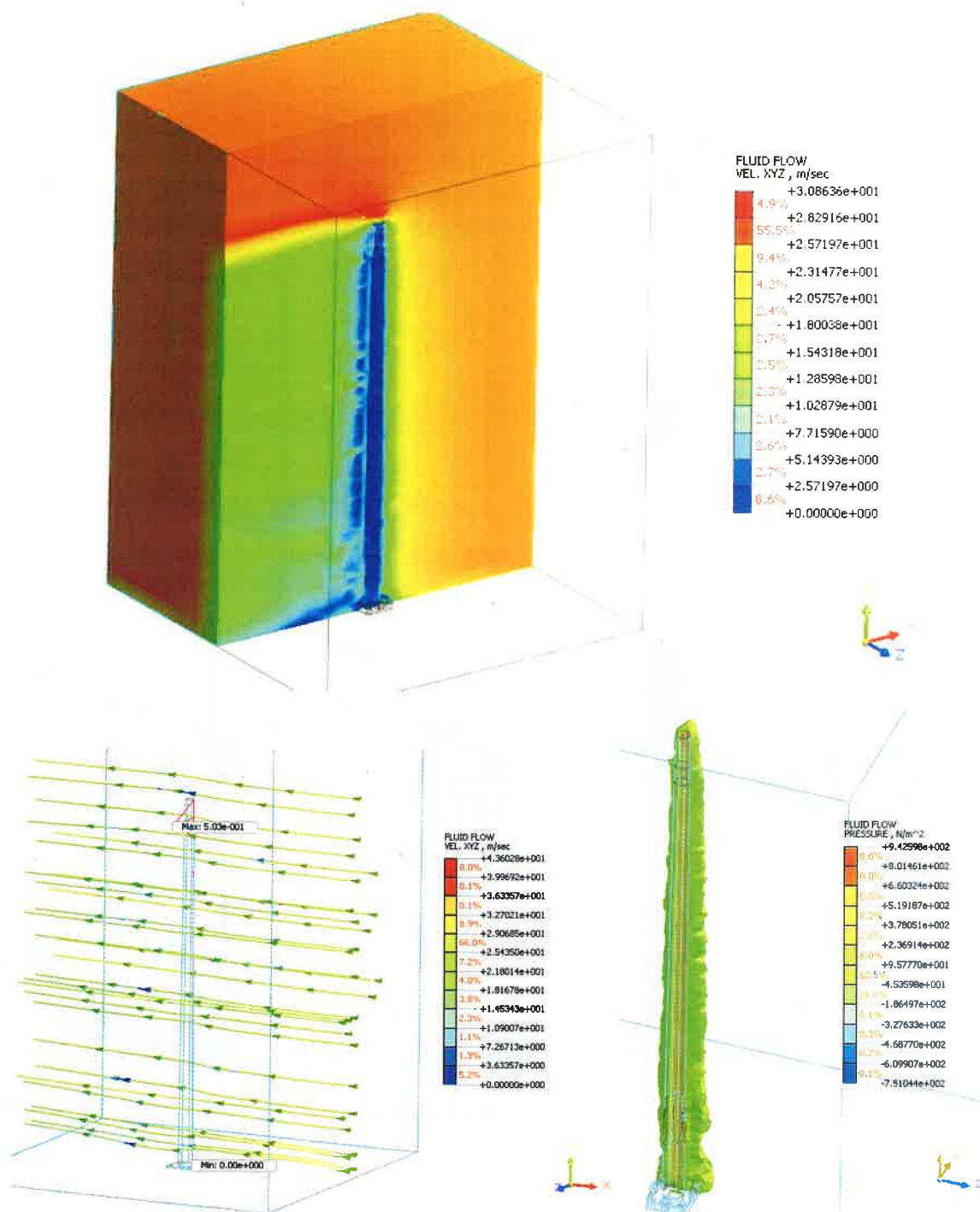
gdzie δ jest współczynnikiem odnoszącym się do wysokości konstrukcji (dla $h \approx 8,5$ m $\delta = 0,915$), $\beta \approx 1,31$ jest współczynnikiem zachowania dynamicznego, $f = 1$ jest współczynnikiem związanym z topografią, $c_e(z)$ jest współczynnikiem zależnym od terenu otoczenia konstrukcji oraz wysokości nad ziemią (z) natomiast $q(10)$ jest referencyjnym ciśnieniem wiatru, które uwzględnia położenie geograficzne słupa. Ze względu na fakt, że wartości ciśnienia określone

na podstawie normy wynoszą około 800 N/m² i są zbliżone do wartości określonych na podstawie analizy numerycznej (uwzględniającej odpowiedni współczynnik bezpieczeństwa) [Rys. 8], warunki obciążenia wiatrem dla poszczególnych rozwiązań konstrukcyjnych określono za pomocą symulacji numerycznej.

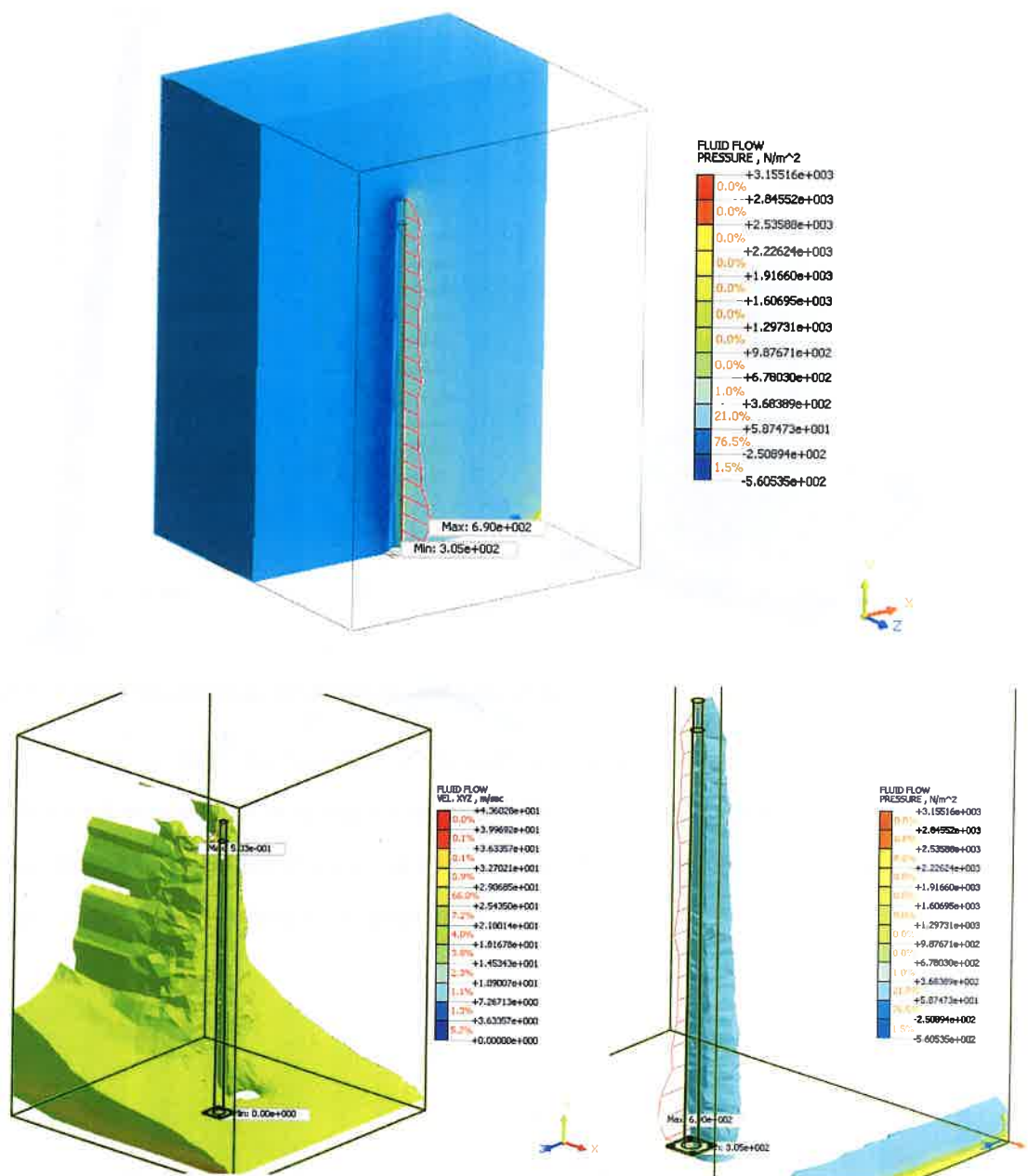


Rys. 8 Ciśnienie napierające na konstrukcję pod wpływem wiatru

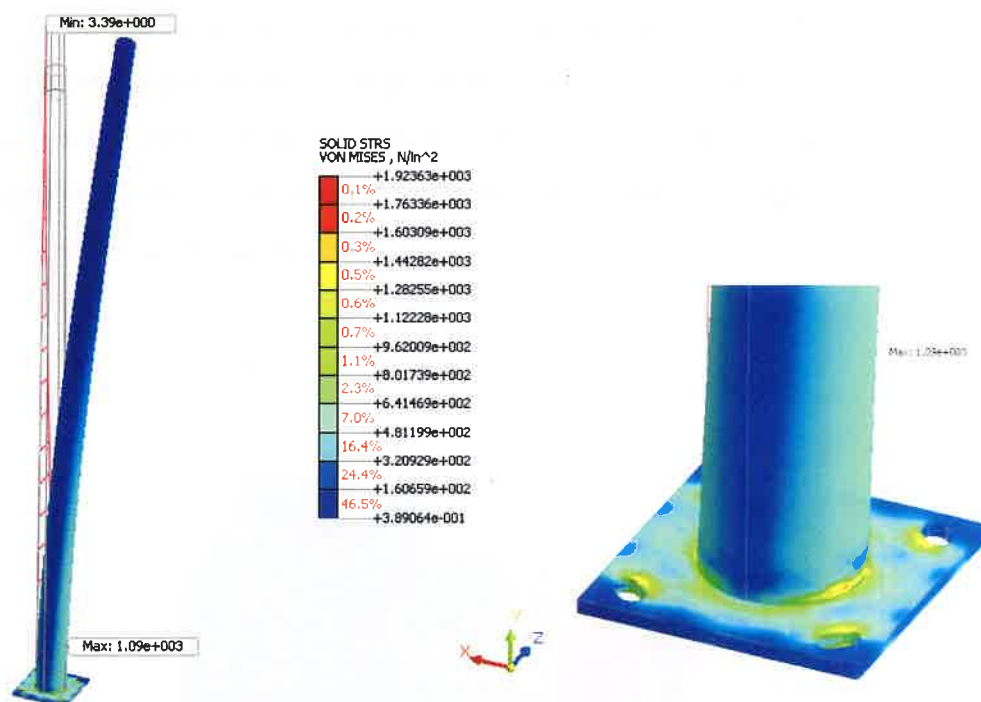
Do celów niniejszej analizy przyjęto założenie, że obiekty były narażone na trudne warunki wiatrowe występujące na terenie Polski, czyli prędkości wiatru do 26 m/s [1]. Analizę wiatru przeprowadzono w module Analizy Przepływu (CFD) programu Midas NFX [7]. W celu ustalenia rozkładów ciśnienia działających na powierzchnie elementów konstrukcji zasympulowano odpowiedni jednokierunkowy przepływ wiatru. Rys. 9 pokazuje kierunek strumieni wiatru oddziałującego na obiekt, Rys. 10 rozkład ciśnienia naporu wiatru oraz Rys. 11 naprężenia występujące w konstrukcji obciążonej wiatrem.



Rys. 9 Kierunek przepływu wiatru

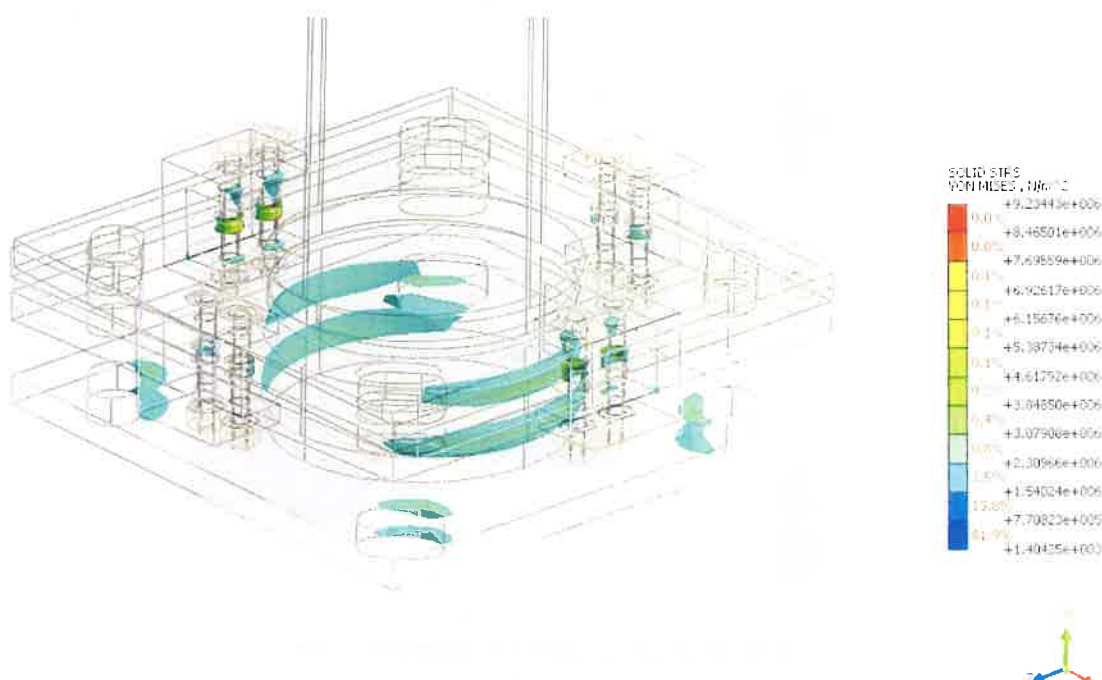


Rys. 10 Rozkład ciśnienia naporu wiatru na słup standardowy



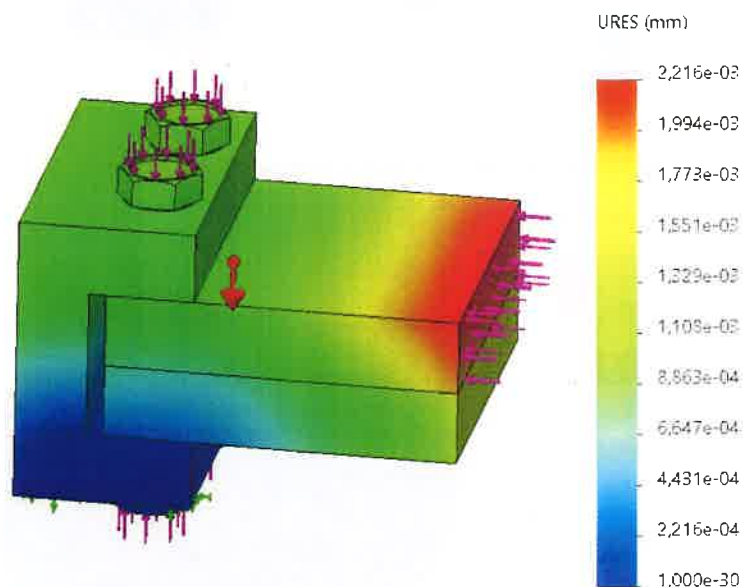
Rys. 11 Rozkład naprężeń słupa standardowego pod naporem wiatru

Przedstawiony tok postępowania przeprowadzono również względem podzespołów konstrukcji wsporczych w kolejnych analizach, których wyniki przedstawiono w tym rozdziale oraz dla wszystkich konstrukcji nowej rodziny słupów bezpiecznych, dla których wyniki zaprezentowano i omówiono w rozdziale 4.

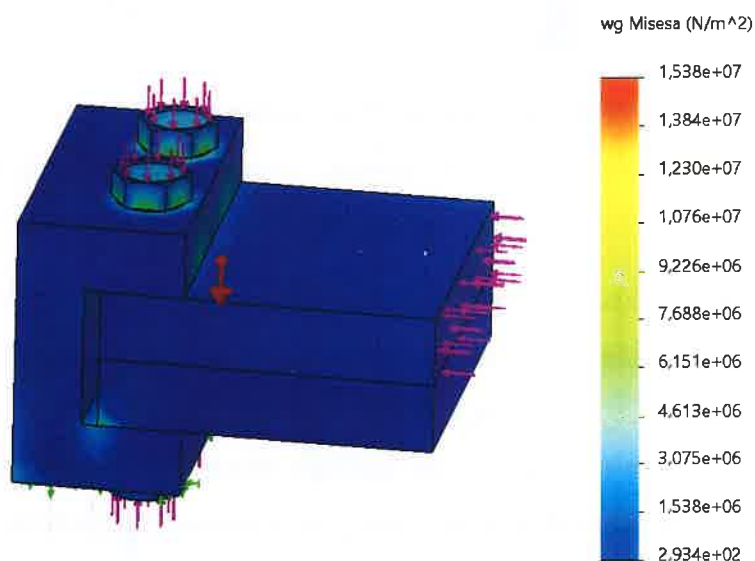


Rys. 12 Naprężenia maksymalne konstrukcji pod działaniem naporu wiatru, koncepcja druga

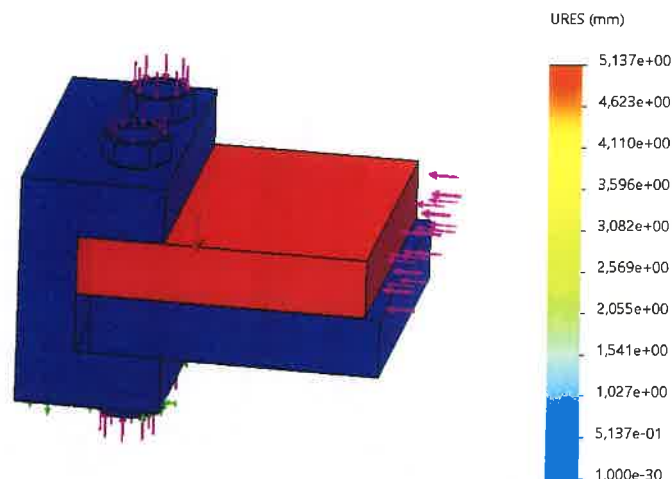
Jednak w pierwszej kolejności wykonano analizy podzespołu zacisku w celu weryfikacji parametrów połączenia tarcowego. Model połączenia powinien zakładać, że siła zacisku śrub powinna być na tyle duża, aby przy małych wartościach siły (obciążenie w trakcję normalnej eksploatacji) połączenie było nierozłączne, natomiast przy większej wartości (uderzenie samochodu) zacisk „puszczał”.



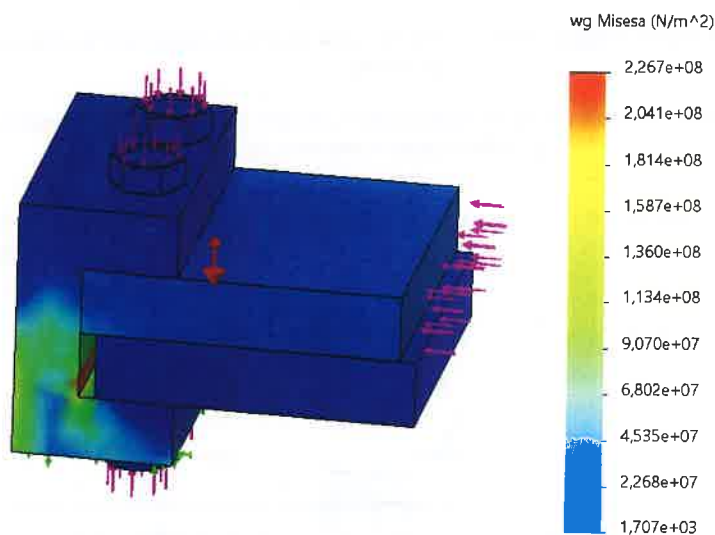
Rys. 13 Przemieszczenia w modelu zacisku dla siły 2000N



Rys. 14 Naprężenia w modelu zacisku dla siły 2000N



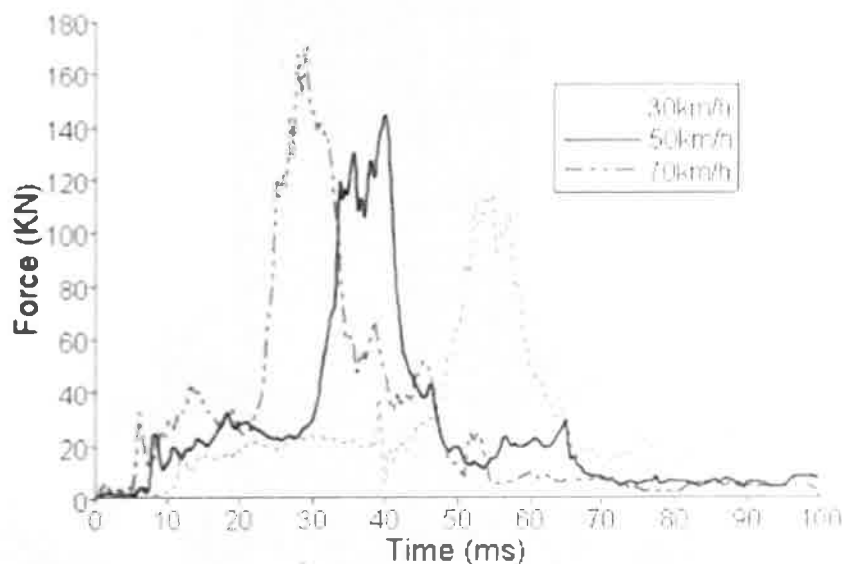
Rys. 15 Przemieszczenia w modelu zacisku dla siły 50000N



Rys. 16 Naprężenia w modelu zacisku dla siły 50000N

Na dalszym etapie przeprowadzono analizy wytrzymałości statycznej dla trzech przedstawionych koncepcji. Wyniki tych analiz przedstawiono na kolejnych wykresach.

Kolejnym etapem było przeprowadzenie badań wytrzymałościowych w zakresie statyki dla podzespołów nowej rodziny w przypadku zderzenia samochodu z podstawą słupa. Ze względu na to, że na tym etapie nie zostały przeprowadzone jeszcze żadne badania doświadczalne umożliwiające określenie przybliżonej wartości siły wynikającej z uderzenia samochodu, przeprowadzono analizę literaturową w celu znalezienia podobnego przypadku. W dalszych analizach posłużono się wynikami badań uzyskanymi przez autorów pracy [7] przedstawionymi na Rys. 17 oraz Tab. 2.

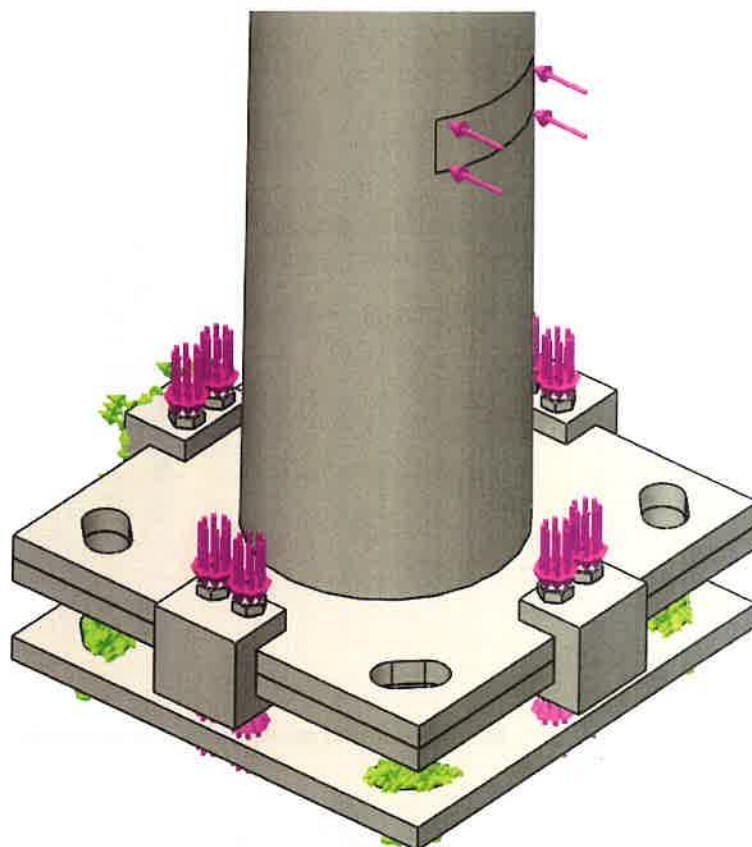


Rys. 17 Zmiana wartości siły niszczącej konstrukcję słupa dla trzech różnych prędkości pojazdu w momencie uderzenia, źródło: [7]

Tab. 2 Wartości odpowiednio: wgniecenia pojazdu, maksymalnej siły przy uderzeniu, czasu zniszczenia, całkowitej pochłoniętej energii, źródło: [7]

Impact velocity (km/h)	car intrusion (mm)	max impact force (kN)	failure time (ms)	total energy Absorbing (kJ)
30	475	116.5	52.3	27.9
50	502	144.7	33.6	35.1
70	541	169.9	25.1	54.4

Każda z rozważanych koncepcji została zamodelowana i obciążona siłą zastępczą o wartości zgodnej z przedstawionymi w Tab. 2 w miejscu uderzenia pojazdu. Dla wszystkich koncepcji zamodelowano obciążenie siłą odpowiadającą uderzeniu pojazdu jadącego z prędkościami 30, 50 oraz 70 km/h. Ponadto koncepcja trzecia (Rys. 2c) została dodatkowo obciążona siłami przyłożonymi do łbów śrub, dociskających elementy zaciskowe do podstawy słupa. Siła przyłożona do każdej ze śrub to 2kN a jej wartość została wyznaczona na podstawie maksymalnego momentu dokręcenia śrub. Modele zostały utwierdzone w miejscach mocowania do fundamentu. Natomiast kontakt między wszystkimi komponentami zamodelowano jako *bez penetracji*, tzn. umożliwiający ruch pomiędzy płaszczyznami ze współczynnikiem tarcia statycznego równym 0.78. Dla wszystkich elementów zastosowano stal konstrukcyjną S235 o właściwościach wytrzymałościowych przedstawionych w Tab. 3.

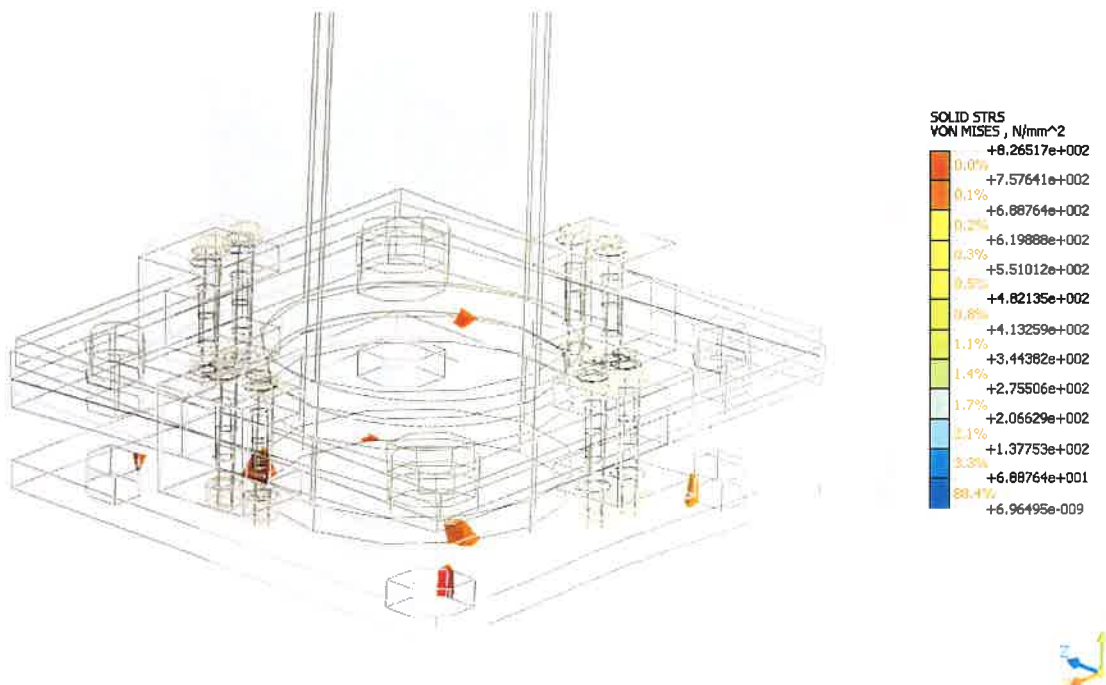


Rys. 18 Umocowania oraz obciążenia koncepcji trzeciej z Rys. 2c

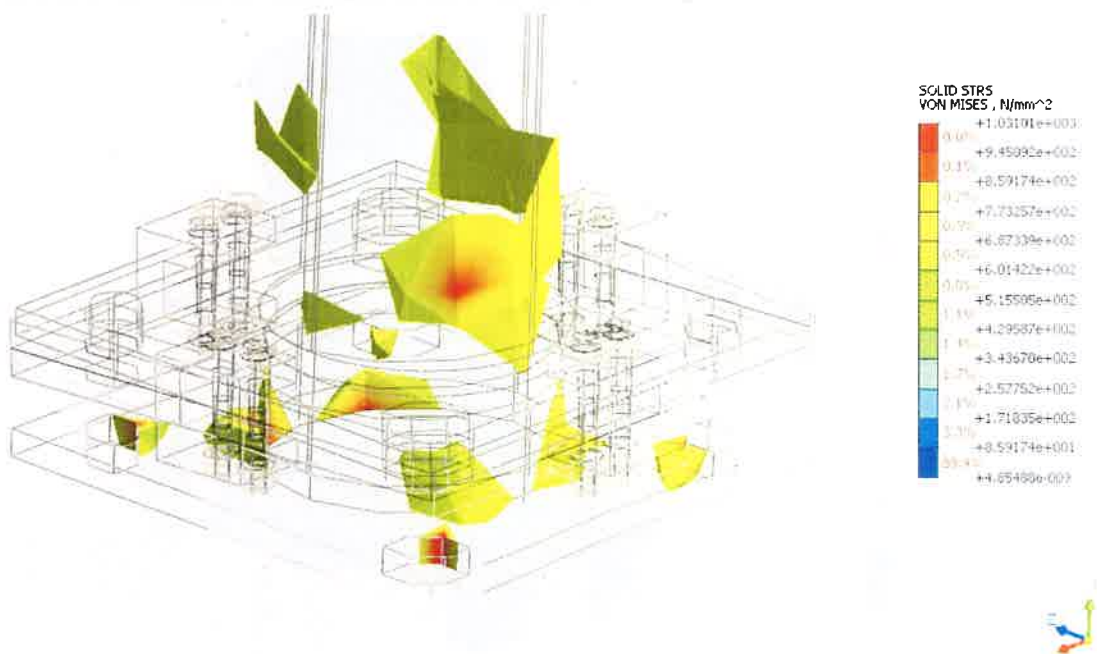
Tab. 3 Właściwości wytrzymałościowe stali konstrukcyjnej S235

Własność	Wartość
Moduł sprężystości podłużnej E	210 GPa
Liczba Poissona ν	0,28
Gęstość ρ	7700 kg/m ³
Granica plastyczności R_e	235 MPa
Granica doraźnej wytrzymałości R_m	410 MPa

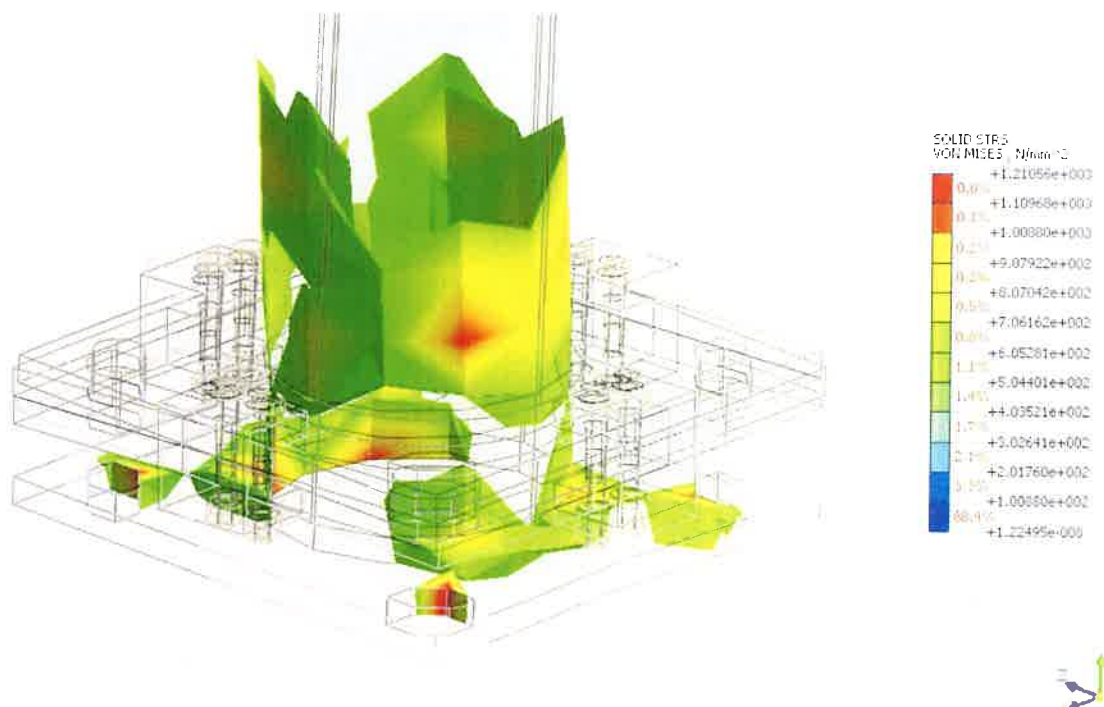
Pierwszy etap analiz polegał na wytypowaniu najlepszego rozwiązania mocowania słupów NE oraz LE do fundamentu. Rozważono 3 przedstawione wcześniej koncepcje, natomiast wyniki zaprezentowano na kolejnych rysunkach. Dla wszystkich wariantów przeprowadzono analizy dla trzech poziomów siły odpowiadających trzem prędkościom samochodu 30, 50 oraz 70 km/h.



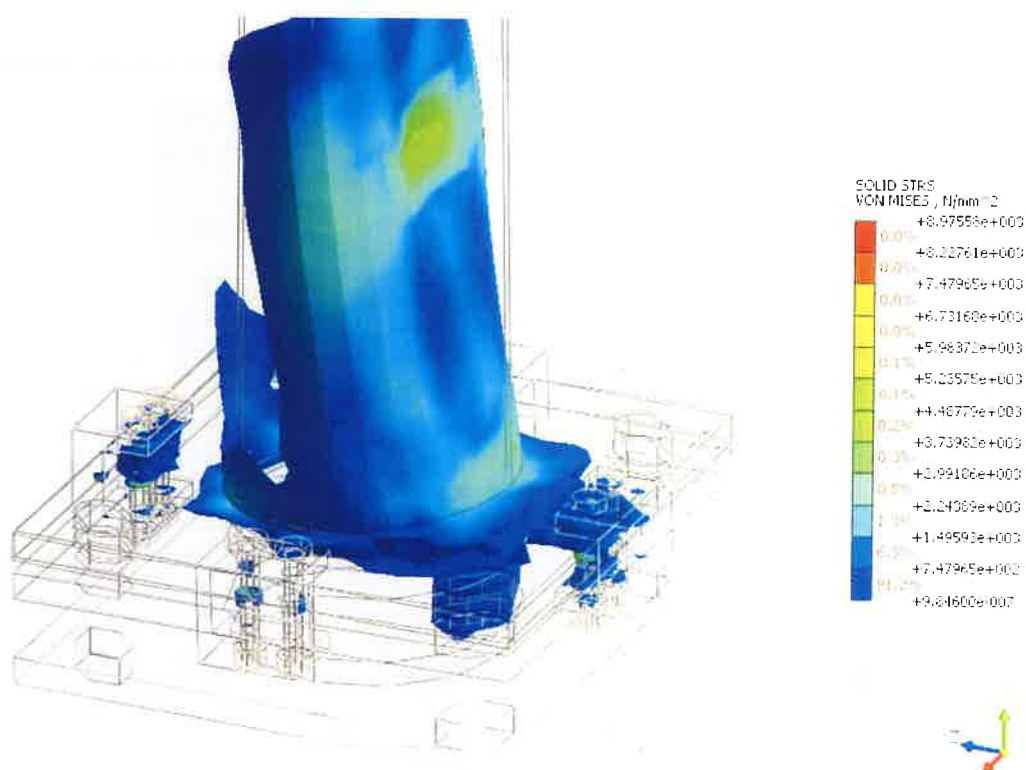
Rys. 19 Naprężenia maksymalne koncepcja pierwsza siła równa 116.5kN



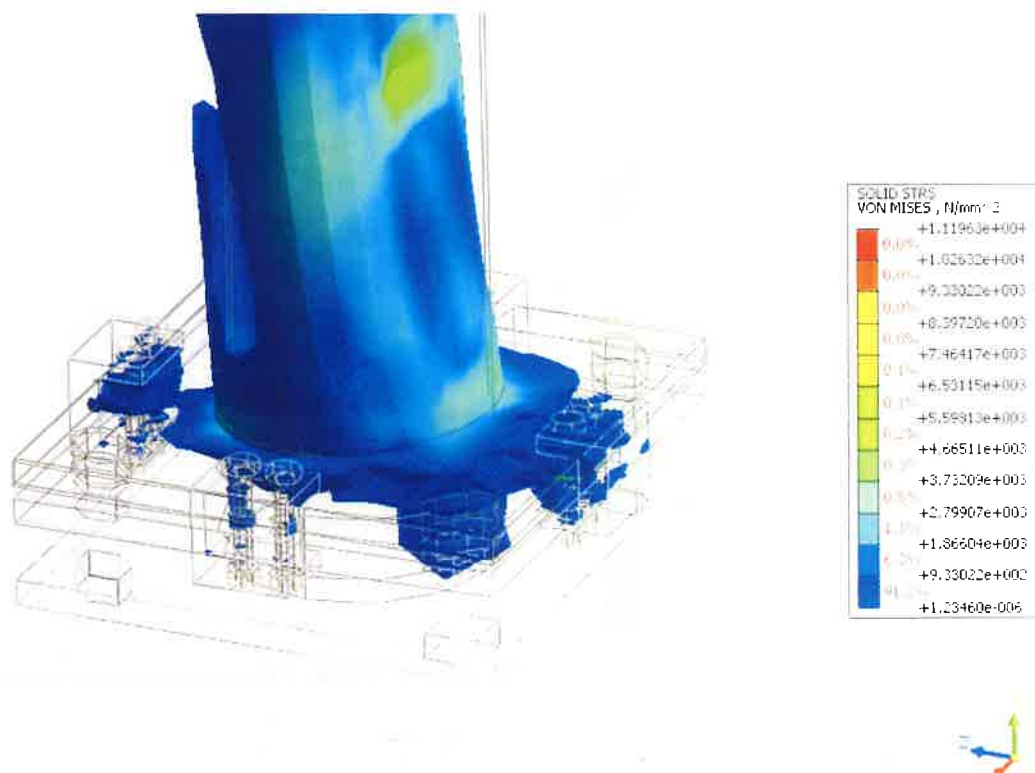
Rys. 20 Naprężenia maksymalne koncepcja pierwsza siła równa 144.7kN



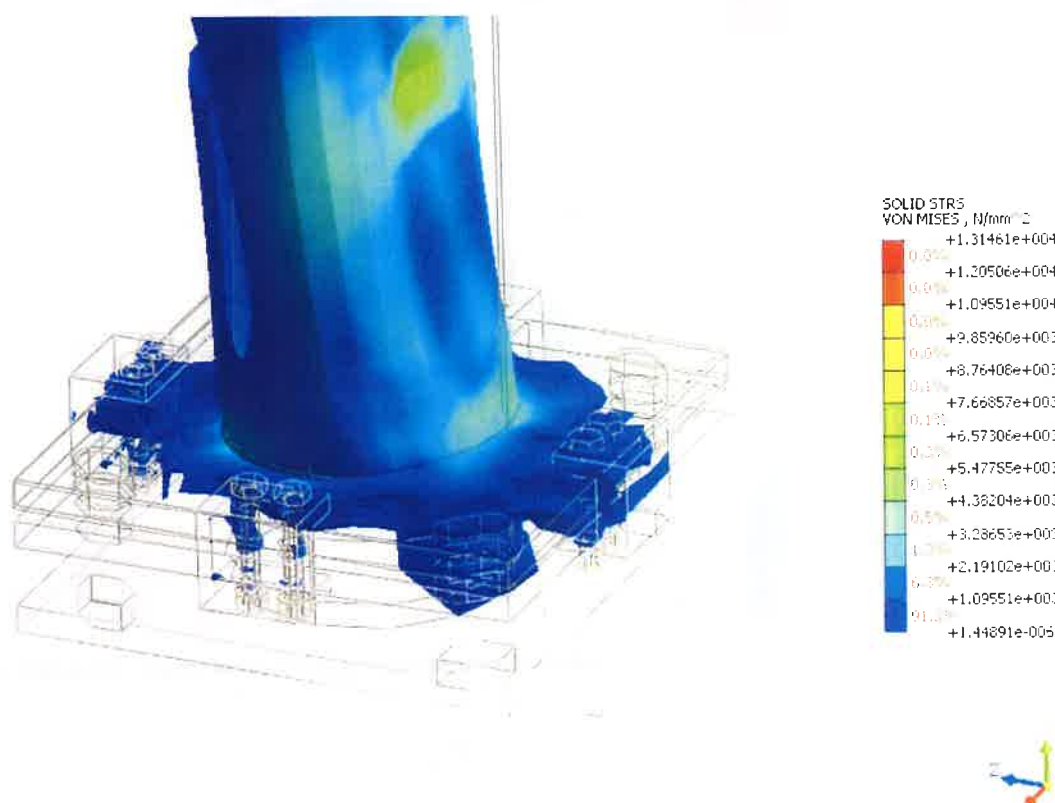
Rys. 21 Naprężenia maksymalne koncepcja pierwsza siła równa 169.9kN



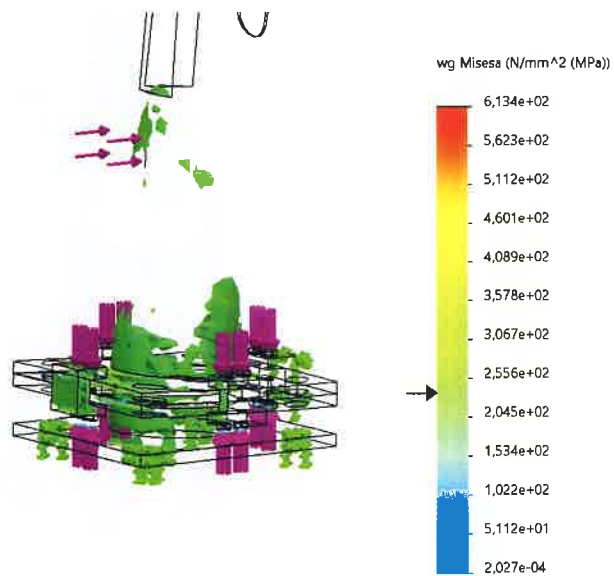
Rys. 22 Naprężenia maksymalne koncepcja druga siła równa 116.5kN



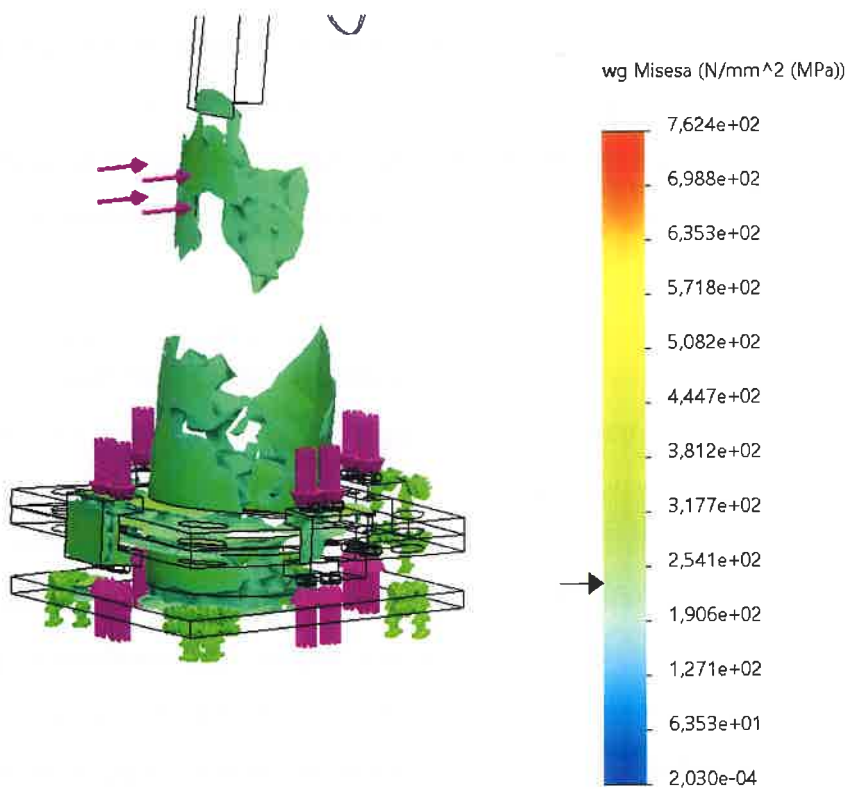
Rys. 23 Naprężenia maksymalne koncepcja druga siła równa 144.7kN



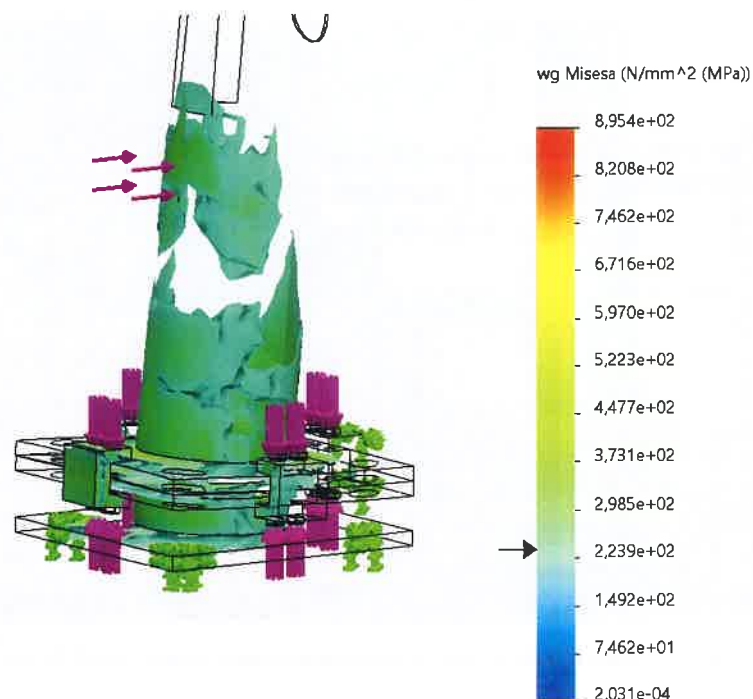
Rys. 24 Naprężenia maksymalne koncepcja druga siła równa 169.9kN



Rys. 25 Naprężenia maksymalne koncepcja druga siła równa 116.5kN



Rys. 26 Naprężenia maksymalne koncepcja druga siła równa 144.7kN

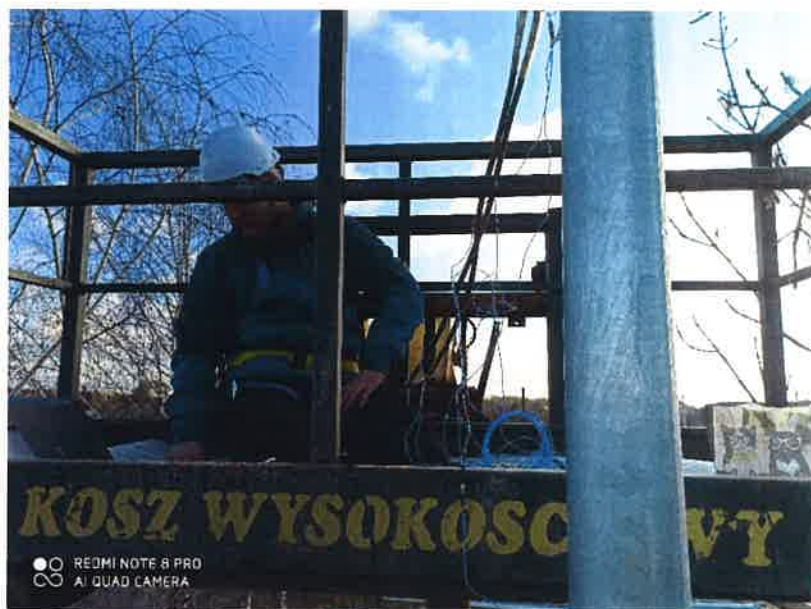


Rys. 27 Naprężenia maksymalne koncepcja druga siła równa 169.9kN

Na podstawie przeprowadzonych badań jako rozwiązanie najbardziej pasujące do założeń wytypowano koncepcję trzecią. Wyniki otrzymane dla tej koncepcji pozwalają przypuszczać, że w pierwszej kolejności zniszczeniu ulegnie mocowanie do fundamentu w miejscach w których zakładano.

3.4. Analizy wsporczych urządzeń drogowych w zakresie dynamiki konstrukcji
Kolejnym etapem badań były analizy w zakresie dynamiki konstrukcji. Pierwszym etapem badań dynamicznych jest weryfikacja parametrów modelu na podstawie badań doświadczalnych. W związku z tym przeprowadzono badania doświadczalne, których warunki i wyniki zostały przedstawione w dalszej części raportu.

Przedstawione wyniki badań dotyczą realizacji tzw. testu impulsowego i budowy modelu modalnego słupa oświetleniowego, posadowionego zgodnie z wytycznymi firmy MABO, we wskazanej lokalizacji na terenie firmy. Test przeprowadzony był na otwartym terenie, co należy podkreślić ze względu na działanie wiatru, mogącego mieć wpływ na postacie drgań przy niskich częstotliwościach. Działania prowadzone były z udostępnionych przez firmę MABO dwóch podnośników, z zachowaniem wymaganych standardów BHP.



Rys. 28 Obiekt badany z zamocowanym czujnikiem, realizacja eksperymentu

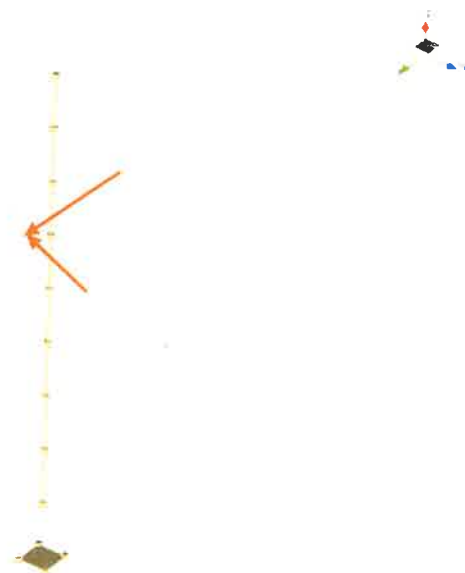
Procedura pomiarowa

a) *Dobór elementów toru pomiarowego i kalibracja jego poszczególnych komponentów*

W badaniach zastosowano wymuszenie pomiarowa obejmowała szereg czynności przygotowawczych, kontrolnych oraz właściwą realizację pomiarów impulsowe, z użyciem młotka modalnego PCB, typ: 9728A20000, numer seryjny: 2068391. Do pomiaru odpowiedzi użyto czujników przyspieszeń PCB 356A01 o czułości ok. 5,34 mV/g, mające aktualną kalibrację producenta. Za akwizycję sygnałów odpowiedzialny był przenośny system pomiarowy Scadas Mobile Vibco, pracujący pod kontrolą systemu pomiarowego Siemens LMS Test Lab 2019.1. System ten również posiadał aktualną kalibrację producenta.

b) *Wybór lokalizacji tzw. punktów pomiarowych oraz punktu i kierunków przyłożenia wymuszenia impulsowego*

Ze względu na fakt, że badany obiekt ma geometrię zbliżoną do belki jednostronnie utwierdzonej, przyjęto równomierne rozmieszczenie punktów pomiarowych, zaś ich gęstość dostosowano do kształtu pierwszych czterech postaci drgań. Wymuszenie zrealizowano w dwóch ortogonalnych kierunkach -Y oraz +X – Rys. 29 tak, aby punkt przyłożenia nie pokrywał się z węzłem żadnej z postaci drgań, w analizowanym zakresie częstotliwości.



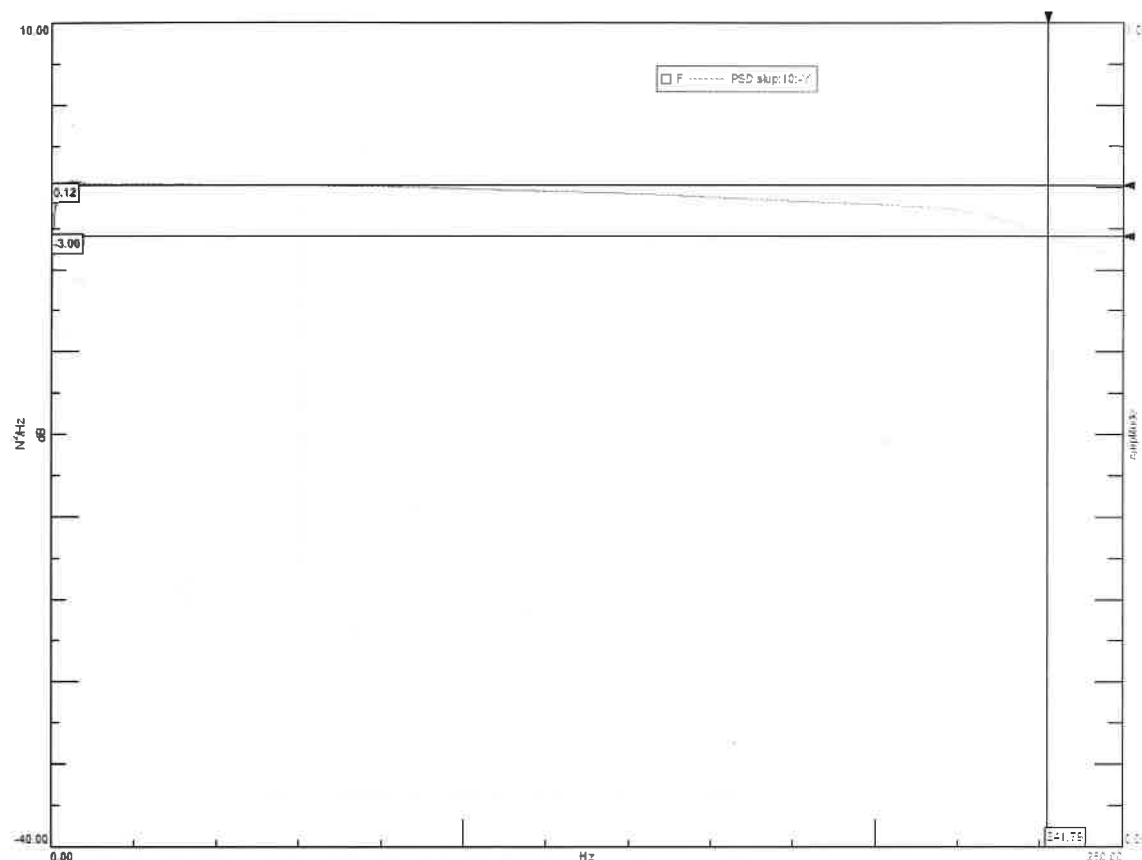
Rys. 29 Rozmieszczenie punktów pomiarowych i oznaczenie kierunków przyłożenia wymuszenia impulsowego

c) *Ustalenie parametrów procesu akwizycji i przetwarzania sygnałów pomiarowych.*

Każdorazowo przed realizacją sesji pomiarowej ustalano zakresy pomiarowe czujników, korzystając z funkcjonalności „autorangingu”, czyli automatycznego dostosowywania zakresów do poziomu sygnału wejściowego. Częstotliwość próbkowania sygnału analogowego wynosiła 256 Hz, nie stosowano dodatkowego okienkowania ustalając czas akwizycji na 2s (ze względu na długi czas powrotu obiektu do położenia równowagi). Każda sesja pomiarowa składała się z 10 realizacji, podlegających następnie uśrednieniu.

d) *Weryfikacja poprawności otrzymywanych w trakcie badań częstotliwościowych funkcji przejścia, kontrola funkcji koherencji oraz gęstości widmowej mocy wymuszenia.*

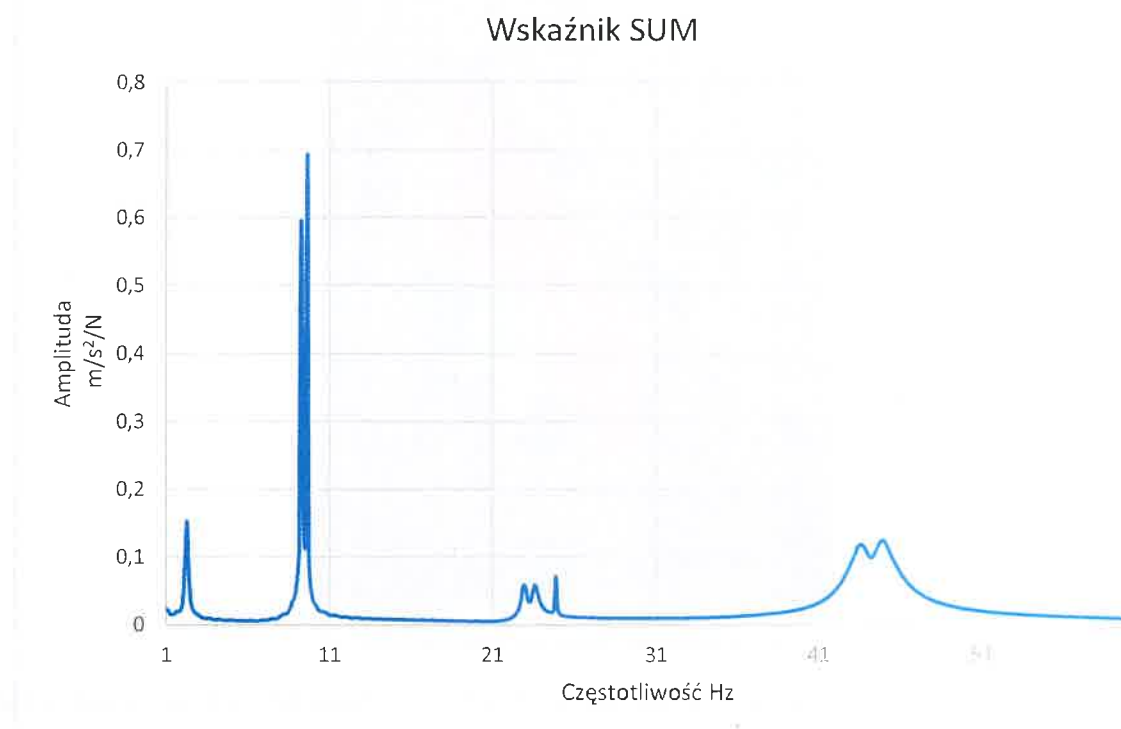
W trakcie badań na bieżąco weryfikowano poziom wymuszenia (w razie konieczności powtarzano uderzenie), sprawdzano poziom odpowiedzi, usuwano realizacje cechujące się przesterowaniem w dowolnym kanale pomiarowym oraz tzw. podwójne uderzenia. Monitorowano przebieg funkcji koherencji oraz gęstości widmowej mocy sygnału wymuszenia – Rys. 30. Jego płaski charakter świadczy o zadowalającej jakości wymuszenia w analizowanym zakresie częstotliwości (płaska charakterystyka).



Rys. 30 Gęstość widmowa mocy sygnału wymuszenia

e) Budowa modelu modalnego oraz jego walidacja

W wyniku przeprowadzonych pomiarów uzyskano zestaw charakterystyk tzw. FRF (częstotliwościowych funkcji odpowiedzi). Zawierają one informacje na temat dynamiki układu (poziomy amplitud, częstotliwości rezonansowe) i są podstawą do budowy tzw. modelu modalnego. Przedstawienie wszystkich wyznaczonych FRF jest niecelowe ze względu na ich ilość. Dlatego na Rys. 31 przedstawiono tzw. wskaźnik SUM, będący uśrednieniem wszystkich funkcji FRF.



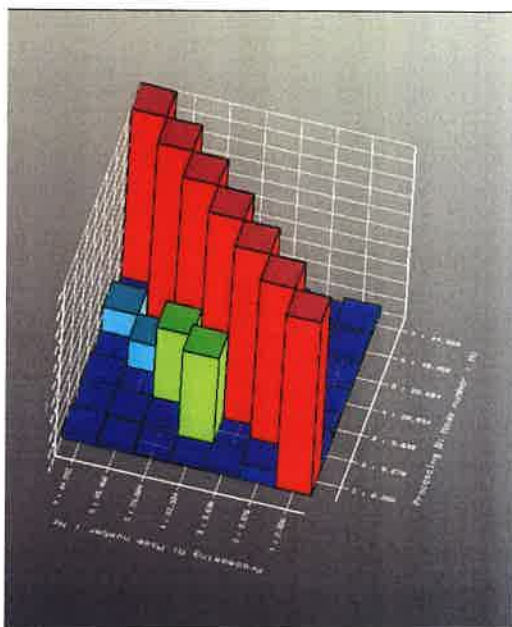
Rys. 31 Wskaźnik SUM, wynik pomiarów impulsowych słupa

Obserwacja przebiegu tego wskaźnika wskazuje na obecność blisko położonych względem siebie rezonansów. Nie są to bieguny podwójne, a efekt taki jest często obserwowany dla struktur symetrycznych. Brak całkowitej zgodności częstotliwości rezonansowych wynika z, pomimo symetrii, niewielkich różnic parametrów dynamicznych układu, analizowanych w prostopadłych względem siebie kierunkach (sztywność, bezwładność, tłumienie).

Budowa modelu modalnego została zrealizowana z użyciem algorytmu Polymax Plus, stosując automatyczny algorytm wyboru stabilizacji biegunów. Wyznaczony model modalny – Tab. 4. został następnie walidowany z użyciem kryterium MAC, wskazującego ortogonalność wektorów postaci drgań – Rys. 32.

Tab. 4 Model modalny słupa

	Częstotliwość	Tłumienie
Mode 1	2.266±0.0042 Hz	0.03±0.054 %
Mode 2	9.278±0.0007 Hz	0.16±0.007 %
Mode 3	9.630±0.0002 Hz	0.12±0.003 %
Mode 4	22.934±0.0011 Hz	0.62±0.005 %
Mode 5	23.604±0.0015 Hz	0.82±0.006 %
Mode 6	43.460±0.0010 Hz	3.96±0.002 %
Mode 7	44.932±0.0005 Hz	1.91±0.001 %



Rys. 32 Wskaźnik MAC modelu modalnego słupa

Analiza wskaźnika MAC prowadzi do wniosku o poprawności wyboru biegunów modelu, zaś istotne wartości poza diagonalą (zaznaczone na zielono) tłumaczy się symetrią obiektu.

Ostatnim etapem analizy jest obserwacja postaci drgań. Najkorzystniej dokonywać tego poprzez animację. W niniejszym opracowaniu zawarto skrajny kadr animacji czterech wyznaczonych postaci drgań.



Mode 1 : 2.2657 Hz, 0.03 %

Rys. 33 Postać drgań 1, częstotliwość 2.26 Hz, tłumienie 0.03%



Mode 2 : 9.2781 Hz, 0.16 %

Rys. 34 Postać drgań 2, częstotliwość 9.27 Hz, tłumienie 0.16%



Mode 4 : 22.9337 Hz, 0.62 %

Rys. 35 Postać drgań 4, częstotliwość 22.93 Hz, tłumienie 0.62%



Mode 6 : 43.4596 Hz, 3.96 %

Rys. 36 Postać drgań 6, częstotliwość 43.45 Hz, tłumienie 3.96 %

Wyniki analiz, częstotliwościowe funkcje odpowiedzi (FRF), postaci drgań zostały wyeksportowane do popularnych formatów wymiany plików, w celu ich użycia w procedurze identyfikacji modeli elementów skończonych.

Wyznaczenie wartości drgań własnych oraz postaci drgań własnych

Następnie, dla utwierdzonego modelu słupa (w sposób aproksymujący rzeczywiste posadowienie – Rys. 6) wyznaczono wartości częstotliwości drgań własnych oraz odpowiadające im postaci drgań własnych. Zadanie to zrealizowano poprzez rozwiązanie zagadnienia własnego sformułowanego w następujący sposób:

$$(K - \omega^2 M)\Phi = 0 \quad (8)$$

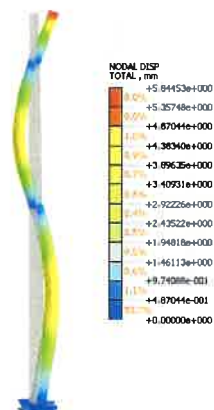
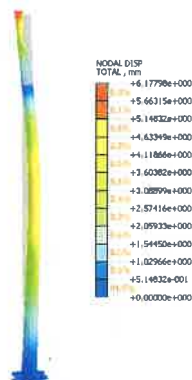
gdzie: ω^2 – macierz wartości częstotliwości drgań własnych, Φ – macierz wektorów własnych. Obliczenia przeprowadzono z użyciem Nastran Solver (SOL103).

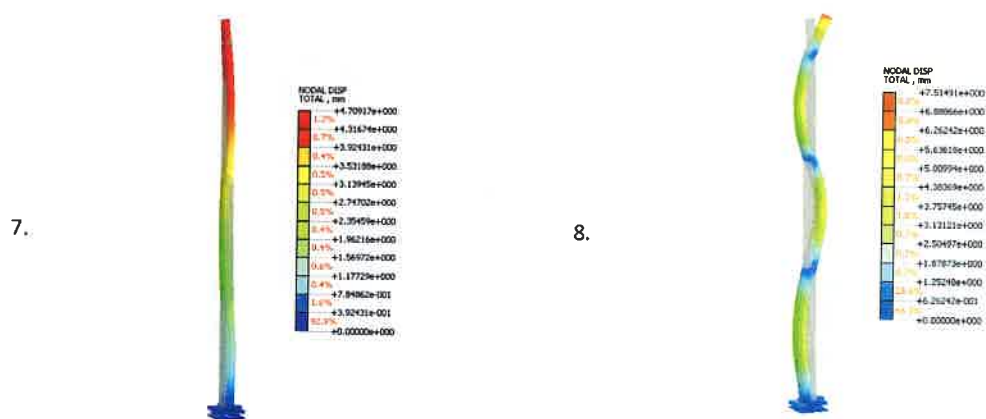
Wartości częstotliwości drgań własnych oraz odpowiadające im postaci drgań własnych będące wynikiem obliczeń przedstawiono odpowiednio w Tab. 5 oraz na Rys. 37.

Tab. 5 Wartości częstotliwości drgań własnych dla modelu MES słupa

Postać drgań	Model MES
1.	10.49 Hz
2.	10.75 Hz
3.	52.70 Hz

Postać drgań





Rys. 37 Wizualizacja postaci drgań analizowanego słupa

Dodatkowo, na Rys. 38. zawarto pola naprężeń odpowiadające, poszczególnym postacią drgań. Wyniki jednak, podobnie jak postaci drgań należy traktować w sposób jakościowy, w związku z tym iż opisują one stosunki naprężeń.

Nr postaci

Postać drgań

Nr postaci

Postać drgań

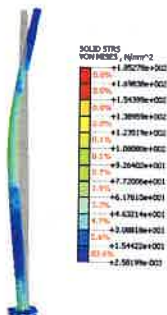
1.



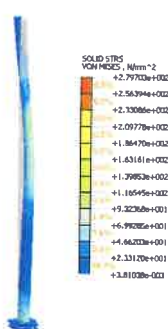
2.

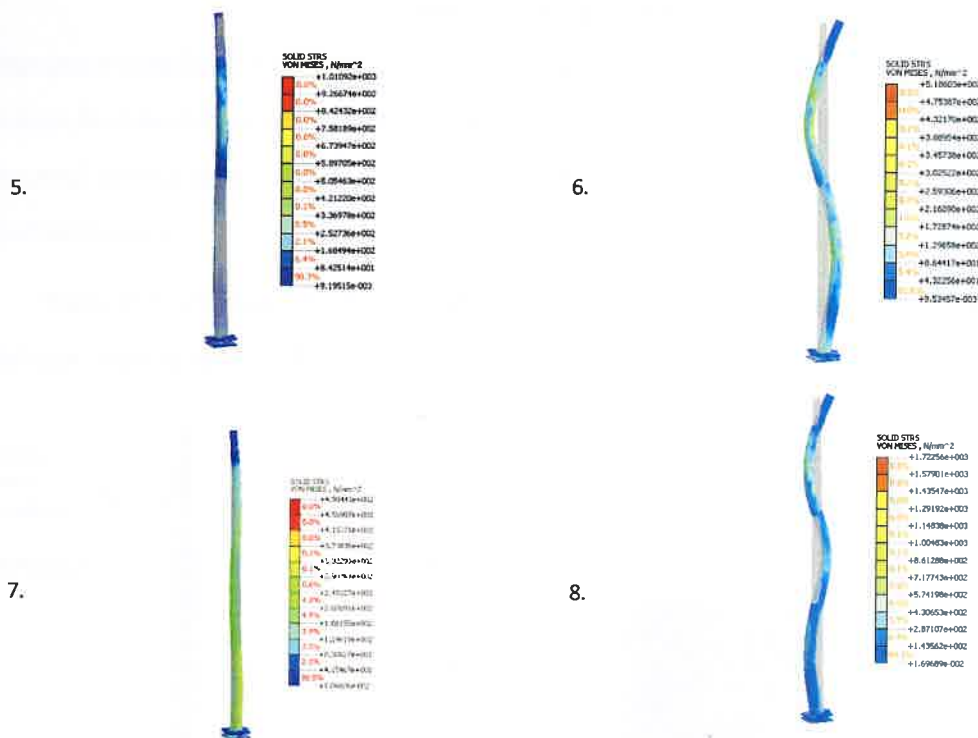


3.



4.





Rys. 38 Pola naprężeń dla obliczonych postaci drgań

Wyznaczenie charakterystyk amplitudowo-częstotliwościowych

W kolejnym kroku, z użyciem procesora Nastran Solver (SOL108), wyznaczono funkcje receptancji w przedziale częstotliwości 2-300 Hz z krokiem 0,5 Hz. Wyznaczenie funkcji receptancji uzyskano poprzez rozwiązanie równania macierzowego opisującego drgania tłumione modelu dla wymuszenia harmonicznego:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{q}}(t) + (1 + i\eta)\mathbf{K}\mathbf{q}(t) = \mathbf{f}(\omega)e^{i\omega t} \quad (9)$$

gdzie: ω – częstotliwość wymuszenia.

Zakładając rozwiązanie harmoniczne, wektor przemieszczeń $\mathbf{q}(t)$ można zapisać w postaci:

$$\mathbf{q}(t) = \mathbf{u}(\omega)e^{i\omega t} \quad (10)$$

gdzie: $\mathbf{u}(\omega)$ – wektor przemieszczeń zespolonych. Wektor $\ddot{\mathbf{q}}(t)$ przyjmuje postać:

$$\ddot{\mathbf{q}}(t) = -\omega^2\mathbf{u}(\omega)e^{i\omega t}. \quad (11)$$

Podstawiając równania (10) oraz (11) do równania (9), otrzymano:

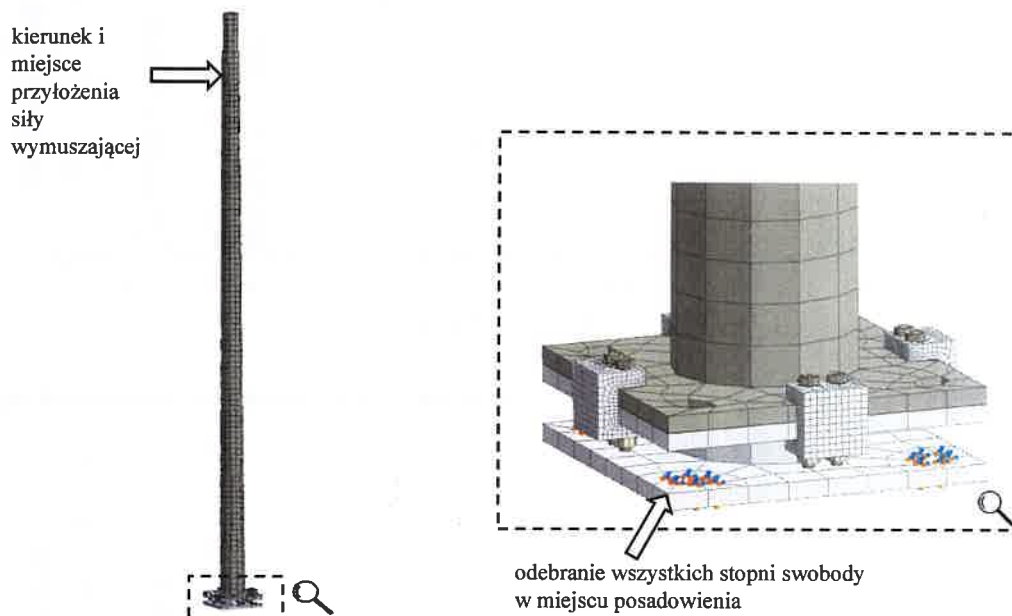
$$-\omega^2\mathbf{M}\mathbf{u}(\omega)e^{i\omega t} + (1 + i\eta)\mathbf{K}\mathbf{u}(\omega)e^{i\omega t} = \mathbf{f}(\omega)e^{i\omega t}. \quad (12)$$

Dzieląc obustronnie równanie (12) przez $e^{i\omega t}$ otrzymano:

$$(-\omega^2 \mathbf{M} + i\eta \mathbf{K} + \mathbf{K}) \mathbf{u}(\omega) = \mathbf{f}(\omega). \quad (13)$$

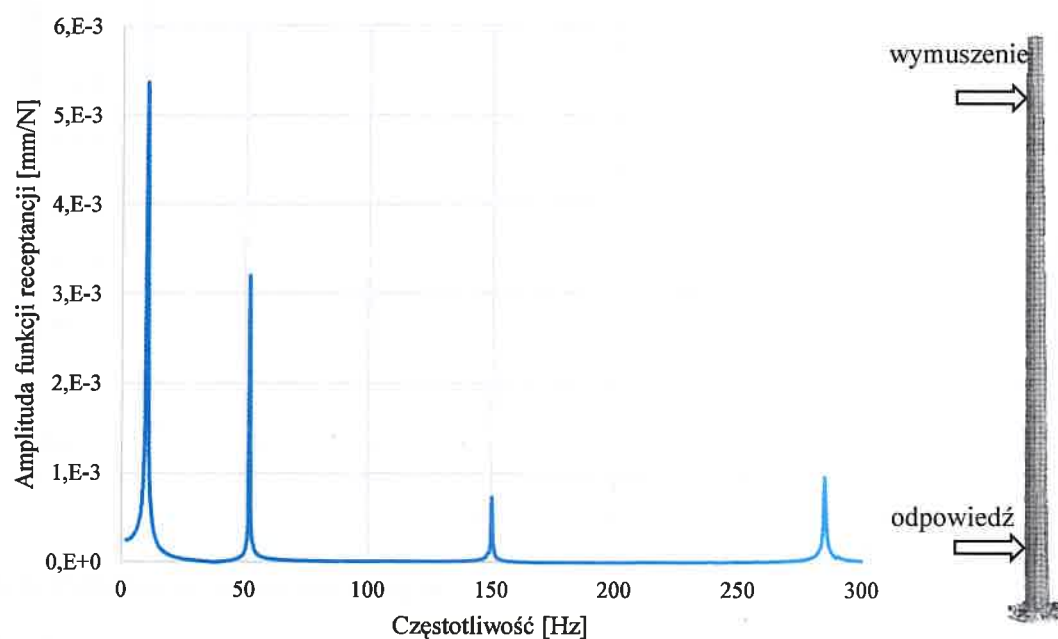
Wyznaczenie amplitud częstotliwościowych funkcji przejścia otrzymano poprzez rozwiązanie równania dla kolejnych wartości ω (w zakresie 2-300 Hz z krokiem 0,5 Hz). Wyznaczone funkcje receptancji opisują przemieszczenia węzłów modelu w stosunku do częstotliwości przyłożonej siły jednostkowej.

Warunki brzegowe (miejsce przyłożenia siły wymuszającej oraz sposób utwierdzenia modelu) przedstawiono na Rys. 39.

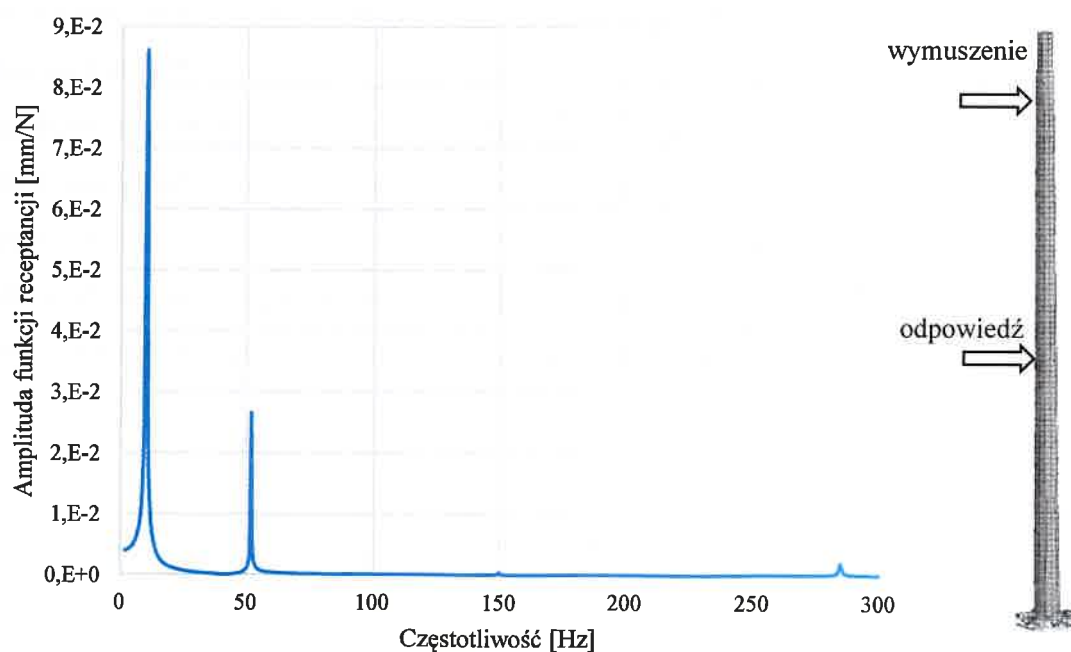


Rys. 39 Warunki brzegowe dla modelu służącego wyznaczeniu funkcji receptancji

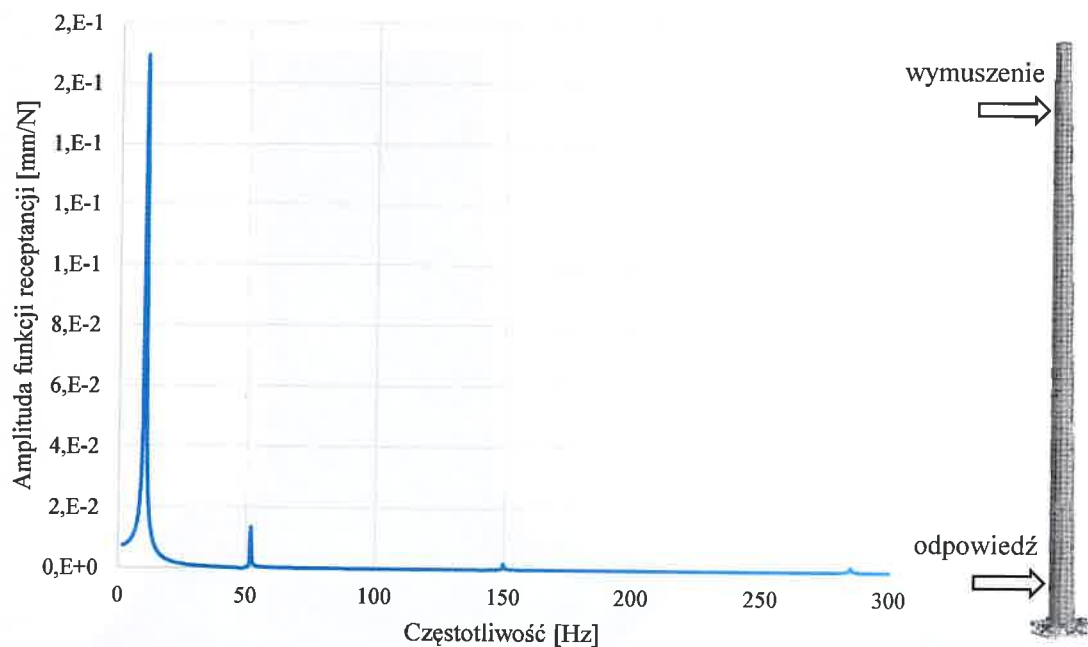
Wybrane funkcje receptancji wraz ze wskazaniem miejsca przyłożenia wymuszenia oraz miejsca rejestracji odpowiedzi na to wymuszenie przedstawiono na Rys. 40- Rys. 42.



Rys. 40 Przedstawienie wybranej funkcji receptancji cz.1

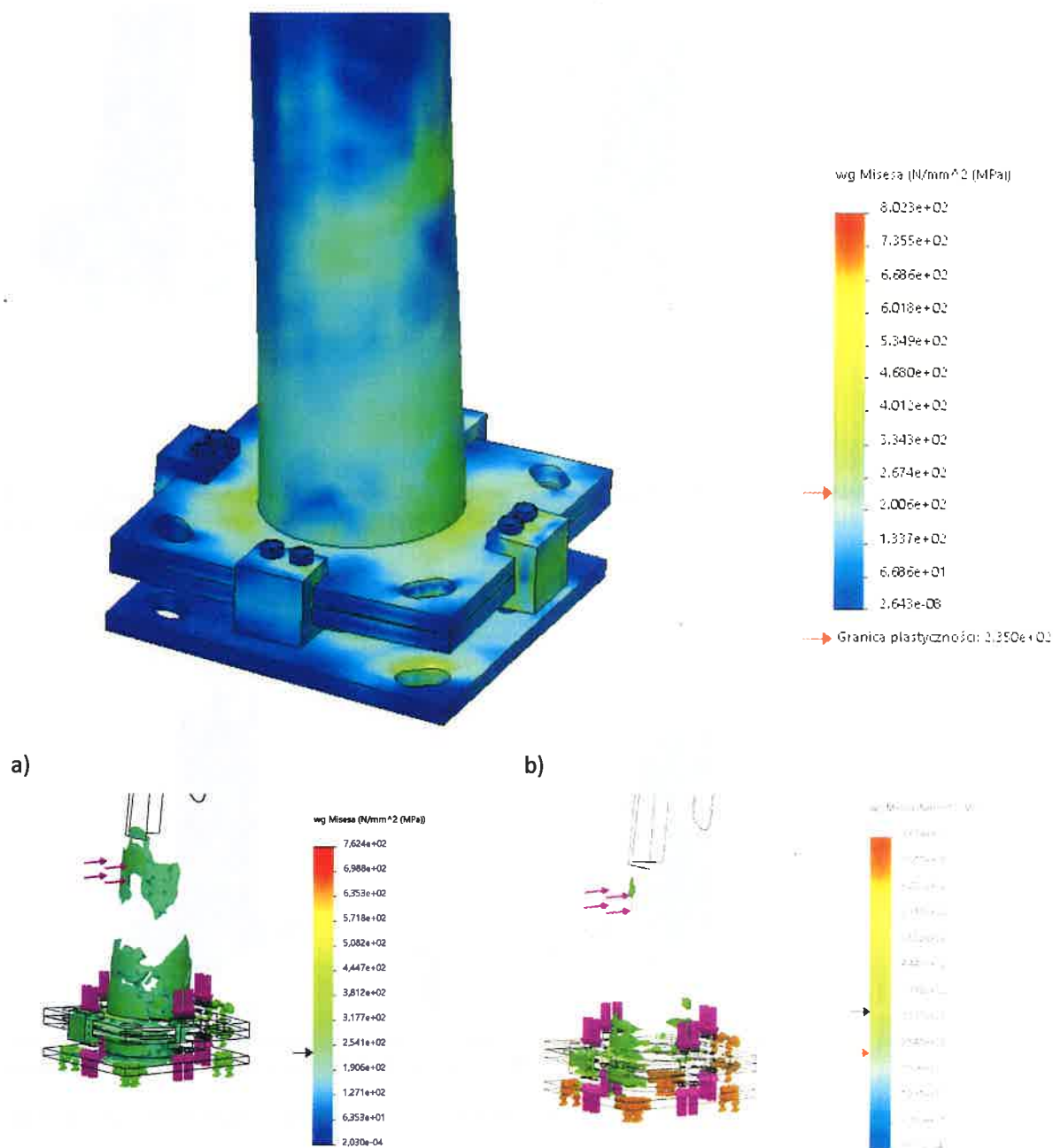


Rys. 41 Przedstawienie wybranej funkcji receptancji cz.2

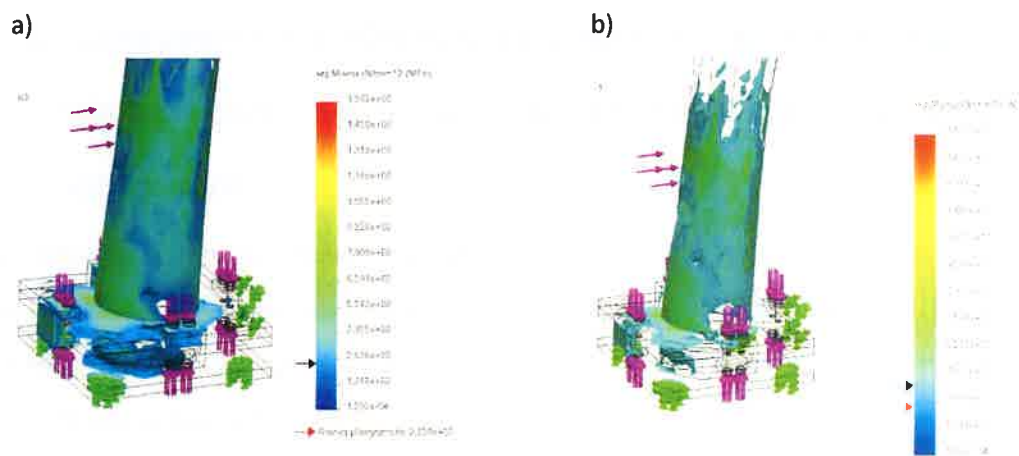


Rys. 42 Przedstawienie wybranej funkcji receptancji cz.3

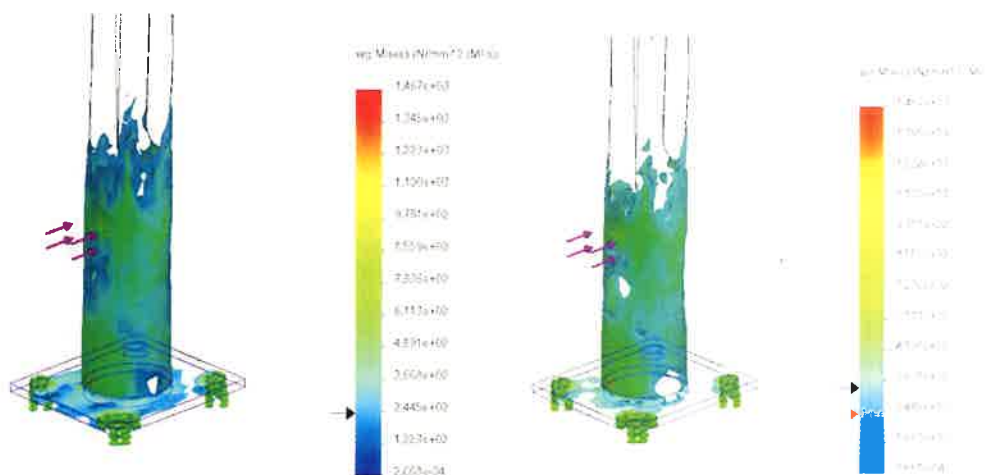
Na koniec przeprowadzono analizy wytrzymałościowe pełnego modelu słupa oświetleniowego dla wybranych rozwiązań. Słup NE charakteryzuje się odpowiednim mocowaniem do fundamentu. Zaletą tego rozwiązania jest to, że nie wpływa ono na zmianę konstrukcji wsporczej samego słupa, jak również nie zmienia sposobu jej mocowania, jedynie dodatkowo należałoby zamontować wkładkę. Kolejny rodzaj słupa HE zakłada, że konstrukcja słupa została wychudzona. Do badań zastosowano słup o grubości ścianki 2mm. Ostatni typ słupa LE jest połączeniem dwóch opisanych rozwiązań, a więc jest to słup o konstrukcji cienkościennej z dodatkową wkładką mocującą do fundamentu. Wyniki analiz dla wszystkich trzech rozwiązań przedstawiono na następujących wykresach.



Rys. 43 Wykres naprężeń konstrukcji słupa NE podczas kolizji z pojazdem a) wykres naprężeń przekraczających granicę plastyczności, b) wykres naprężeń większych niż 340 MPa.



Rys. 44 Wykres naprężeń konstrukcji słupa LE podczas kolizji z pojazdem a) wykres naprężeń przekraczających granicę plastyczności, b) wykres naprężeń większych niż 340 MPa.



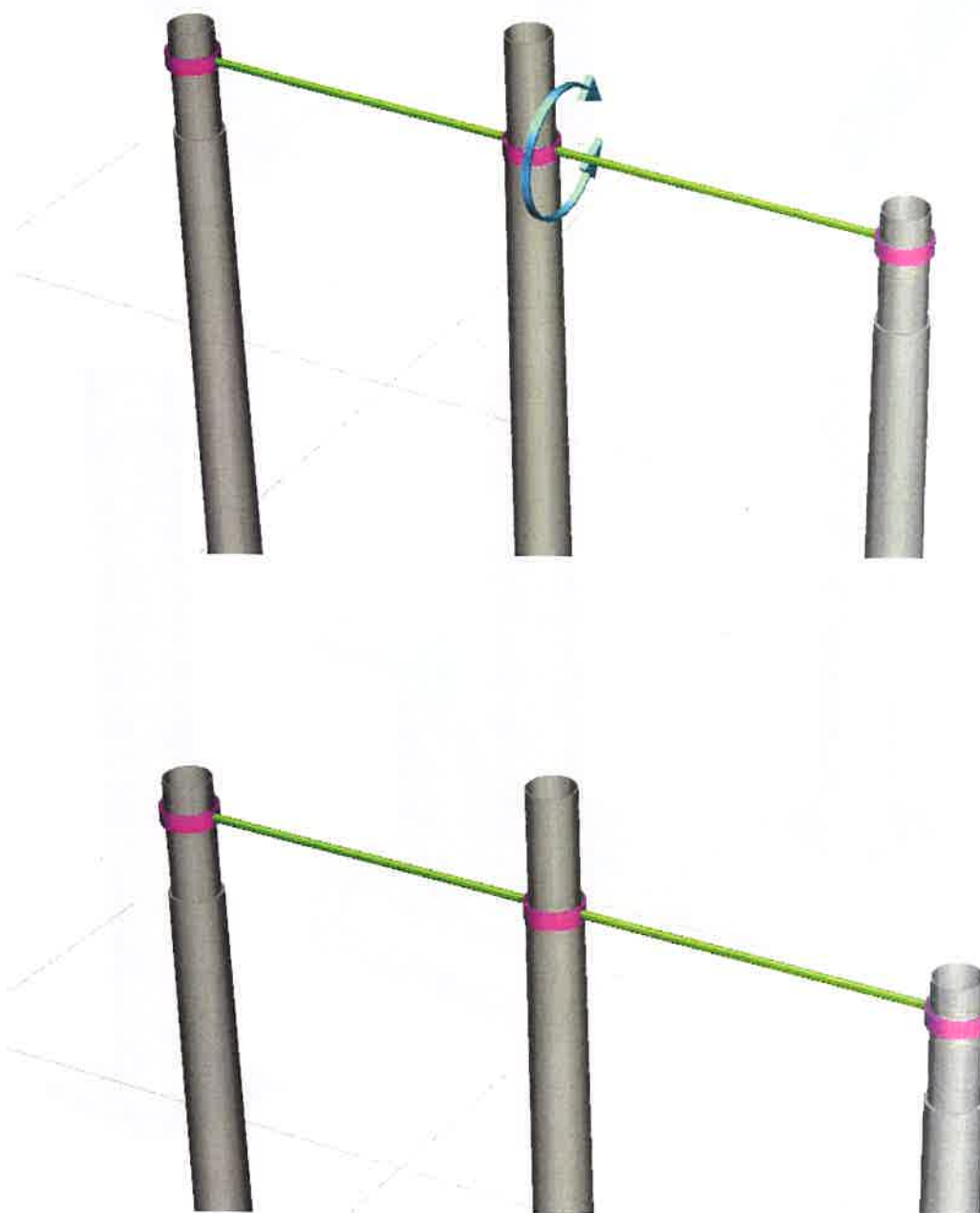
Rys. 45 Wykres naprężeń konstrukcji słupa HE podczas kolizji z pojazdem a) wykres naprężeń przekraczających granicę plastyczności, b) wykres naprężeń większych niż 340 MPa.

Rozważając otrzymane wyniki można wnioskować, że na podstawie wstępnych badań modelowych zaproponowane rozwiązania spełniają stawiane im założenia i warto poddać je dalszym analizom w celu uszczegółowienia konstrukcji rozwiązań.

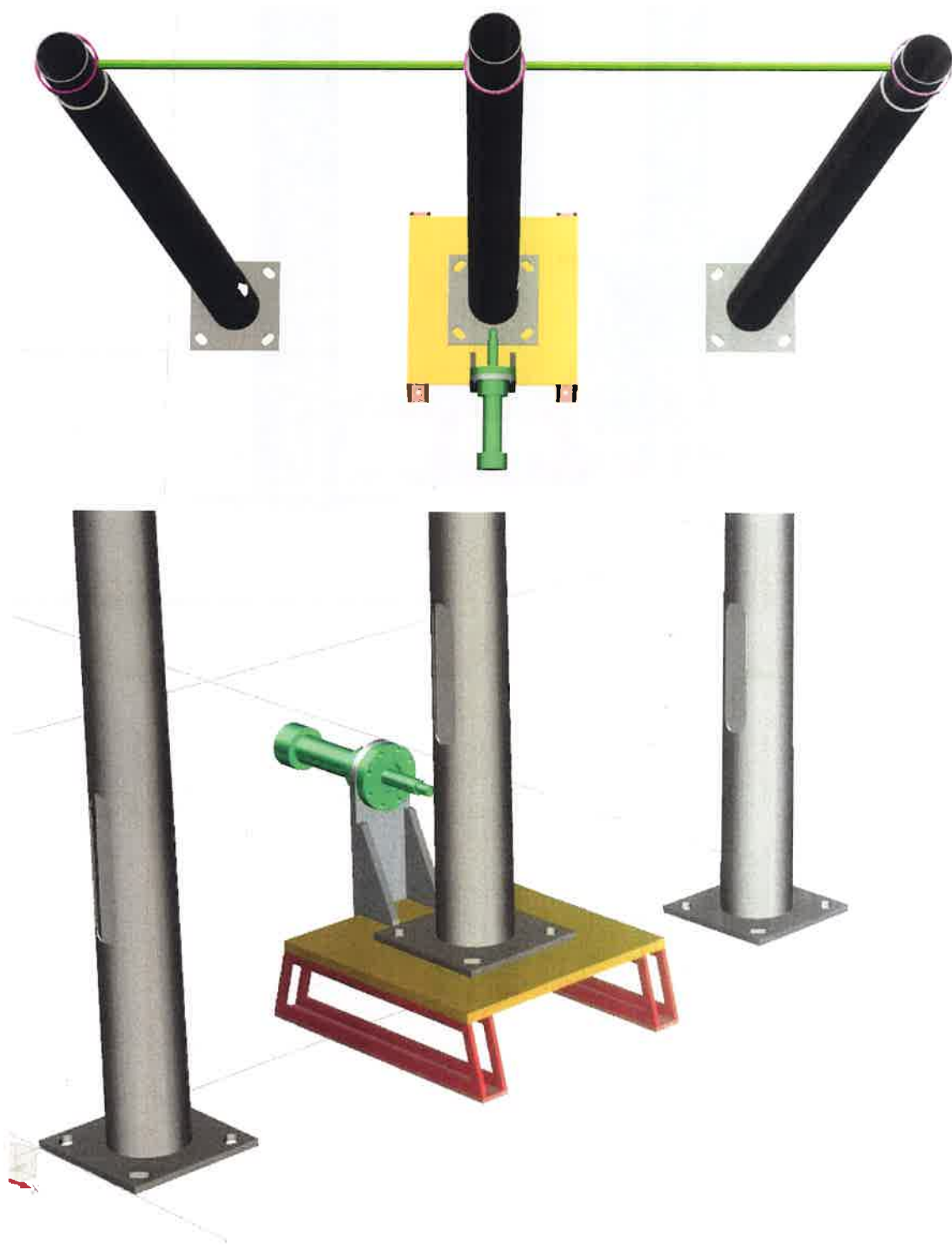
4. Opracowanie projektu oraz wykonanie stanowiska badawczego do symulacji warunków kolizji ze wsporczym urządzeniem drogowym

W kolejnym etapie opracowano projekt konstrukcji stanowiska badawczego do symulacji warunków kolizji. Na kolejnych rysunkach przedstawiono projekt konstrukcji umożliwiającej przeprowadzenie wstępnej analizy zachowania zaprojektowanych konstrukcji urządzeń wsporczych w momencie kolizji z pojazdem w warunkach laboratoryjnych. Stanowisko składa się z części generującej siłę o równowartości uderzenia pojazdu w konstrukcję. Siła ta jest generowana dzięki zastosowaniu siłownika o odpowiednich parametrach.

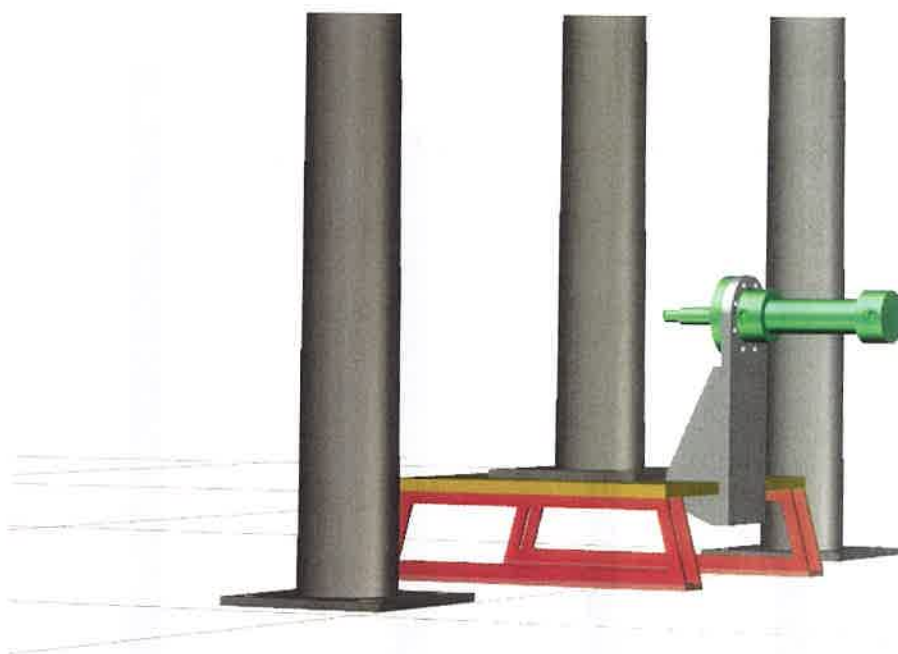
4.1. Konstrukcja stanowiska badawczego



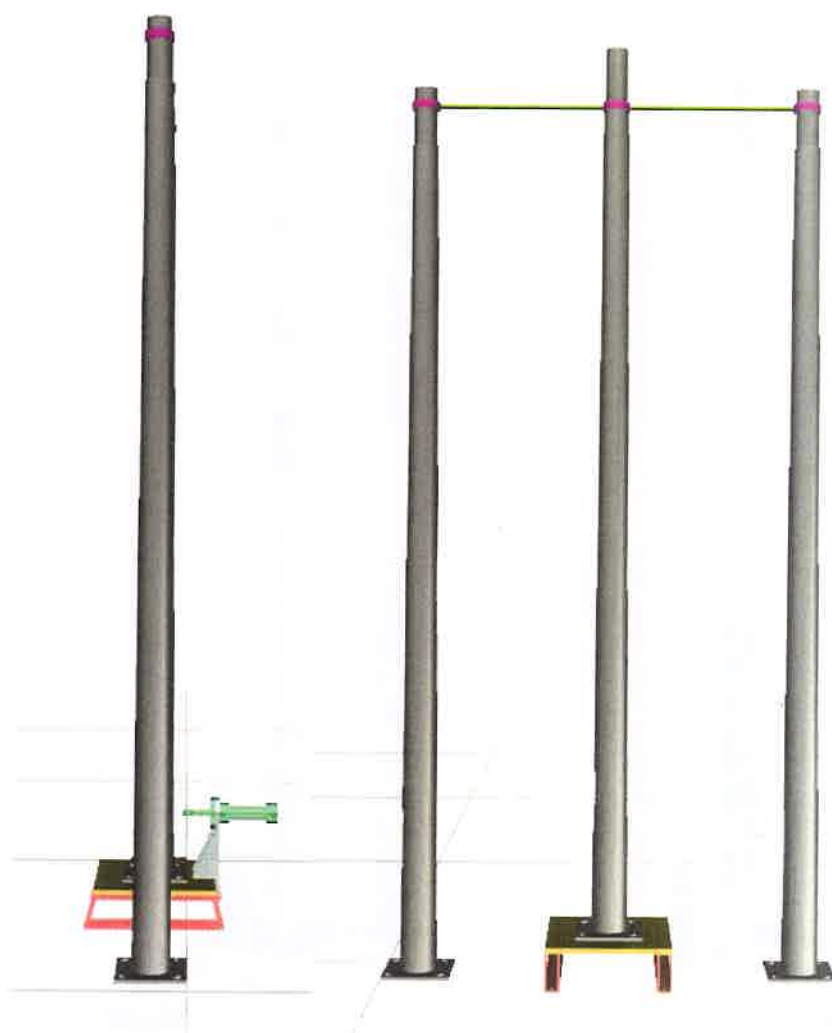
Rys. 46 Mocowanie słupa na stanowisku



Rys. 47 Widoki modelu całego stanowiska



Rys. 48 Widok kmodelu elementów wymuszających



Rys. 49 Pełne widoki całego stanowiska (1)



Rys. 50 Pełne widoki całego stanowiska (2)

4.2. *Rejestracja i akwizycja danych pomiarowych*

W celu wykonania oraz zarejestrowania pomiarów wykonywanych na stanowisku do symulacji warunków kolizji ze wsporczym urządzeniem drogowym przygotowano układ pomiarowy składający się z następujących elementów:

- dwa siłomierze pomiarowe
- moduł akwizycja danych National Instruments cRIO-9045



Rys. 51 Moduł wejść/wyjść cyfrowych National Instruments NI- 9375

- moduł wejść/wyjść cyfrowych National Instruments NI- 9375



Rys. 52 Moduł wejść analogowych NI-9207

- moduł wejść analogowych NI-9207



Rys. 53 Moduł wyjść analogowych NI-9262

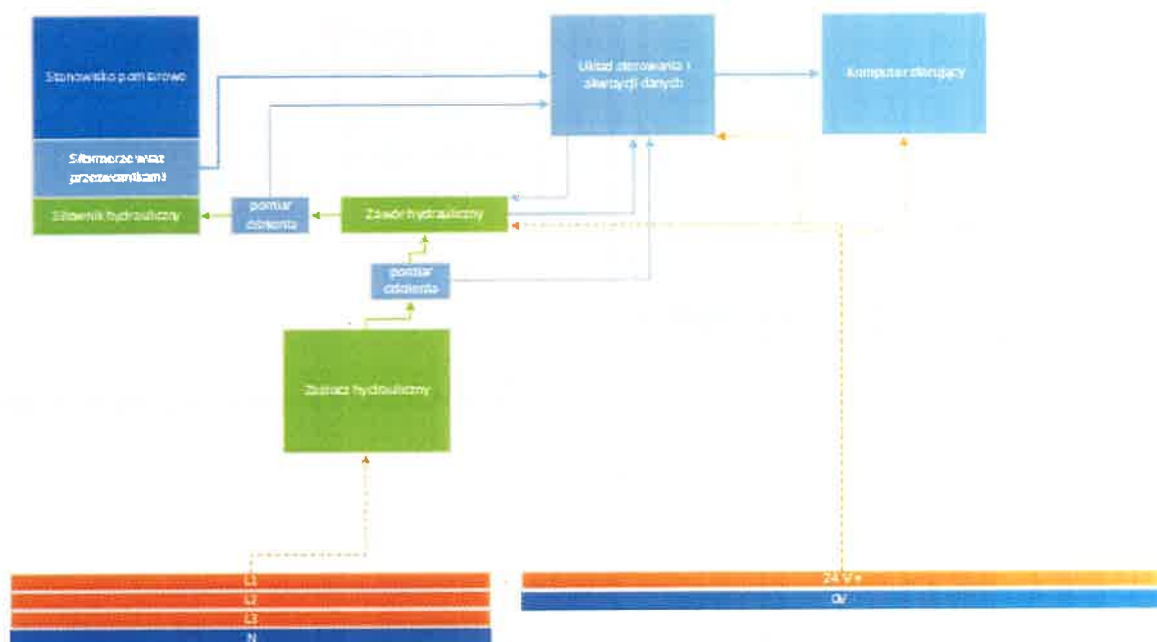
- moduł wyjść analogowych NI-9262



Rys. 54 Przekładniki przemysłowe

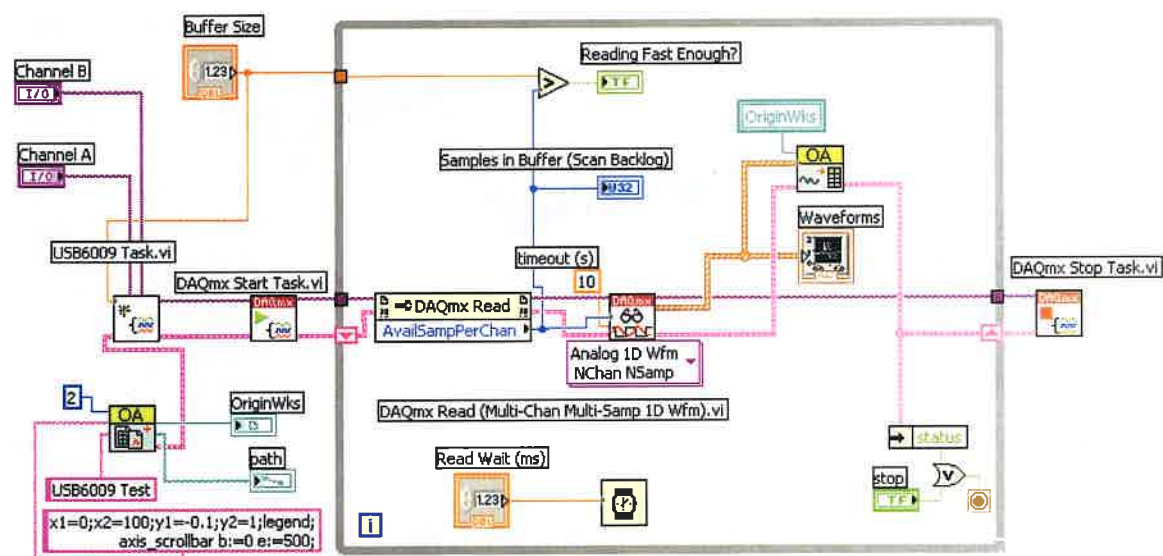
- przekładniki przemysłowych

Poniżej przedstawiono schemat połączenia układu pomiarowego wraz z komputerem rejestrującym dane.



Rys. 55 schemat połączenia układu pomiarowego

Do wykonania pomiarów przygotowano program w oprogramowaniu National Instruments LabVIEW. Poniżej przedstawiono najważniejsze moduły przygotowanego oprogramowania.



Rys. 56 Moduł oprogramowania w LabVIEW cz. 1

5. Spis ilustracji

Rys. 1 Mocowanie słupów NE oraz LE.	6
Rys. 2 Rozważane koncepcje połączenia konstrukcji słupa z fundamentem: a) zaciski ściśnięte dwoma śrubami, b) zaciski ściśnięte dwoma śrubami z tulejką, c) zaciski dociśnięte dwoma śrubami	7
Rys. 3 Model dyskretny słupa.....	8
Rys. 4 Sprawdzenie jakości siatki konstrukcji wsporczej słupów HE	8
Rys. 5 Sprawdzenie jakości siatki konstrukcji wsporczej słupów z wkładką dystansową (NE i LE)	9
Rys. 6 Sposób utwierdzenia słupa	9
Rys. 7 Model dyskretny otoczenia słupa	10
Rys. 8 Ciśnienie napierające na konstrukcję pod wpływem wiatru	11
Rys. 9 Kierunek przepływu wiatru	12
Rys. 10 Rozkład ciśnienia naporu wiatru na słup standardowy	13
Rys. 11 Rozkład naprężeń słupa standardowego pod naporem wiatru	14
Rys. 12 Naprężenia maksymalne konstrukcji pod działaniem naporu wiatru, koncepcja druga	14
Rys. 13 Przemieszczenia w modelu zacisku dla siły 2000N	15
Rys. 14 Naprężenia w modelu zacisku dla siły 2000N	15
Rys. 15 Przemieszczenia w modelu zacisku dla siły 50000N	16
Rys. 16 Naprężenia w modelu zacisku dla siły 50000N	16
Rys. 17 Zmiana wartości siły niszczącej konstrukcję słupa dla trzech różnych prędkości pojazdu w momencie uderzenia, źródło: [7]	17
Rys. 18 Umocowania oraz obciążenia koncepcji trzeciej z Rys. 2c.....	18
Rys. 19 Naprężenia maksymalne koncepcja pierwsza siła równa 116.5kN.....	19
Rys. 20 Naprężenia maksymalne koncepcja pierwsza siła równa 144.7kN.....	19
Rys. 21 Naprężenia maksymalne koncepcja pierwsza siła równa 169.9kN.....	20
Rys. 22 Naprężenia maksymalne koncepcja druga siła równa 116.5kN	20
Rys. 23 Naprężenia maksymalne koncepcja druga siła równa 144.7kN.....	21
Rys. 24 Naprężenia maksymalne koncepcja druga siła równa 169.9kN.....	21
Rys. 25 Naprężenia maksymalne koncepcja druga siła równa 116.5kN	22
Rys. 26 Naprężenia maksymalne koncepcja druga siła równa 144.7kN.....	22
Rys. 27 Naprężenia maksymalne koncepcja druga siła równa 169.9kN.....	23
Rys. 28 Obiekt badany z zamocowanym czujnikiem, realizacja eksperymentu.....	24
Rys. 29 Rozmieszczenie punktów pomiarowych i oznaczenie kierunków przyłożenia wymuszenia impulsowego	25
Rys. 30 Gęstość widmowa mocy sygnału wymuszenia	26
Rys. 31 Wskaźnik SUM, wynik pomiarów impulsowych słupa	27
Rys. 32 Wskaźnik MAC modelu modalnego słupa.....	28
Rys. 33 Postać drgań 1, częstotliwość 2.26 Hz, tłumienie 0.03%	28
Rys. 34 Postać drgań 2, częstotliwość 9.27 Hz, tłumienie 0.16%	29
Rys. 35 Postać drgań 4, częstotliwość 22.93 Hz, tłumienie 0.62%	29
Rys. 36 Postać drgań 6, częstotliwość 43.45 Hz, tłumienie 3.96 %	30
Rys. 37 Wizualizacja postaci drgań analizowanego słupa	32
Rys. 38 Pola naprężeń dla obliczonych postaci drgań	33
Rys. 39 Warunki brzegowe dla modelu służącego wyznaczeniu funkcji receptancji	34
Rys. 40 Przedstawienie wybranej funkcji receptancji cz.1	35
Rys. 41 Przedstawienie wybranej funkcji receptancji cz.2	35
Rys. 42 Przedstawienie wybranej funkcji receptancji cz.3	36

Rys. 43 Wykres naprężeń konstrukcji słupa NE podczas kolizji z pojazdem a) wykres naprężeń przekraczających granicę plastyczności, b) wykres naprężeń większych niż 340 MPa.	37
Rys. 44 Wykres naprężeń konstrukcji słupa LE podczas kolizji z pojazdem a) wykres naprężeń przekraczających granicę plastyczności, b) wykres naprężeń większych niż 340 MPa.	38
Rys. 45 Wykres naprężeń konstrukcji słupa HE podczas kolizji z pojazdem a) wykres naprężeń przekraczających granicę plastyczności, b) wykres naprężeń większych niż 340 MPa.	38
Rys. 46 Mocowanie słupa na stanowisku	40
Rys. 47 Widoki modelu całego stanowiska	41
Rys. 48 Widok kmodelu elementów wymuszających.....	42
Rys. 49 Pełne widoki całego stanowiska (1)	43
Rys. 50 Pełne widoki całego stanowiska (2)	44
Rys. 51 Moduł wejść/wyjść cyfrowych National Instruments NI- 9375	45
Rys. 52 Moduł wejść analogowych NI-9207	45
Rys. 53 Moduł wyjść analogowych NI-9262	46
Rys. 54 Przekładniki przemysłowe	46
Rys. 55 schemat połączenia układu pomiarowego	47
Rys. 56 Moduł oprogramowania w LabVIEW cz. 1	47
Rys. 57 Moduł oprogramowania w LabVIEW cz. 2	48
Rys. 58 Moduł oprogramowania w LabVIEW cz. 3	48
Rys. 59 Odczyt ciśnienia z siłownika pomiarowego	48

6. Literatura

- [1] I. Chowdhury and S. P. Dasgupta, "Computation of Rayleigh damping coefficients for large systems," *The Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, vol. 8, no. 0, pp. 1–11, 2003.
- [2] M. Liu and D. G. Gorman, "Formulation of Rayleigh damping and its extensions," *Computers & structures*, vol. 57, no. 2, pp. 277–285, 1995.
- [3] S. A. Holanda, A. A. Silva, C. J. de Araújo, and A. S. de Aquino, "Study of the complex stiffness of a vibratory mechanical system with shape memory alloy coil spring actuator," *Shock and Vibration*, vol. 2014, 2014.
- [4] S. Neumark, *Concept of complex stiffness applied to problems of oscillations with viscous and hysteretic damping*. HM Stationery Office, 1962.
- [5] I. T. Midas, "User's Manual of midas NFX," *MIDAS IT*, 2011.
- [6] EN 40-3-1:2000. Lighting columns – Part 3–1: Design and verification – Specification for characteristic loads
- [7] A study on the impact between car to circular concrete pole Fang CHEN¹, Chaoqun TANG², Jianwei Zhan