



WYDZIAŁ INŻYNIERII
LĄDOWEJ I ŚRODOWISKA

Imię i nazwisko studenta: Wioletta Leszczyńska
Nr albumu: 177696
Poziom kształcenia: Studia drugiego stopnia
Forma studiów: stacjonarne
Kierunek studiów: Budownictwo
Specjalność: Konstrukcje budowlane i inżynierskie
Profil: Konstrukcje metalowe

PRACA DYPLMOWA MAGISTERSKA

Tytuł pracy w języku polskim: Modelowanie wiatru w programie RFEM jako obciążenie konstrukcji w odniesieniu do podejścia normowego

Tytuł pracy w języku angielskim: Wind modeling in RFEM as structure loading with reference to the code approach

Opiekun pracy: dr inż. Wojciech Migda

OŚWIADCZENIE dotyczące pracy dyplomowej zatytułowanej: Modelowanie wiatru w programie RFEM jako obciążenie konstrukcji w odniesieniu do podejścia normowego

Imię i nazwisko studenta: Wioletta Leszczyńska
Data i miejsce urodzenia: 25.01.1998, Sejny
Nr albumu: 177696

Wydział: Wydział Inżynierii Łądowej i Środowiska
Kierunek: budownictwo

Poziom kształcenia: drugi
Forma studiów: stacjonarne

Typ pracy: praca dyplomowa magisterska

Świadomy(a) odpowiedzialności karnej z tytułu naruszenia przepisów ustawy z dnia 4 lutego 1994 r. o prawie autorskim i prawach pokrewnych (t.j. Dz. U. z 2019 r. poz. 1231, z późn. zm.) i konsekwencji dyscyplinarnych określonych w ustawie z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (t.j. Dz. U. z 2020 r. poz. 85, z późn. zm.),¹ a także odpowiedzialności cywilnoprawnej oświadczam, że przedkładana praca dyplomowa została opracowana przeze mnie samodzielnie.

Niniejsza praca dyplomowa nie była wcześniej podstawą żadnej innej urzędowej procedury związanej z nadaniem tytułu zawodowego.

Wszystkie informacje umieszczone w ww. pracy dyplomowej, uzyskane ze źródeł pisanych i elektronicznych, zostały udokumentowane w wykazie literatury odpowiednimi odnośnikami zgodnie z art. 34 ustawy o prawie autorskim i prawach pokrewnych.

02.05.2023, Wioletta Leszczyńska

Data i podpis lub uwierzytelnienie w portalu uczelnianym Moja PG

**) Dokument został sporządzony w systemie teleinformatycznym, na podstawie §15 ust. 3b Rozporządzenia MNiSW z dnia 12 maja 2020 r. zmieniającego rozporządzenie w sprawie studiów (Dz.U. z 2020 r. poz. 853). Nie wymaga podpisu ani stempla.*

¹ Ustawa z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce:

Art. 312. ust. 3. W przypadku podejrzenia popełnienia przez studenta czynu, o którym mowa w art. 287 ust. 2 pkt 1–5, rektor niezwłocznie poleca przeprowadzenie postępowania wyjaśniającego.

Art. 312. ust. 4. Jeżeli w wyniku postępowania wyjaśniającego zebrany materiał potwierdza popełnienie czynu, o którym mowa w ust. 5, rektor wstrzymuje postępowanie o nadanie tytułu zawodowego do czasu wydania orzeczenia przez komisję dyscyplinarną oraz składa zawiadomienie o podejrzeniu popełnienia przestępstwa.

STRESZCZENIE

Cztery hale o zróżnicowanych wymiarach i dwuspadowym dachu zostały obciążone typowym obciążeniem w sposób zgodny z Eurokodem oraz wiatrem stosując dwa podejścia. W pierwszym przypadku zastosowano się do zapisów normowych, natomiast w drugim wykonano symulację przepływu wiatru CFD w programie RWIND 2. Na podstawie wyników dowiedziono, że konstrukcje zaprojektowane zgodnie z zapisami normowymi, dają ok. 50% zapas nośności, w porównaniu do tych samych konstrukcji obciążonych według eksperymentalnego podejścia numerycznego. Podczas analizy otrzymanych wyników, zauważono, że lokalizacja najbardziej wyężonych przekrojów elementów konstrukcji, różni się w zależności od zastosowanej metody obciążenia. Fakt ten najprawdopodobniej związany jest z przyjętym modelem turbulencji RAS k-ε, który posiada liczne uśrednienia, jednak jest modelem najbardziej korzystnym w przypadku czasu poświęconego na symulację.

Słowa kluczowe: obciążenie wiatrem, numeryczna dynamika płynów, analiza CFD, RWIND 2

Dziedzina nauki i techniki, zgodnie z wymogami OECD: inżynieria lądowa, inżynieria budowlana

ABSTRACT

Four halls with varying dimensions and a double-pitched were loaded with typical loads in accordance with Eurocode and wind using two approaches. In the first case, the normative provisions were applied, while in the second, wind flow simulation using CFD in the RWIND 2 program was performed. Based on the results, it was shown that structures designed in accordance with normative provisions have approximately 50% load-bearing capacity reserve compared to the same structures loaded using the experimental numerical approach. During the analysis of the obtained results, it was noticed that the location of the most strained cross-sections of the structural elements differs depending on the applied loading method. This fact is most likely related to the adopted RAS k- ϵ turbulence model, which has numerous averaging, but is the most favorable model in terms of the time spent on simulation.

Keywords: wind loading, computational fluid dynamics, CFD analysis, RWIND 2

SPIS TREŚCI

WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ I SKRÓTÓW	7
1. WSTĘP I ZAKRES PRACY	8
1.1. Wprowadzenie	8
1.2. Modelowanie przepływu wiatru w sposób numeryczny	8
2. CZĘŚĆ ANALITYCZNA.....	10
2.1. Modele obliczeniowe	10
2.1.1. Hala nr 1	12
2.1.2. Hala nr 2	13
2.1.3. Hala nr 3	14
2.1.4. Hala nr 4	15
2.1.5. Sumaryczne zużycie stali	16
2.2. Obciążenia konstrukcji.....	16
2.2.1. Obciążenie konstrukcji wiatrem – podejście normowe.....	17
2.2.1.1. Symulacja przepływu wiatru w numerycznym tunelu aerodynamicznym w programie RWIND 2	19
2.2.1. Obciążenie konstrukcji wiatrem – podejście eksperymentalne	23
2.3. Kombinacje obciążeń	25
2.3.1. Podejście normowe.....	26
2.3.1. Podejście eksperymentalne	26
2.4. Wyniki	26
2.4.1. Podejście normowe.....	26
2.4.1.1. Hala nr 1	26
2.4.1.2. Hala nr 2	28
2.4.1.3. Hala nr 3	29
2.4.1.4. Hala nr 4	31
2.4.2. Podejście eksperymentalne	35
2.4.2.1. Hala nr 1	35
2.4.2.2. Hala nr 2	37
2.4.2.3. Hala nr 3	38

2.4.2.4. Hala nr 4	40
2.5. Analiza wyników	44
2.5.1. Wytężenia przekrojów	44
2.5.1.1. Hala nr 1	44
2.5.1.2. Hala nr 2	45
2.5.1.3. Hala nr 3	45
2.5.1.4. Hala nr 4	46
2.5.1. Przemieszczenia konstrukcji	49
3. PODSUMOWANIE	54
4. SPIS ILUSTRACJI	58
5. SPIS TABEL	61
WYKAZ LITERATURY	62

WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ I SKRÓTÓW

- CFD* – numeryczna dynamika płynów (ang. Computational Fluid Dynamics)
- c_p – współczynnik ciśnienia wiatru [-]
- c_{pe} – współczynnik ciśnienia zewnętrznego wiatru [-]
- $q_p(h)$ – szczytowe ciśnienie prędkości [kN/m²]
- $q_p(h)$ – szczytowe ciśnienie prędkości [kN/m²]
- SGN* – stan graniczny nośności
- SGU* – stan graniczny użyteczności
- ν – lepkość kinematyczna [m²/s]
- w_e – zewnętrzne ciśnienie wiatru [kN/m²]
- ρ – gęstość powietrza [kg/m³]

1. WSTĘP I ZAKRES PRACY

1.1. Wprowadzenie

Wiatr jest jednym z podstawowych obciążeń oddziaływujących na konstrukcje budowlane. Ze względu na jego losowy charakter jest zagadnieniem złożonym i trudnym do ujednoczenia. W normie PN-EN 1991-1-4 [1] podjęto próbę usystematyzowania obciążenia wiatrem, dokonując podziału Polski na strefy wiatrowe. W Eurokodzie przedstawiono również klasyfikację kategorii terenu, aby z jak najmniejszym błędem odwzorować obciążenie wiatrem działające na dany obiekt. Wskazana norma ma jednak pewne ograniczenie, które dotyczy zastosowania zapisów normowych wyłącznie do obiektów posiadających określoną formę geometryczną. W przypadku skomplikowanych brył budynku, podstawowe schematy obliczeniowe przestają mieć uzasadnienie [2]. Wówczas należy przyjąć podejście polegające na przeprowadzeniu badań modelu konstrukcji w tunelu aerodynamicznym lub przeprowadzeniu symulacji numerycznych w programach inżynierskich.

Dynamiczny rozwój inżynierii cyfrowej spowodował wprowadzanie na rynek licznych zaawansowanych narzędzi usprawniających pracę inżynierów w wielu dziedzinach. Inżynierowie budownictwa mają do dyspozycji m. in. programy do modelowania konstrukcji, wykonywania analiz statyczno-wytrzymałościowych a także przeprowadzania symulacji przepływu wiatru w kontekście obciążenia konstrukcji. Wśród dostępnego oprogramowania do symulacji obciążenia wiatrem możemy skorzystać z ANSYS AIM [3], Autodesk Robot Structural Analysis [4] SOLIDWORKS Flow Simulation [5] oraz RWIND Simulation [6]. Programy te pozwalają na przeprowadzenie analizy przepływu powietrza z dużą szczegółowością, która ma bezpośredni wpływ na bezpieczne projektowanie i optymalizowanie konstrukcji.

Celem niniejszej pracy magisterskiej jest porównanie wpływu obciążenia konstrukcji wiatrem wygenerowanym za pomocą programu RWIND 2 firmy Dlubal na wyężenia przekrojów elementów konstrukcji oraz przemieszczenia z wynikami otrzymanymi z obciążenia konstrukcji zgodnie z podejściem normowym. Chcąc zminimalizować liczbę składowych, mających wpływ na uzyskanie błędnego wyniku, postanowiono przeprowadzić analizę dla prostych brył konstrukcji hal o dachu dwuspadowym.

1.2. Modelowanie przepływu wiatru w sposób numeryczny

Symulacja przepływu wiatru w programach inżynierskich opiera się na zasadzie mechaniki płynów, gdzie poruszającym się ośrodkiem ciągłym jest powietrze. Zastosowana metoda nazywana jest numeryczną dynamiką płynów CFD (ang. Computational Fluid Dynamics). Rozwiązanie to wykorzystuje równania ciągłości oraz równania Naviera-Stockesa, dzięki którym możliwe jest przewidywanie zachowania ośrodka ciągłego w różnych warunkach przepływu. Zastosowany jest również model turbulencji RANS $k-\epsilon$, który do określenia pola prędkości i ciśnienia dla rozpatrywanego turbulentnego ruchu powietrza wykorzystuje hipotezę uśredniania Reynoldsa [7]. Programy do symulacji przepływu wiatru wykorzystują również metodę elementów

skończonych do rozwiązania równań odnoszących się do siatki punktów, którą pokryta jest analizowana konstrukcja. Dzięki temu możliwe jest określenie prędkości, ciśnienia i gęstości przepływającego ośrodka ciągłego w każdym punkcie przestrzeni. Mechanika płynów CFD wykorzystywana jest w wielu dziedzinach, m. in. do projektowania zabezpieczeń przeciwpożarowych [8] [9], medycynie [10] i biotechnologii [11].

Stosowany do opracowania niniejszej pracy dyplomowej program RWIND 2 również wykorzystuje numeryczną dynamikę płynów. Program może być stosowany osobno lub we współpracy z programem RFEM 6. W celu przeprowadzenia analizy, niezbędne jest wykonanie modelu konstrukcji w środowisku 3D, a następnie zaimportowanie jej do domeny obliczeniowej programu RWIND 2. Po przeprowadzeniu obliczeń z programu można odczytać m. in. wyniki w postaci ciśnienia na powierzchnię konstrukcji, rozkład współczynnika c_p , wektory prędkości wiatru względem geometrii konstrukcji oraz kierunek i wartość oporu aerodynamicznego [12].

2. CZĘŚĆ ANALITYCZNA

2.1. Modele obliczeniowe

W niniejszych badaniach numerycznych do zamodelowania konstrukcji wykorzystano program RFEM 6 firmy Dlubal. Analizie poddano cztery hale stalowe zaprojektowane na planie prostokąta

o wymiarach (długość x szerokość):

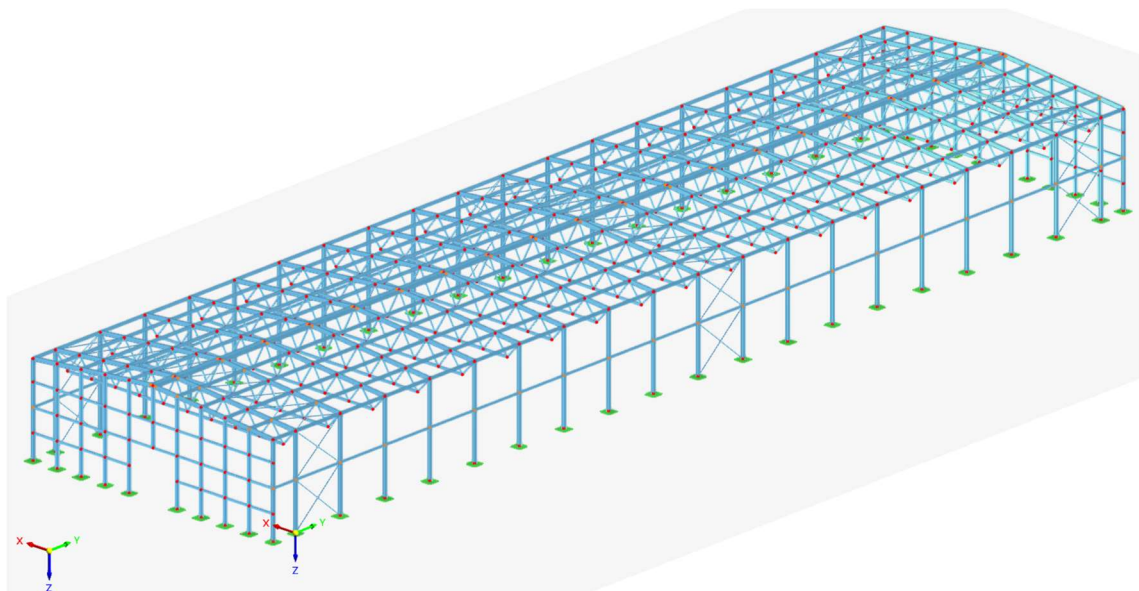
- 114 x 30 m;

- 114 x 15 m;

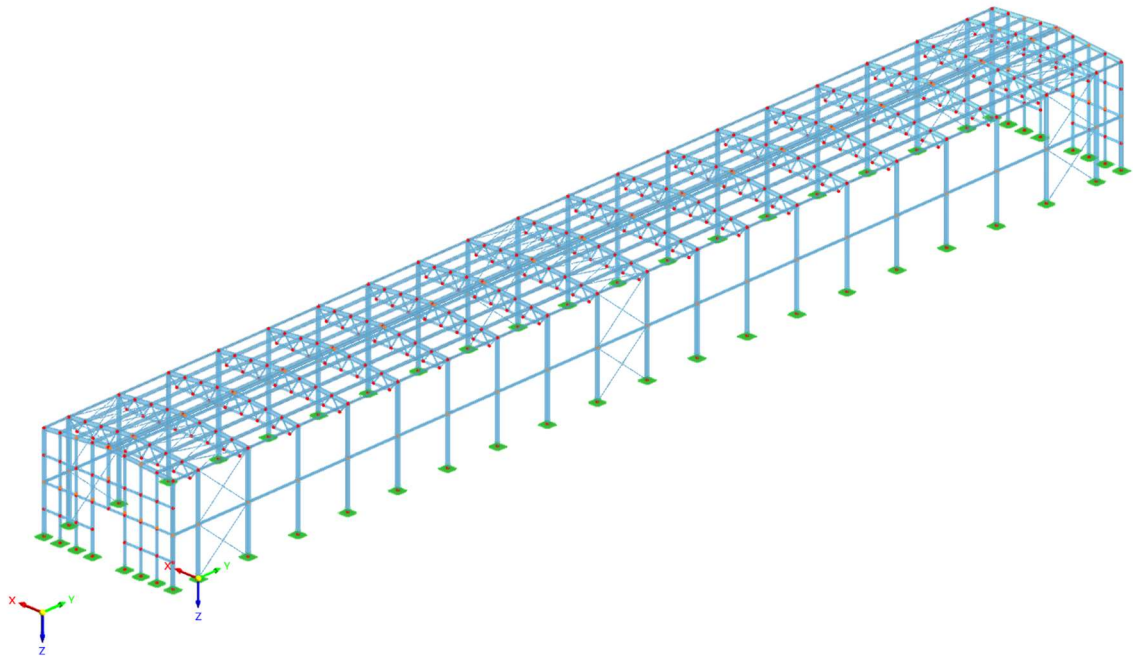
- 42 x 30 m;

- 42 x 15 m.

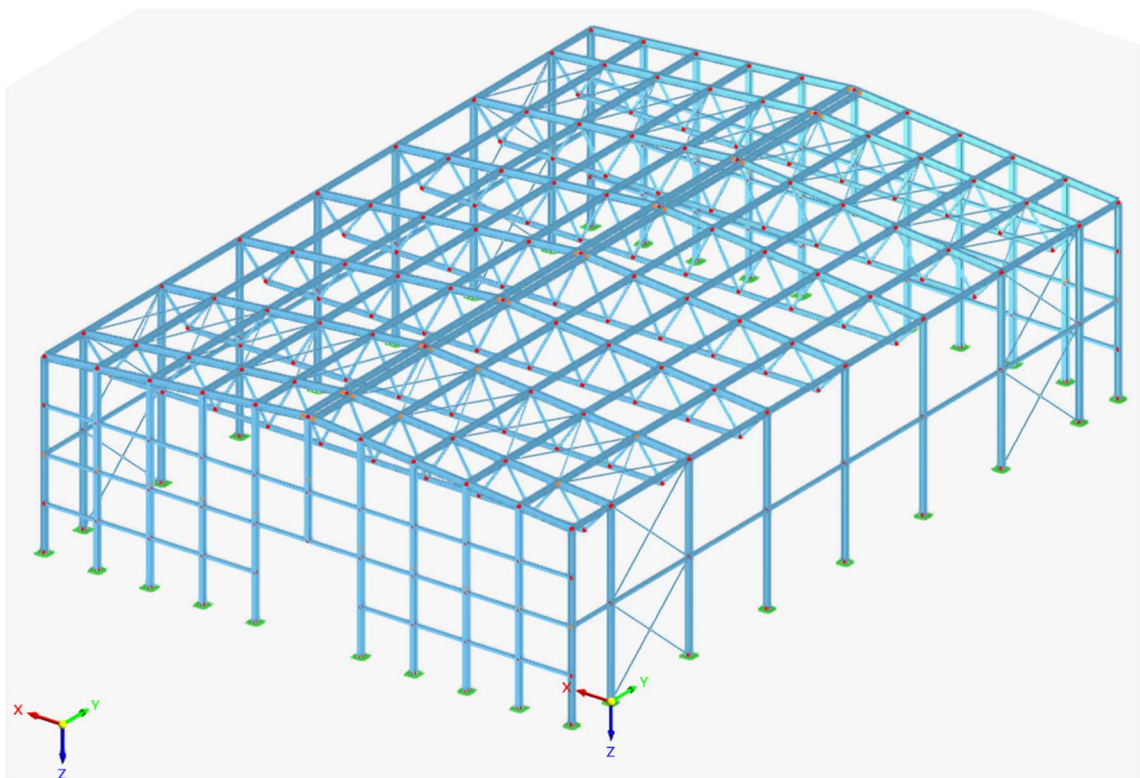
Wszystkie hale posiadają dwuspadowy dach o nachyleniu 5° . W każdym modelu konstrukcji przewidziano samostateczny wiązarkratownicowy bez zwolnień na krzyżulcach, ponieważ założono ich połączenie z pasami jako spawane. W kierunku podłużnym przyjęto 6-metrowy rozstaw słupów i dźwigarów. Wysokość słupów w każdej z hal wynosi 10m. Wizualizacje konstrukcji przedstawiono na rysunkach 1 – 4. Dla każdej z hal dobrano najbardziej korzystne przekroje dla obciążeń zadanych według procedury normowej opisanych w punkcie 2.2. Szczegółowy opis poszczególnych konstrukcji opisano w podrozdziałach 2.1.1 – 2.1.4. Jako lokalizację przyjęto miejscowość Kartuzy w powiecie kartuskim w województwie pomorskim. Szacowana wysokość terenu wynosi ok. 230 m n.p.m.



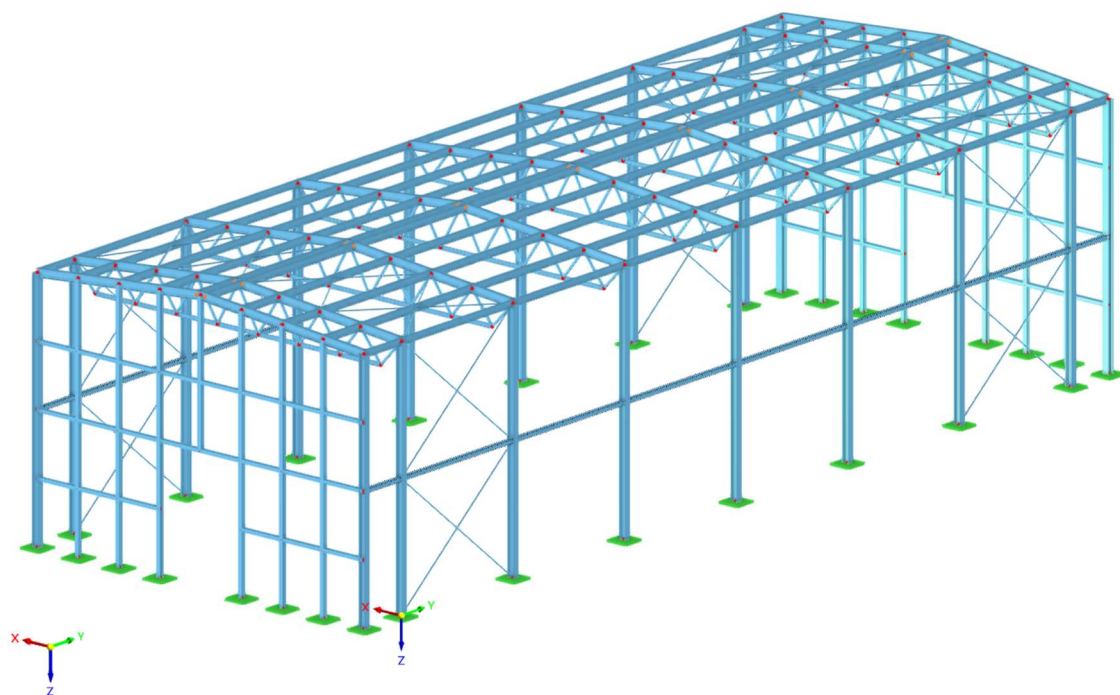
Rys. 1. Wizualizacja hali nr 1 o wymiarach 114 x 30 m.



Rys. 2. Wizualizacja hali nr 2 o wymiarach 114 x 15 m.



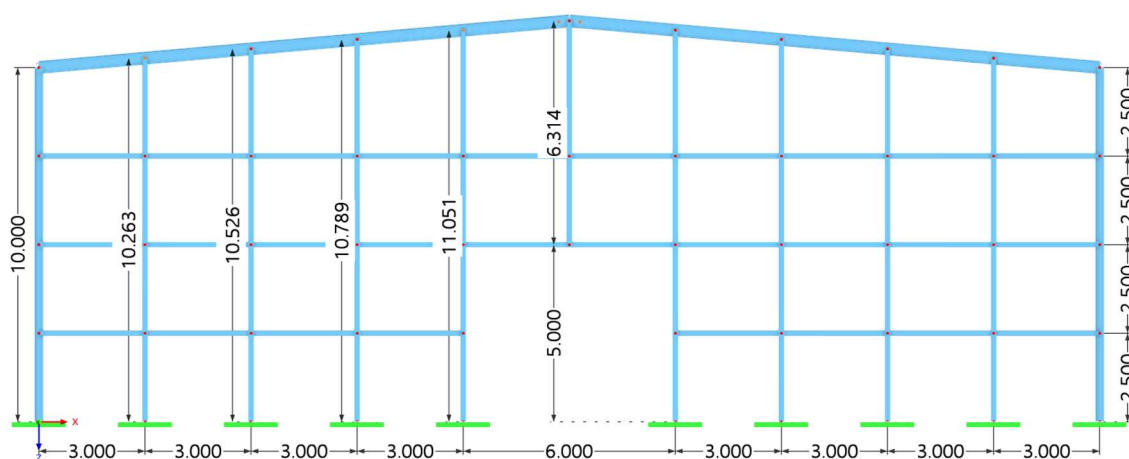
Rys. 3. Wizualizacja hali nr 3 o wymiarach 42 x 30 m.



Rys. 4. Wizualizacja hali nr 4 o wymiarach 42 x 15 m.

2.1.1. Hala nr 1

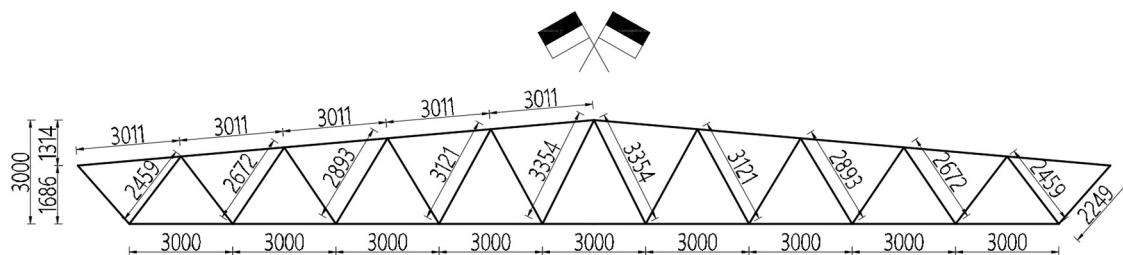
Dla słupów głównych, na których opierają się dźwigary kratowe, przyjęto przekrój HEB 220. Słupy skrajne ściany szczytowej przyjęto również jako HEB 220, natomiast pozostałe z dwuteownika IPE270, którego półka zlicowana jest z płaszczyzną ściany szczytowej. Widok ściany szczytowej z wymiarami poszczególnych elementów przedstawiono na rysunku 5. W ścianie szczytowej przewidziano otwór drzwiowy o wymiarach 6 x 5 m. Rygle ściany szczytowej zaprojektowano z profili kwadratowych zamkniętych formowanych na zimno SHC 120x5.



Rys. 5. Widok ściany szczytowej hali nr 1.

Pas górny kratownicy przyjęto jako IPE 330, natomiast pas dolny IPE180. Skrajne krzyżulce utworzono z profili SHC 65x5, natomiast środkowe krzyżulce z profili SHC 60x4,5. Wymiary

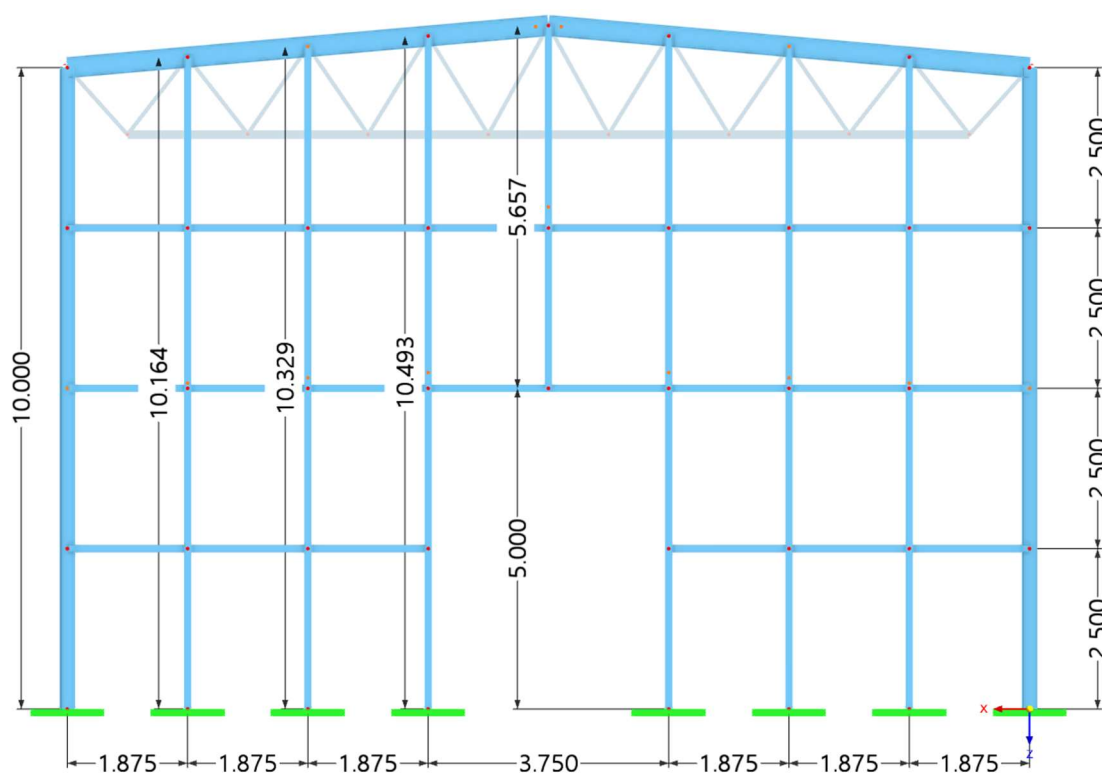
kratownicy przedstawiono na rysunku 6. Płatwie w poziomym rozstawie 3 m zaprojektowano z profili IPE 220, a płatew okapową jako IPE 240. Stężenia wiatrowe ścienne zamodelowano z prętów okrągłych $\varnothing 14$ natomiast dachowe $\varnothing 12$.



Rys. 6. Wymiary kratownicy hali nr 1.

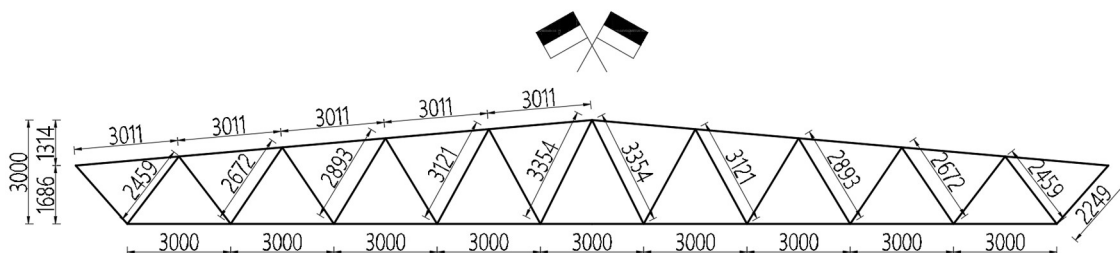
2.1.2. Hala nr 2

Dla słupów głównych, na których opierają się dźwigary kratowe, przyjęto przekrój HEB 220. Słupy skrajne ściany szczytowej przyjęto również jako HEB 220, natomiast pozostałe z dwuteownika IPE220, którego półka zlicowana jest z płaszczyzną ściany szczytowej. Widok ściany szczytowej z wymiarami poszczególnych elementów przedstawiono na rysunku 7. W ścianie szczytowej przewidziano otwór drzwiowy o wymiarach 3,75 x 5 m. Rygle ściany szczytowej zaprojektowano z profili kwadratowych zamkniętych formowanych na zimno SHC 100x4,5.



Rys. 7. Widok ściany szczytowej hali nr 2.

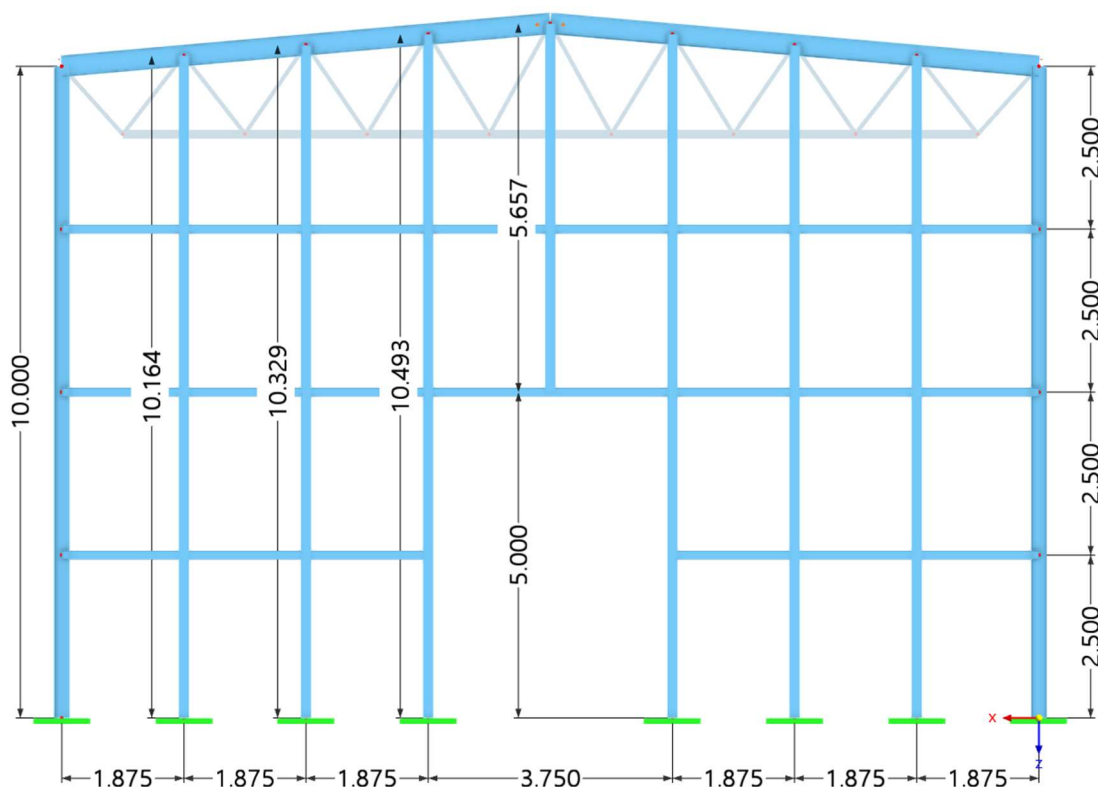
Pas górny kratownicy przyjęto jako IPE 330, natomiast pas dolny IPE100. Krzyżulce kratownicy utworzono z profili SHC 50x4,5, natomiast skrajne krzyżulce z SHC 50x4. Wymiary kratownicy



Rys. 10. Wymiary kratownicy hali nr 3.

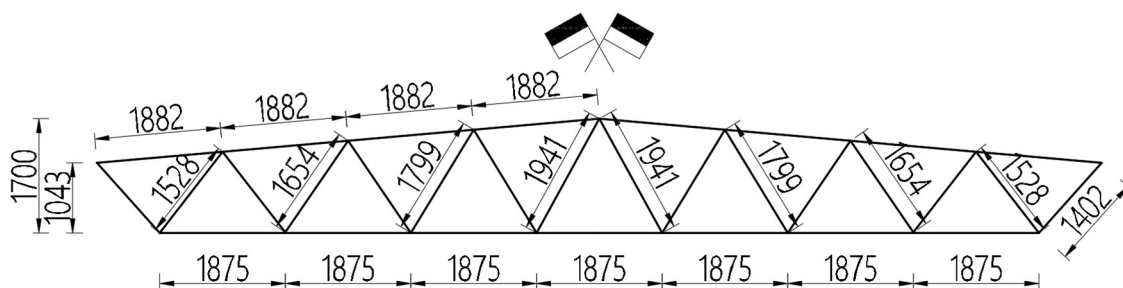
2.1.4. Hala nr 4

Dla słupów głównych, na których opierają się dźwigary kratowe, przyjęto przekrój HEB 220. Słupy skrajne ściany szczytowej przyjęto również jako HEB 220, natomiast pozostałe z dwuteownika HEB160, którego półka zlicowana jest z płaszczyzną ściany szczytowej. Widok ściany szczytowej z wymiarami poszczególnych elementów przedstawiono na rysunku 11. W ścianie szczytowej przewidziano otwór drzwiowy o wymiarach 3,75 x 5 m. Rygle ściany szczytowej zaprojektowano z profili kwadratowych zamkniętych formowanych na zimno SHC 120x4.



Rys. 11. Widok ściany szczytowej hali nr 4.

Pas górny kratownicy przyjęto jako IPE 330, natomiast pas dolny IPE100. Krzyżulce utworzono z profili SHC 50x5. Wymiary kratownicy przedstawiono na rysunku 12. Płatwie w poziomym rozstawie 1,875 m zaprojektowano z profili IPE 220. Stężenia wiatrowe ścienne oraz dachowe zamodelowano z prętów okrągłych $\varnothing 12$.



Rys. 12. Wymiary kratownicy hali nr 4.

2.1.5. Sumaryczne zużycie stali

W tabeli nr 1 przedstawiono sumaryczne zużycie stali dla każdej z hal w przeliczeniu na m² powierzchni.

Tab. 1. Sumaryczne zużycie stali dla hal nr 1-4.

Numer hali	Długość hali [m]	Szerokość hali [m]	Powierzchnia [m ²]	Ciężar całkowity [t]	Zużycie stali [kg/m ²]
1	114	30	3420	126,923	37,11
2	114	15	1710	86,349	50,50
3	42	30	1260	62,761	49,81
4	42	15	630	41,12	65,27

2.2. Obciążenia konstrukcji

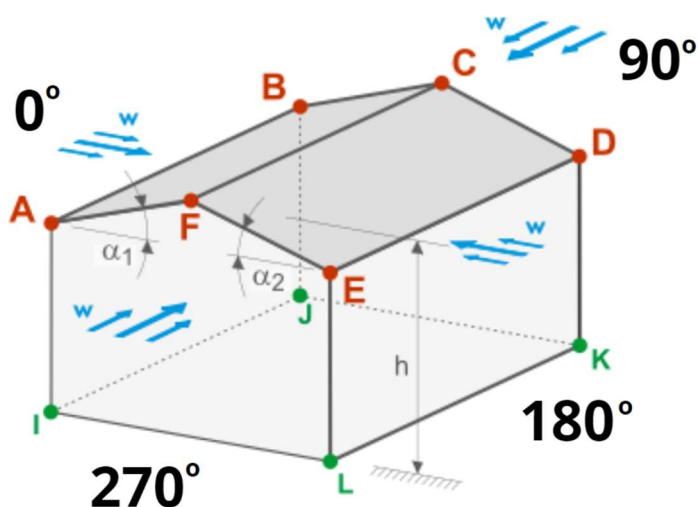
W każdym modelu uwzględniono ciężar własny konstrukcji. Jako obciążenie technologiczne przyjęto obciążenie rzutowane na płatwie dachu o wartości 0,15 kN/m², rozłożone na całej jego powierzchni. Dodano także symetryczne obciążenie śniegiem zgodnie z procedurą normową [13] dla budynku z dachem dwuspadowym o nachyleniu połaci 5°. Przyjęta lokalizacja odpowiada 3 strefie obciążenia śniegiem. Założono, że badane konstrukcje umiejscowione są jak dla terenu kategorii II. Współczynnik ekspozycji C_e oraz współczynnik termiczny C_t przyjęto równy 1,0. Obciążenie śniegiem w wartości 0,96 kN/m² oraz obciążenie technologiczne zostało przyłożone wyłącznie do płatwi. W tabeli 2 przedstawiono przypadki obciążeń odpowiadające poszczególnym oznaczeniom w modelu obliczeniowym dla podejścia normowego i eksperymentalnego.

Tab. 2. Przypadki obciążeń według podejścia normowego i eksperymentalnego.

Symbol przypadku obciążenia	Obciążenie
PO1	ciężar własny
PO2	obciążenie technologiczne
PO3	symetryczne obciążenie śniegiem
PO4	obciążenie wiatrem 0°
PO5	obciążenie wiatrem 90°
PO6	obciążenie wiatrem 180°
PO7	obciążenie wiatrem 270°

2.2.1. Obciążenie konstrukcji wiatrem – podejście normowe

Konstrukcję obciążono wiatrem zgodnie z podejściem normowym, korzystając z gotowych narzędzi zaimplementowanych w programie RFEM 6. Przyjęta lokalizacja odpowiada 2 strefie obciążenia wiatrem. Analogicznie jak dla śniegu, przyjęto II kategorię terenu. Wysokość n. p. m. założono na poziomie 230 m. Gęstość powietrza równa jest $1,25 \text{ kg/m}^3$. Podstawowa prędkość wiatru oraz bazowe ciśnienie prędkości odczytane z programu wynoszą odpowiednio $v_{b,0}=26 \text{ m/s}$ i $q_b=0,42 \text{ kN/m}^2$. Współczynnik kierunkowy i współczynnik sezonowy są równe 1,0. Każdą z konstrukcji obciążono czterema przypadkami wiatru, który wieje o kierunku i zwrocie przedstawionym na rysunku 13. W programie przyjęto przypadek w+. Obciążenie wiatrem przyłożono do słupów głównych i słupów ściany szczytowej oraz do płatwi. Otrzymane wartości obciążenia wiatrem dla każdej z hal przedstawiono w tabelach 3-6.

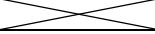


Rys. 13. Zwrot i kierunek działania wiatru na konstrukcję. (źródło: [14] edytowane przez autora)

Tab. 3. Obciążenie wiatrem dla hali nr 1.

Kierunek wiatru [°]	Strefa							
	A	D	E	F	G	H	I	J
	Współczynnik ciśnienia zewnętrznego c_{pe} [-]							
0	-1,20	0,72	-0,33	0,00	0,00	0,00	0,00	0,20
90	-1,20	0,70	-0,30	0,00	0,00	0,00	0,00	-
180	-1,20	0,72	-0,33	0,00	0,00	0,00	0,00	0,20
270	-1,20	0,70	-0,30	0,00	0,00	0,00	0,00	-
	Zewnętrzne ciśnienie wiatru w_e [kN/m²]							
0	-1,20	0,72	-0,33	0,00	0,00	0,00	0,00	0,20
90	-1,20	0,70	-0,30	0,00	0,00	0,00	0,00	-
180	-1,20	0,72	-0,33	0,00	0,00	0,00	0,00	0,20
270	-1,20	0,70	-0,30	0,00	0,00	0,00	0,00	-


Tab. 4. Obciążenie wiatrem dla hali nr 2.

Kierunek wiatru [°]	Strefa							
	A	D	E	F	G	H	I	J
	Współczynnik ciśnienia zewnętrznego c_{pe} [-]							
0	-1,20	0,76	-0,42	0,00	0,00	0,00	0,00	0,20
90	-1,20	0,70	-0,30	0,00	0,00	0,00	0,00	-
180	-1,20	0,76	-0,42	0,00	0,00	0,00	0,00	0,20
270	-1,20	0,70	-0,30	0,00	0,00	0,00	0,00	-
	Zewnętrzne ciśnienie wiatru w_e [kN/m ²]							
0	-1,18	0,75	-0,42	0,00	0,00	0,00	0,00	0,20
90	-1,18	0,69	-0,30	0,00	0,00	0,00	0,00	-
180	-1,18	0,75	-0,42	0,00	0,00	0,00	0,00	0,20
270	-1,18	0,69	-0,30	0,00	0,00	0,00	0,00	-

Tab. 5. Obciążenie wiatrem dla hali nr 3.

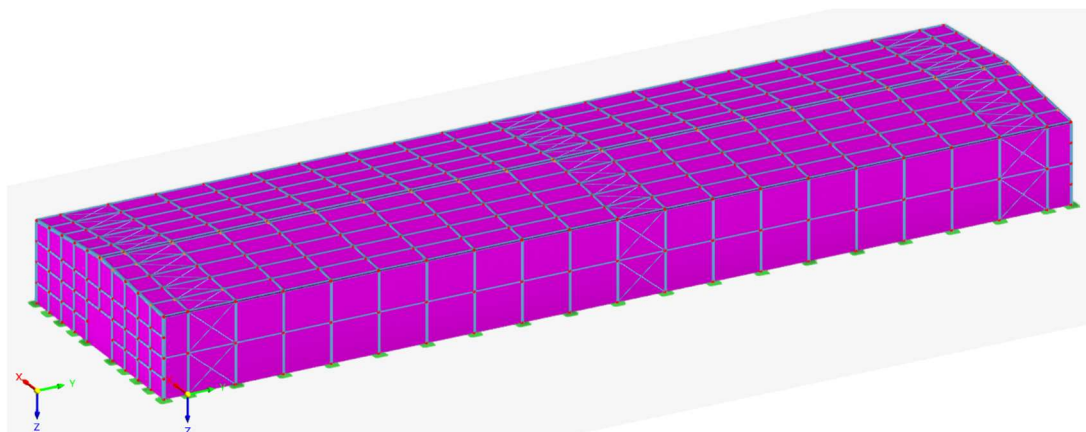
Kierunek wiatru [°]	Strefa							
	A	D	E	F	G	H	I	J
	Współczynnik ciśnienia zewnętrznego c_{pe} [-]							
0	-1,20	0,72	-0,33	0,00	0,00	0,00	0,00	0,20
90	-1,20	0,70	-0,31	0,00	0,00	0,00	0,00	-
180	-1,20	0,72	-0,33	0,00	0,00	0,00	0,00	0,20
270	-1,20	0,70	-0,31	0,00	0,00	0,00	0,00	-
	Zewnętrzne ciśnienie wiatru w_e [kN/m ²]							
0	-1,20	0,72	-0,33	0,00	0,00	0,00	0,00	0,20
90	-1,20	0,70	-0,31	0,00	0,00	0,00	0,00	-
180	-1,20	0,72	-0,33	0,00	0,00	0,00	0,00	0,20
270	-1,20	0,70	-0,31	0,00	0,00	0,00	0,00	-

Tab. 6. Obciążenie wiatrem dla hali nr 4.

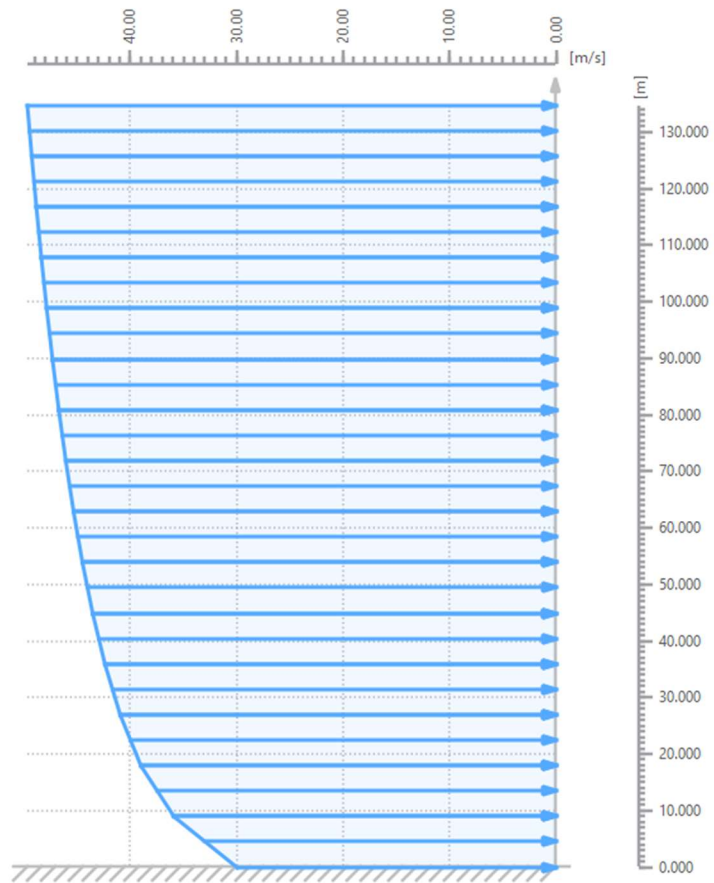
Kierunek wiatru [°]	Strefa							
	A	D	E	F	G	H	I	J
	Współczynnik ciśnienia zewnętrznego c_{pe} [-]							
0	-1,20	0,76	-0,42	0,00	0,00	0,00	0,00	0,20
90	-1,20	0,70	-0,30	0,00	0,00	0,00	0,00	-
180	-1,20	0,76	-0,42	0,00	0,00	0,00	0,00	0,20
270	-1,20	0,70	-0,30	0,00	0,00	0,00	0,00	-
	Zewnętrzne ciśnienie wiatru w_e [kN/m ²]							
0	-1,18	0,75	-0,42	0,00	0,00	0,00	0,00	0,20
90	-1,18	0,69	-0,30	0,00	0,00	0,00	0,00	-
180	-1,18	0,75	-0,42	0,00	0,00	0,00	0,00	0,20
270	-1,18	0,69	-0,30	0,00	0,00	0,00	0,00	-

2.2.1.1. Symulacja przepływu wiatru w numerycznym tunelu aerodynamicznym w programie RWIND 2

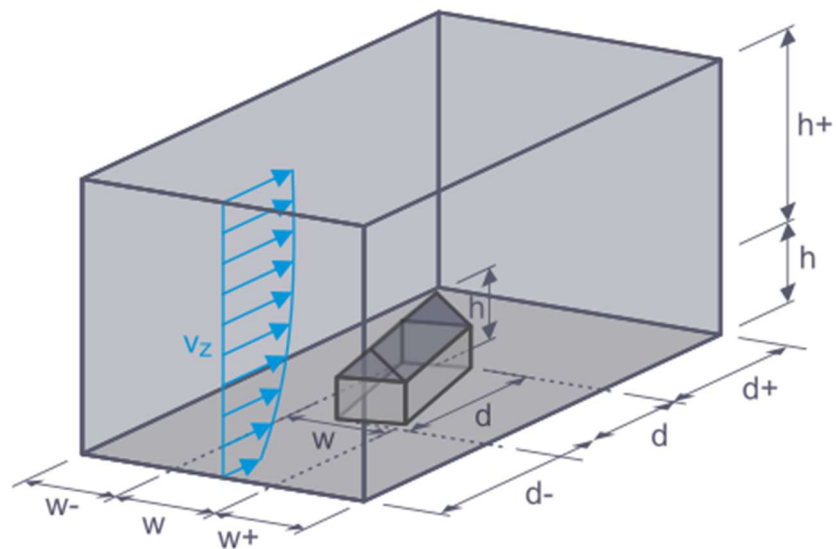
W celu obciążenia konstrukcji wiatrem za pomocą programu RWIND 2 firmy Dlubal, niezbędne było utworzenie okładzin, które pokazano na przykładzie hali nr 1 widocznej na rysunku 14. Okładziny pełnią funkcję powierzchni, które nie posiadają sztywności ani ciężaru. Ich zadaniem jest przeniesienie obciążenia na wybranych kierunkach. Elementy te były niezbędne, ponieważ bez ich użycia program uznał by konstrukcję za ażurową i przepływ wiatru nastąpiłby również przez wnętrze konstrukcji. Do obciążenia konstrukcji wiatrem zastosowano automatyczne tworzenie przypadków wiatru z krokiem co 90° co w efekcie dało cztery przypadki kierunku wiatru, analogiczne do podejścia normowego. Profil wiatru jest jednakowy jak dla obciążenia wiatrem w sposób normowy. W tym celu, za pomocą wbudowanej w programie możliwości wskazania dokładnej lokalizacji obiektu, przyjęto miejscowość Kartuzy. Tak jak dla podejścia normowego, określono kategorię terenu jako II. Profil wiatru dla przyjętych powyżej założeń wyglądał zgodnie z rysunkiem 15. W ustawieniach analizy symulacji wiatru przyjęto typ symulacji jako przepływ stacjonarny. Gęstość powietrza określono jako $\rho=1,25 \text{ kg/m}^3$, natomiast lepkość kinematyczną równą $\nu=0,000015 \text{ m}^2/\text{s}$. Włączono opcję uwzględnienia turbulencji. Model turbulencji przyjęto jako RAS k- ϵ . Dla parametrów przepływu zastosowano schemat numeryczny drugiego rzędu z maksymalną liczbą iteracji 500. Pozostałe kryteria pozostawiono zgodnie z ustawieniami sugerowanymi przez producenta oprogramowania. Program automatycznie dobrał rozmiary numerycznego tunelu aerodynamicznego (rysunek 16), których wymiary przedstawiono w tabeli 7.



Rys. 14. Hala nr 1 z okładzinami.



Rys. 15. Profil wiatru według normy PN-EN 1991 2015-10'. (źródło: [14])



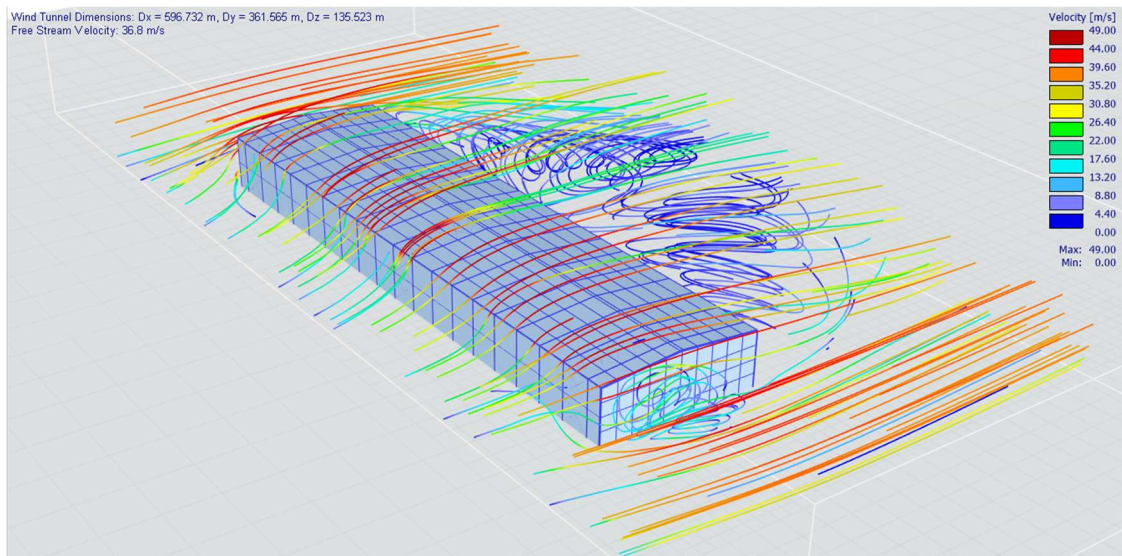
Rys. 16. Domena obliczeniowa. (źródło: [14])

Tab. 7. Wymiary domen obliczeniowych dla hal nr 1-4 z podziałem na kierunek oddziaływania wiatru.

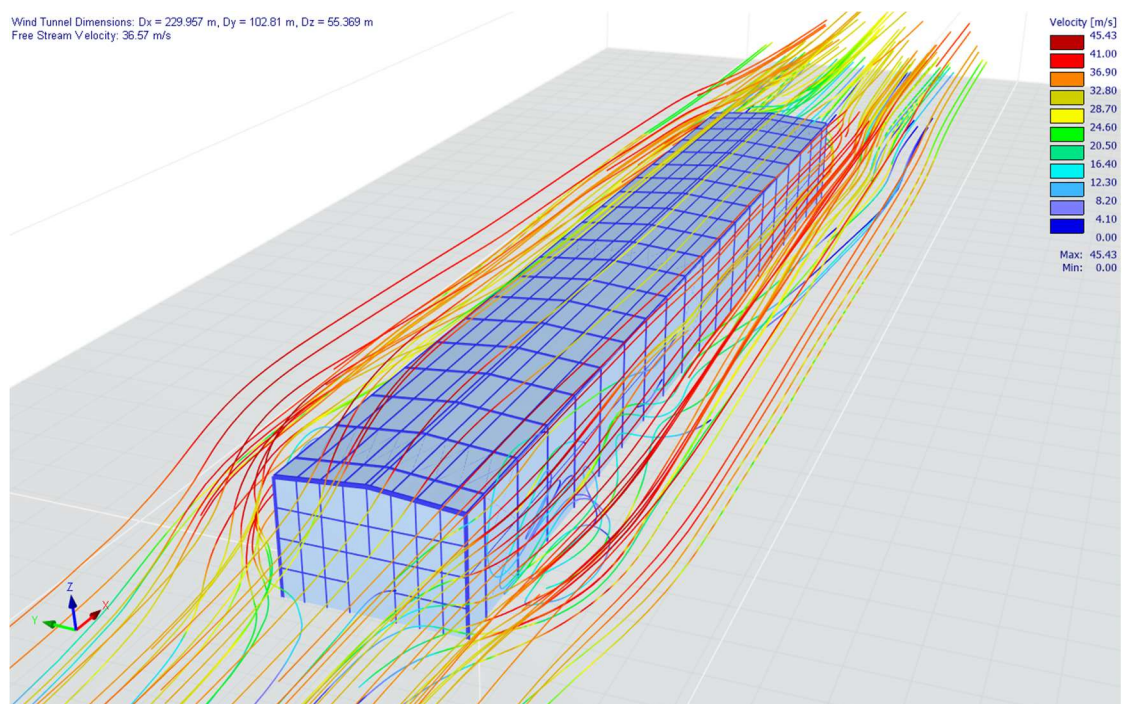
Wymiary		Hala nr 1	Hala nr 2	Hala nr 3	Hala nr 4
Wiatr o kierunku 0°					
Długość	d- [m]	169,689	167,986	62,637	60,295
	d [m]	30,220	15,220	30,200	15,220
	d+ [m]	395,942	391,968	146,153	140,688
	Suma d [m]	595,851	575,174	238,989	216,202
Szerokość	w- [m]	123,537	121,256	73,768	69,974
	w [m]	114,270	114,220	42,180	40,220
	w+ [m]	123,537	121,256	73,768	69,974
	Suma w [m]	361,344	356,732	189,716	180,169
Wysokość	h [m]	11,484	10,825	11,471	10,826
	h+ [m]	123,928	122,004	73,768	69,974
	Suma h [m]	135,413	132,830	85,239	80,800
Wiatr o kierunku 90°					
Długość	d- [m]	42,489	34,721	42,460	23,940
	d [m]	114,270	114,220	42,180	40,220
	d+ [m]	99,142	81,016	99,073	55,859
	Suma d [m]	255,901	229,957	183,713	120,018
Szerokość	w- [m]	61,562	43,587	60,484	42,398
	w [m]	30,220	15,220	30,200	15,220
	w+ [m]	61,562	43,587	60,484	42,398
	Suma w [m]	153,344	102,393	151,169	100,015
Wysokość	h [m]	11,484	10,825	11,471	10,826
	h+ [m]	61,953	44,335	60,484	42,398
	Suma h [m]	73,437	55,160	71,956	53,224
Wiatr o kierunku 180°					
Długość	d- [m]	169,689	167,986	62,637	60,295
	d [m]	30,220	15,220	30,200	15,220
	d+ [m]	395,942	391,968	146,153	140,688
	Suma d [m]	595,851	575,174	238,989	216,202
Szerokość	w- [m]	123,537	121,256	73,768	69,974
	w [m]	114,270	114,220	42,180	40,220
	w+ [m]	123,537	121,256	73,768	69,974
	Suma w [m]	361,344	356,732	189,716	180,169
Wysokość	h [m]	11,484	10,825	11,471	10,826
	h+ [m]	123,928	122,004	73,768	69,974
	Suma h [m]	135,413	132,830	85,239	80,800
Wiatr o kierunku 270°					
Długość	d- [m]	42,489	34,721	42,460	23,940
	d [m]	114,270	114,220	42,180	40,220
	d+ [m]	99,142	81,016	99,073	55,859
	Suma d [m]	255,901	229,957	183,713	120,018

Szerokość	w- [m]	61,562	43,587	60,484	42,398
	w [m]	30,220	15,220	30,200	15,220
	w+ [m]	61,562	43,587	60,484	42,398
	Suma w [m]	153,344	102,393	151,169	100,015
Wysokość	h [m]	11,484	10,825	11,471	10,826
	h+ [m]	61,953	44,335	60,484	42,398
	Suma h [m]	73,437	55,160	71,956	53,224

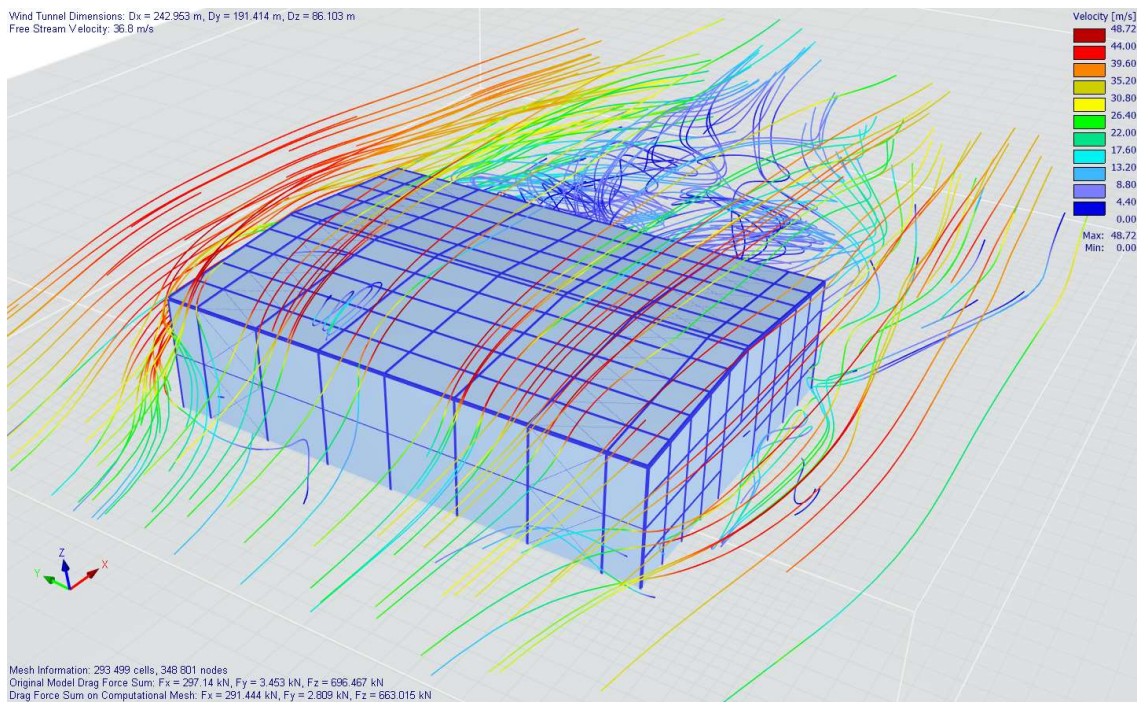
Wizualizacje symulacji przepływu wiatru dla wybranych przypadków dla hal nr 1 – 4 przedstawiono na rysunkach 17-20.



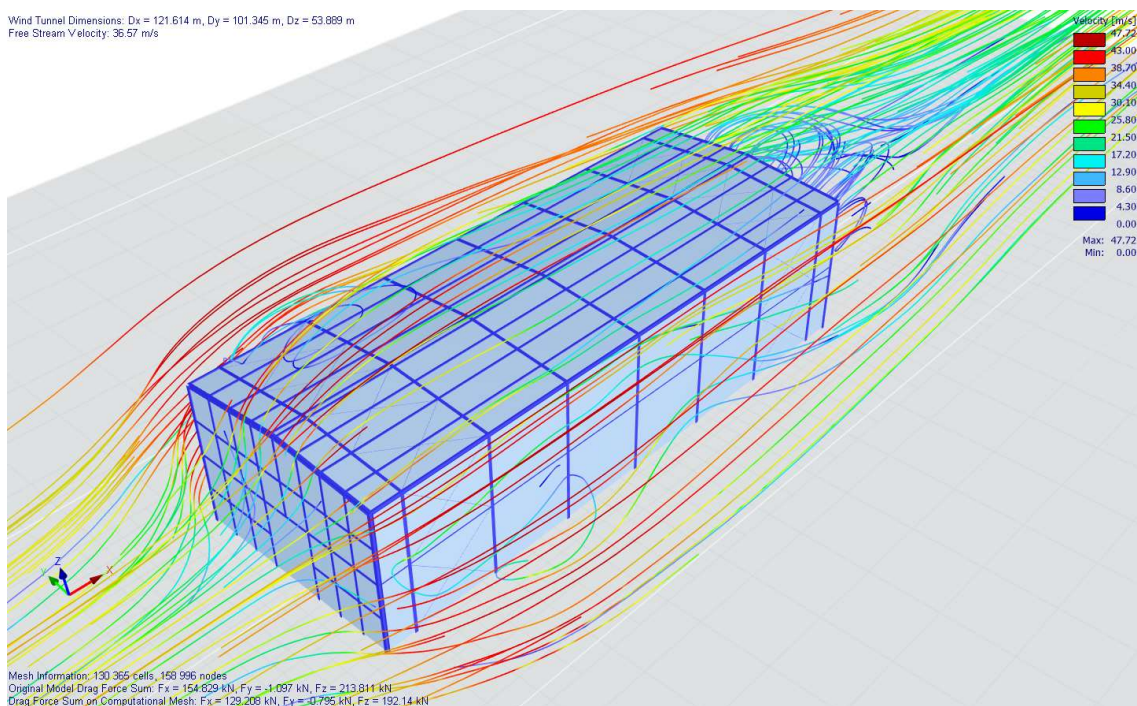
Rys. 17. Przepływ wiatru o kierunku 0° dla hali nr 1.



Rys. 18. Przepływ wiatru o kierunku 90° dla hali nr 2.



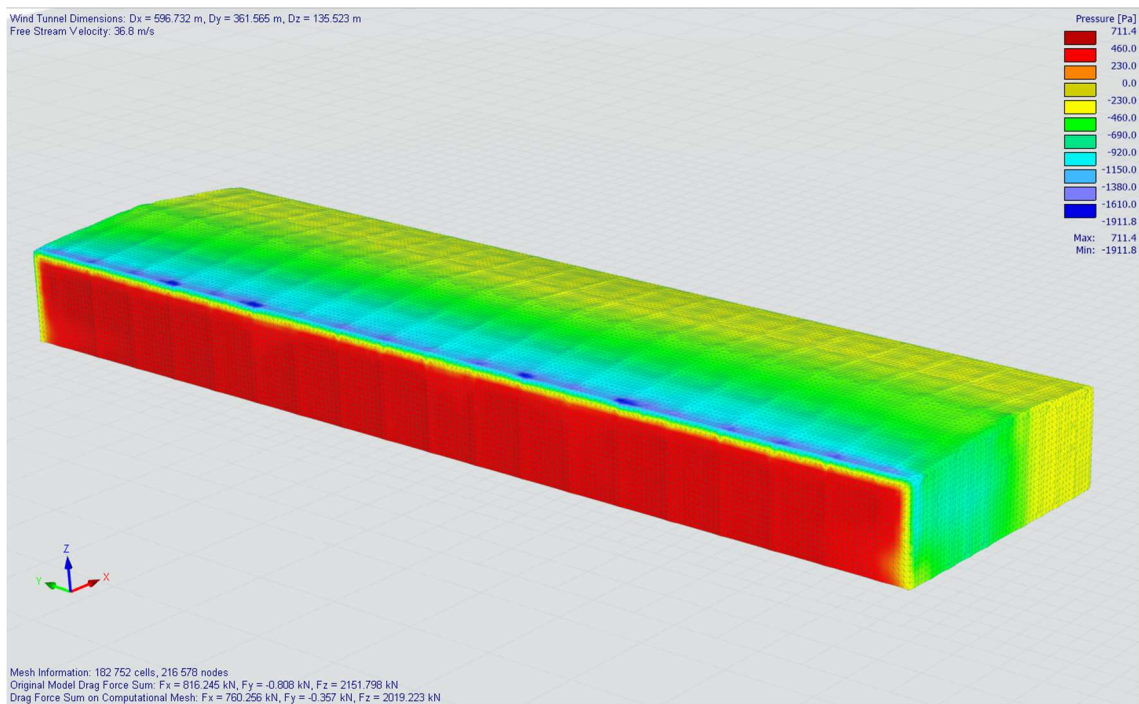
Rys. 19. Przepływ wiatru o kierunku 180° dla hali nr 3.



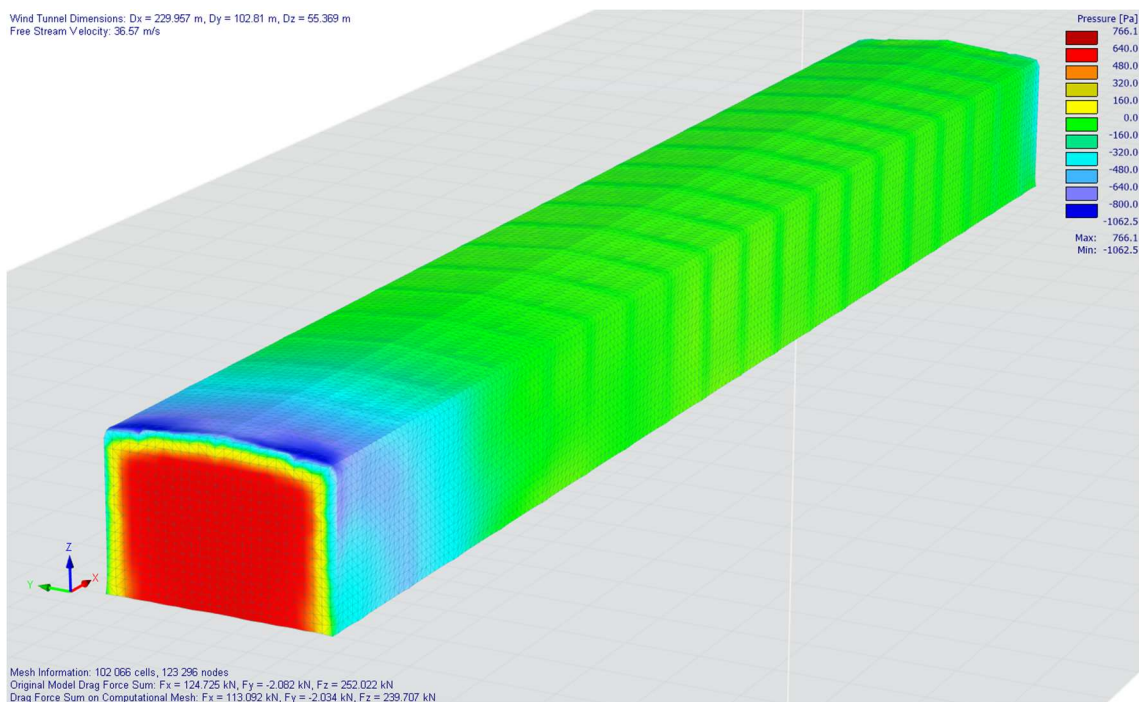
Rys. 20. Przepływ wiatru o kierunku 270° dla hali nr 4.

2.2.1. Obciążenie konstrukcji wiatrem – podejście eksperymentalne

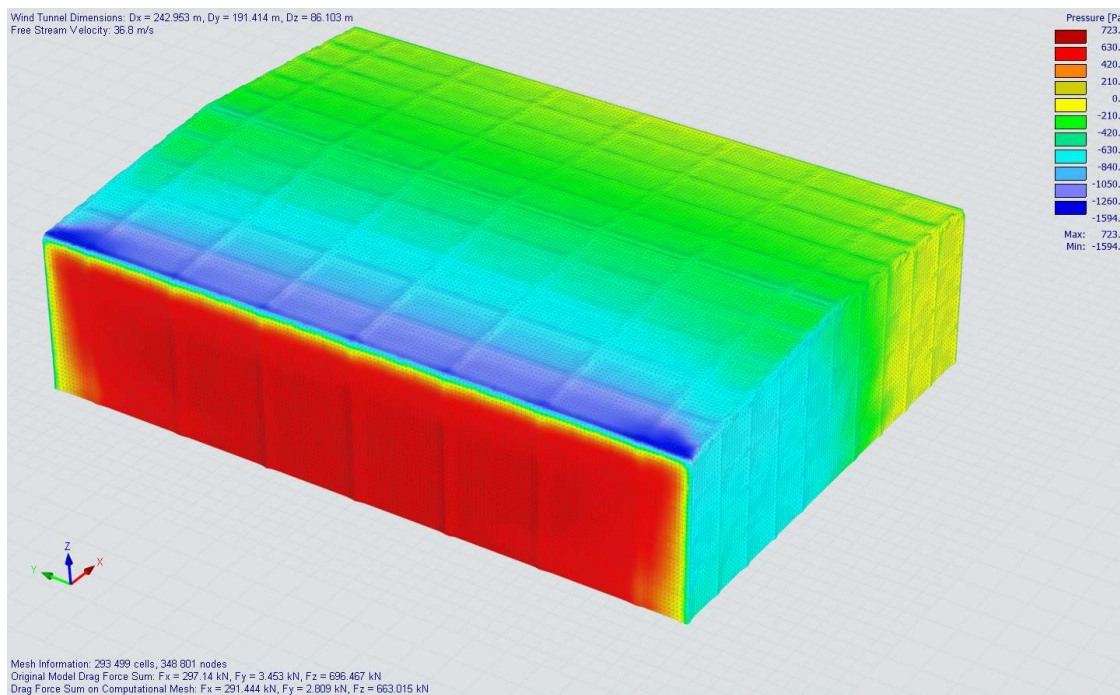
Konstrukcje zostały obciążone ciśnieniem działającym na powierzchnie budowli na podstawie przeprowadzonej symulacji przepływu wiatru. Poszczególne obciążenia wiatrem w postaci ciśnienia dla hal nr 1 – 4 przedstawiono na rysunkach 21 – 24.



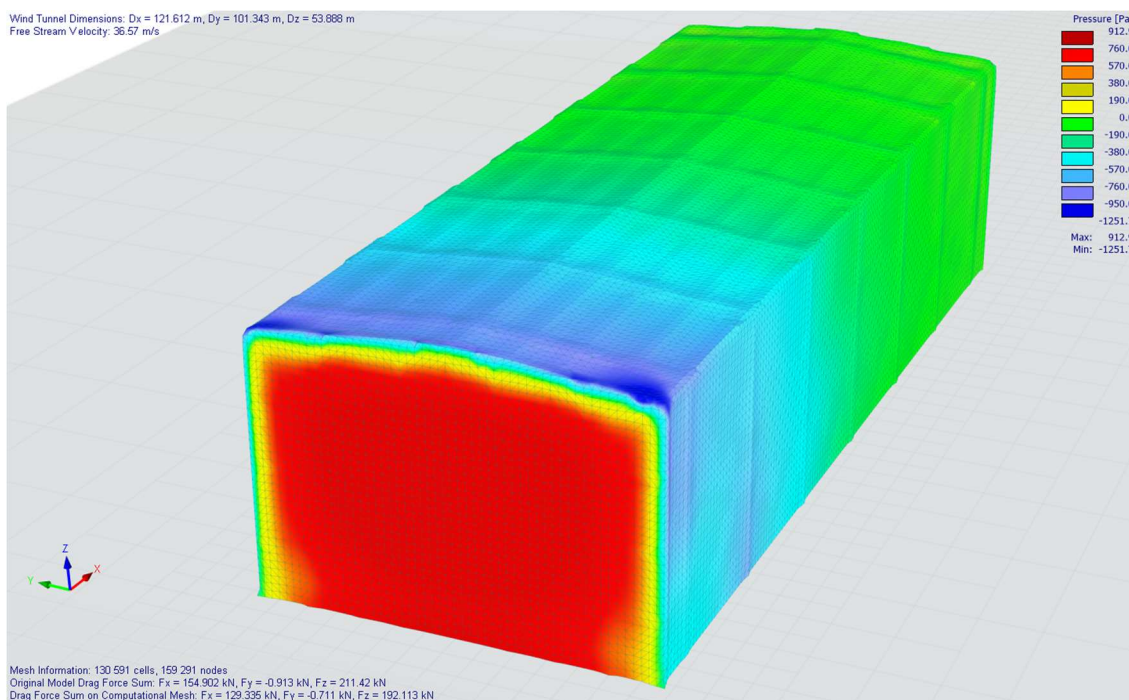
Rys. 21. Obciążenie wiatrem o kierunku 0° dla hali nr 1 – widok od strony nawietrznej.



Rys. 22. Obciążenie wiatrem o kierunku 90° dla hali nr 2 – widok od strony nawietrznej.



Rys. 23. Obciążenie wiatrem o kierunku 180° dla hali nr 3 – widok od strony nawierzchni.



Rys. 24. Obciążenie wiatrem o kierunku 270° dla hali nr 4 – widok od strony nawierzchni.

2.3. Kombinacje obciążeń

Dla wszystkich modeli utworzono po dwie sytuacje obliczeniowe – SGN i SGU – które w programie oznaczone są odpowiednio SO1 i SO2.

2.3.1. Podejście normowe

W przypadku podejścia normowego dla sytuacji obliczeniowej SGN przyjęto typ analizy jako analizę statyczną II rzędu z metodą iteracyjną dla analizy nieliniowej metodą Picarda. Maksymalna liczba iteracji wynosi 100 z przyrostem obciążenia co 1. Dla SGU założono analizę geometrycznie liniową z metodą iteracyjną Newtona-Raphsona. Elementy sterujące analizą założono jednakowe jak dla SGN. Przyjęte kombinacje obciążeń przedstawiono w tabeli 8.

Tab. 8. Kombinacje obliczeniowe dla obciążenia konstrukcji według podejścia normowego.

Symbol kombinacji obliczeniowej	Kombinacja obciążenia
KO1	$1,35 * PO1 + 1,50 * PO2 + 1,50 * PO3 + 1,50 * PO4$
KO2	$1,35 * PO1 + 1,50 * PO2 + 1,50 * PO3 + 1,50 * PO5$
KO3	$1,35 * PO1 + 1,50 * PO2 + 1,50 * PO3 + 1,50 * PO6$
KO4	$1,35 * PO1 + 1,50 * PO2 + 1,50 * PO3 + 1,50 * PO7$
KO5	$PO1 + PO2 + PO3 + PO4$
KO6	$PO1 + PO2 + PO3 + PO5$
KO7	$PO1 + PO2 + PO3 + PO6$
KO8	$PO1 + PO2 + PO3 + PO7$

2.3.1. Podejście eksperymentalne

Dla podejścia eksperymentalnego, przyjęto jednakowe ustawienia oraz kombinacje obciążeń jak dla podejścia normowego.

2.4. Wyniki

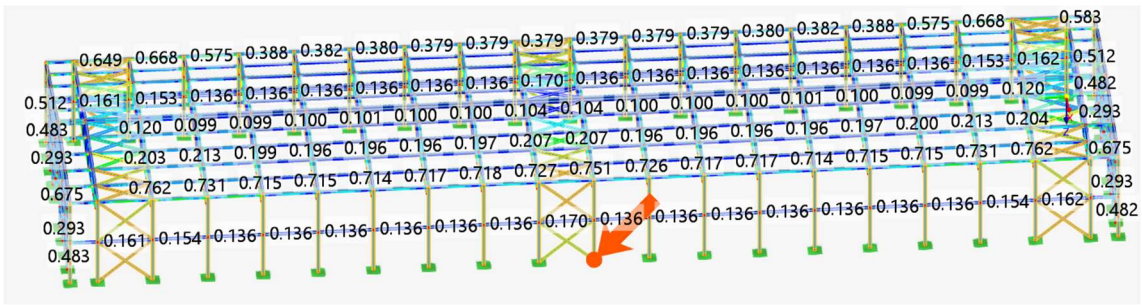
2.4.1. Podejście normowe

Wśród otrzymanych wyników postanowiono skupić się na wyężeniu przekrojów oraz na globalnych przemieszczeniach konstrukcji. Wartości wyężeń dla poszczególnych hal w przypadku podejścia normowego dla obliczeniowych kombinacji obciążeń przedstawiono w tabelach 9 – 12. Wartości przemieszczeń konstrukcji zgodnych z globalnym układem współrzędnych dla charakterystycznej kombinacji obliczeniowej przedstawiono w tabeli 13. Globalny układ współrzędnych zorientowany jest w następujący sposób:

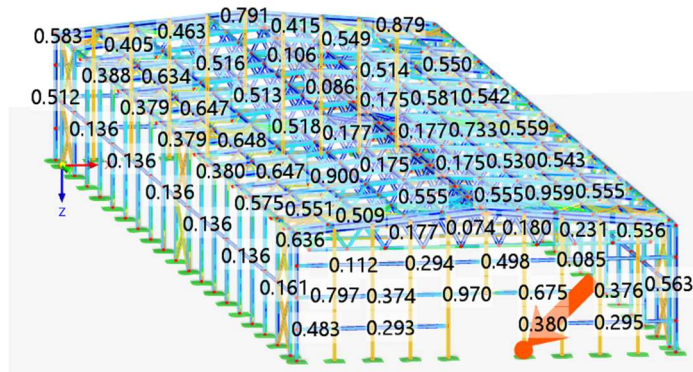
- oś X wzdłuż płaszczyzny ściany szczytowej,
- oś Y wzdłuż ściany podłużnej hali,
- oś Z skierowana zgodnie z kierunkiem grawitacji.

2.4.1.1. Hala nr 1

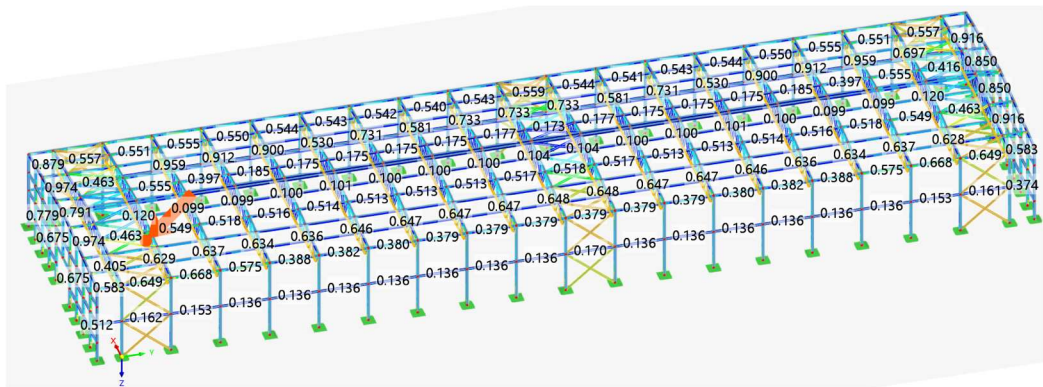
Lokalizację najbardziej wyężonych przekrojów dla hali nr 1 przedstawiono na rysunkach 25 – 30.



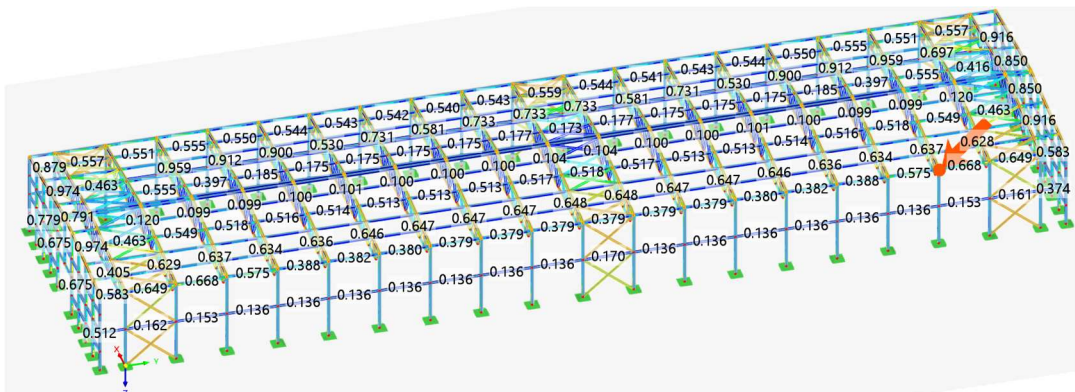
Rys. 25. Lokalizacja najbardziej wyężonego słupa HEB 220 – hala nr 1.



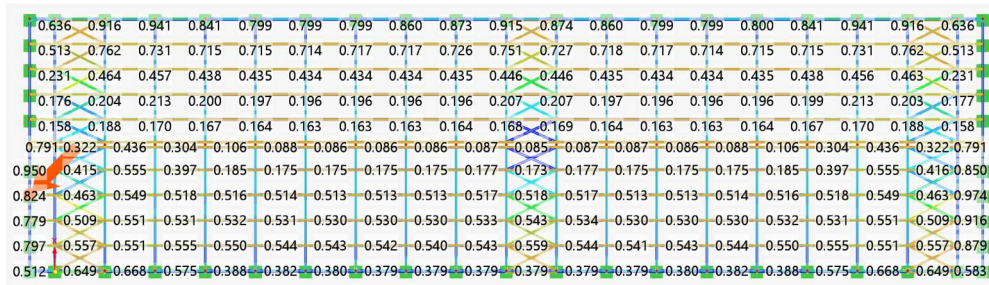
Rys. 26. Lokalizacja najbardziej wyężonego przekroju słupa ściany szczytowej IPE 270 – hala nr 1.



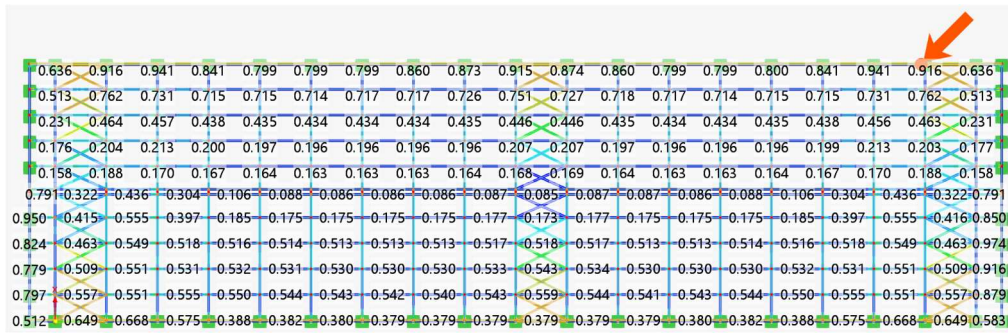
Rys. 27. Lokalizacja najbardziej wyężonego przekroju pasa dolnego kratownicy IPE 180 – hala nr 1.



Rys. 28. Lokalizacja najbardziej wyężonego przekroju pasa górnego kratownicy IPE 330 – hala nr 1.



Rys. 29. Lokalizacja najbardziej wyężonego przekroju płatwi IPE 220 – hala nr 1.



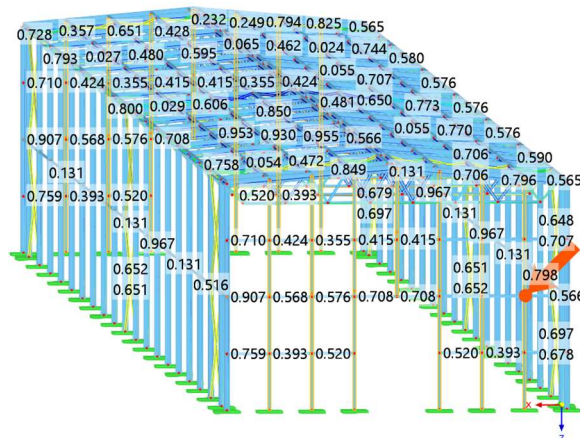
Rys. 30. Lokalizacja najbardziej wyężonego przekroju płatwi okapowej IPE 240 – hala nr 1.

2.4.1.2. Hala nr 2

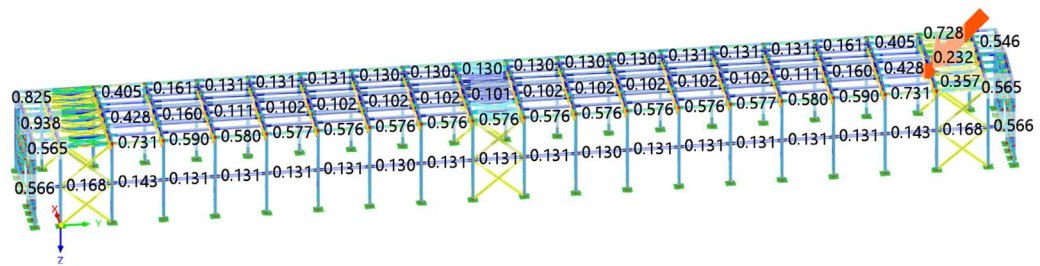
Lokalizację najbardziej wyężonych przekrojów dla hali nr 2 przedstawiono na rysunkach 31 – 36.



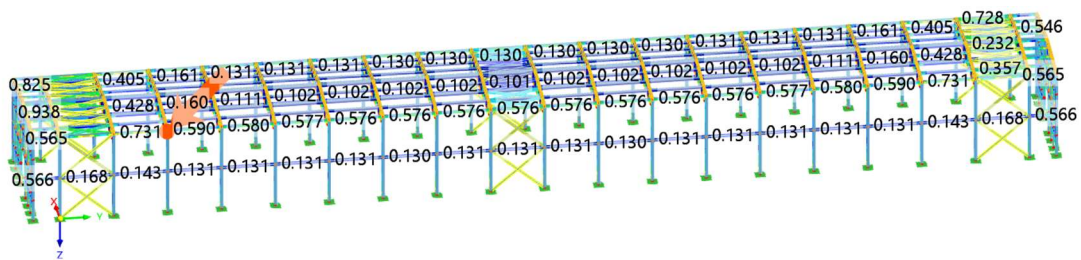
Rys. 31. Lokalizacja najbardziej wyężonego słupa HEB 220 – hala nr 2.



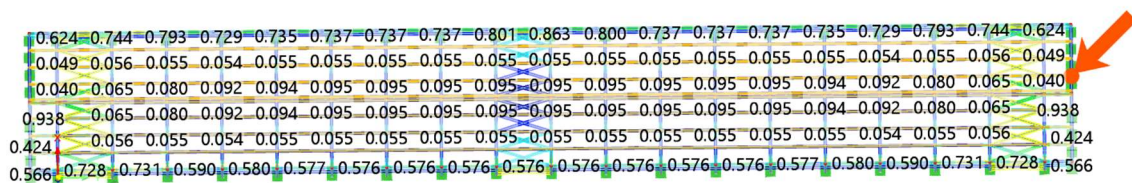
Rys. 32. Lokalizacja najbardziej wyężonego przekroju słupa ściany szczytowej IPE 220 – hala nr 2.



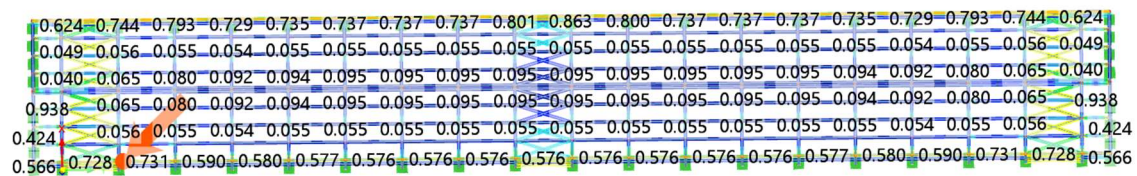
Rys. 33. Lokalizacja najbardziej wyężonego przekroju pasa dolnego kratownicy IPE 100 – hala nr 2.



Rys. 34. Lokalizacja najbardziej wyężonego przekroju pasa górnego kratownicy IPE 330 – hala nr 2.



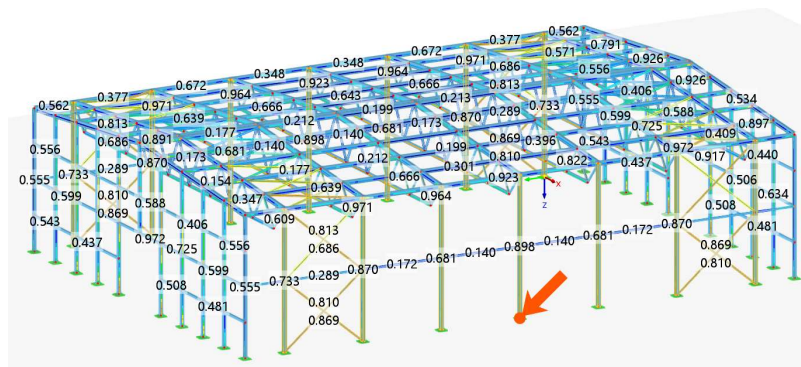
Rys. 35. Lokalizacja najbardziej wyężonego przekroju płatwi IPE 220 – hala nr 2.



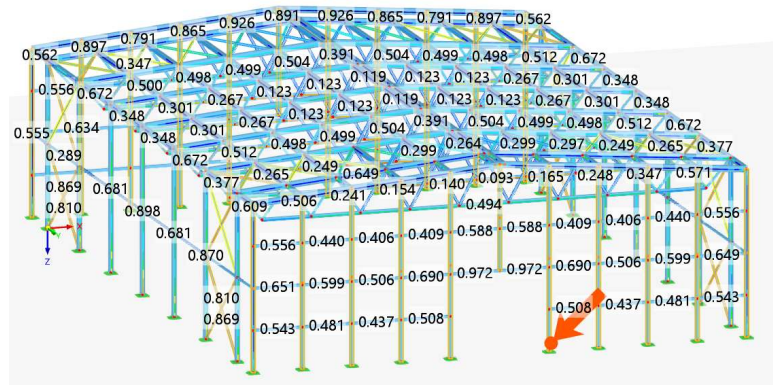
Rys. 36. Lokalizacja najbardziej wyężonego przekroju płatwi okapowej IPE 220 – hala nr 2.

2.4.1.3. Hala nr 3

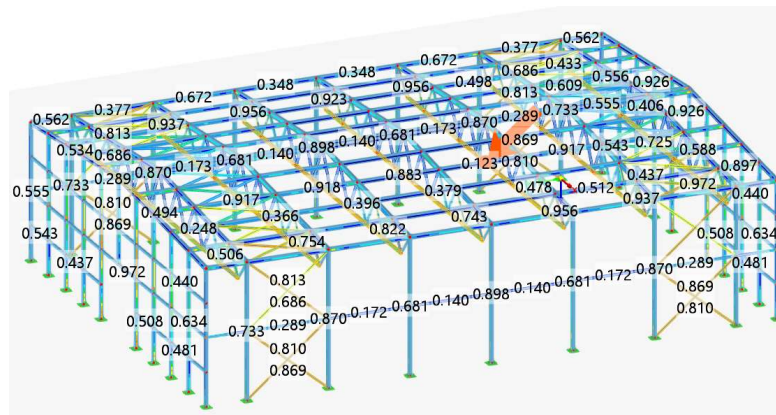
Lokalizację najbardziej wyężonych przekrojów dla hali nr 3 przedstawiono na rysunkach 37 – 42.



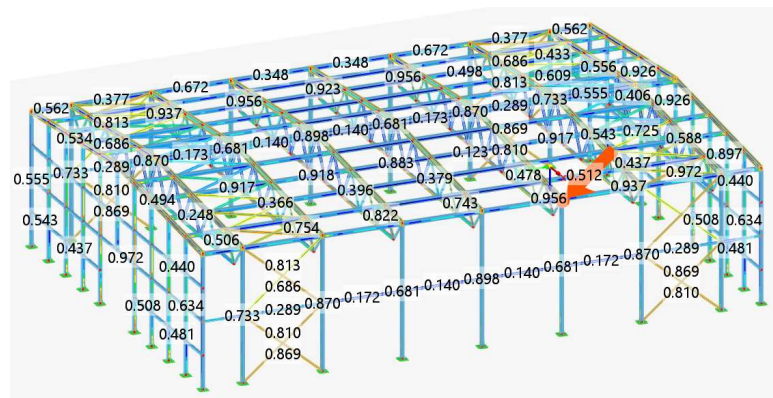
Rys. 37. Lokalizacja najbardziej wyężonego słupa HEB 200 – hala nr 3.



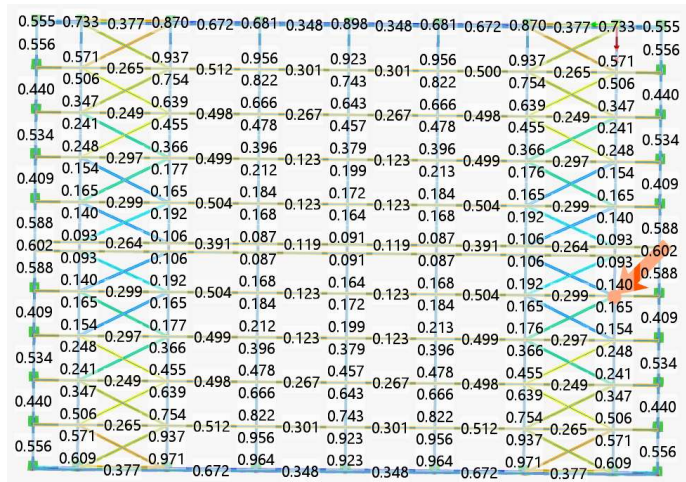
Rys. 38. Lokalizacja najbardziej wyężonego przekroju słupa ściany szczytowej HEB 180 – hala nr 3.



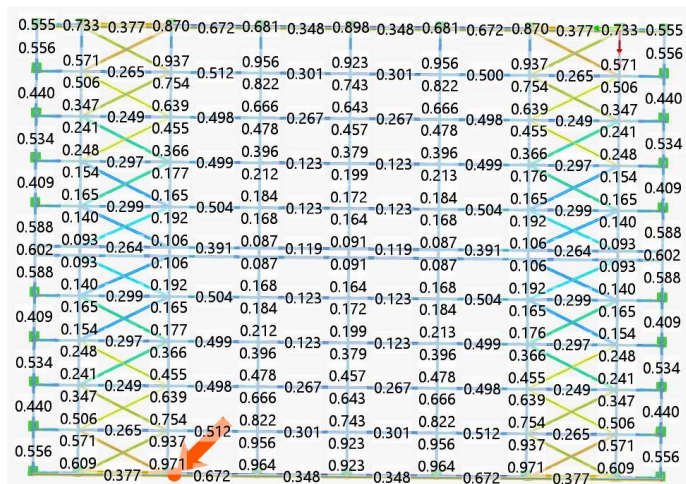
Rys. 39. Lokalizacja najbardziej wyężonego przekroju pasa dolnego kratownicy IPE 180 – hala nr 3.



Rys. 40. Lokalizacja najbardziej wyężonego przekroju pasa górnego kratownicy IPE 330– hala nr 3.



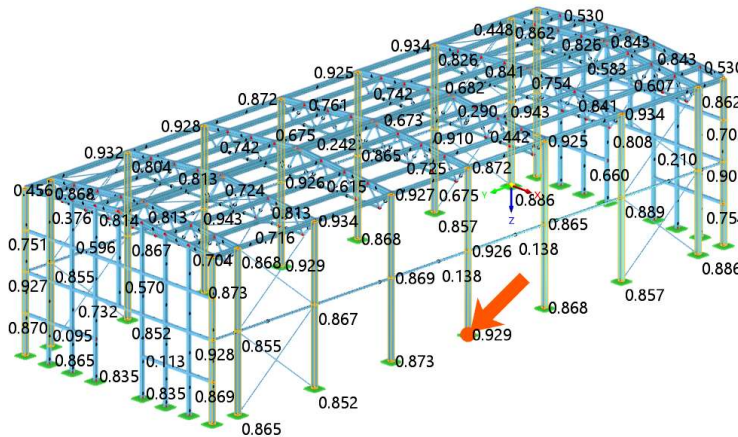
Rys. 41. Lokalizacja najbardziej wyężonego przekroju płatwi IPE 270 – hala nr 3.



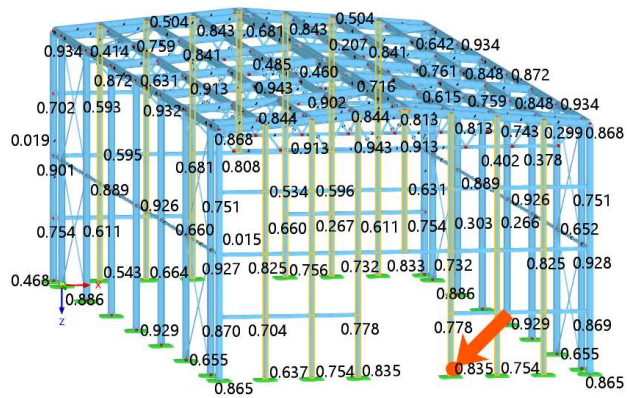
Rys. 42. Lokalizacja najbardziej wyężonego przekroju płatwi okapowej IPE 270 – hala nr 3.

2.4.1.4. Hala nr 4

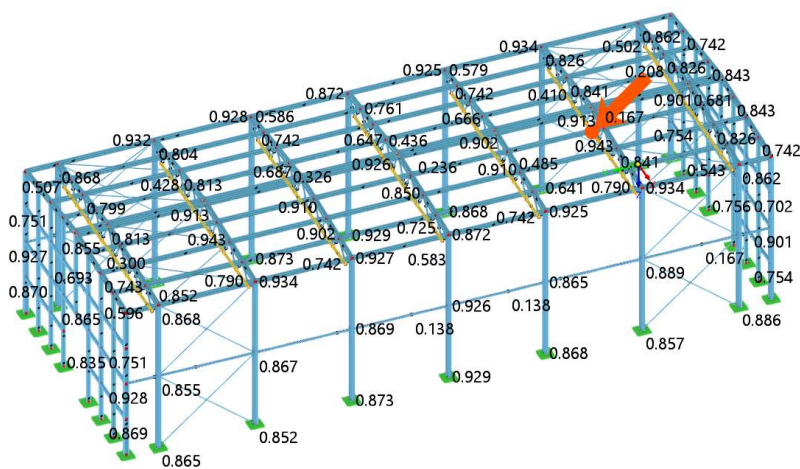
Lokalizację najbardziej wyężonych przekrojów dla hali nr 4 przedstawiono na rysunkach 43 – 48.



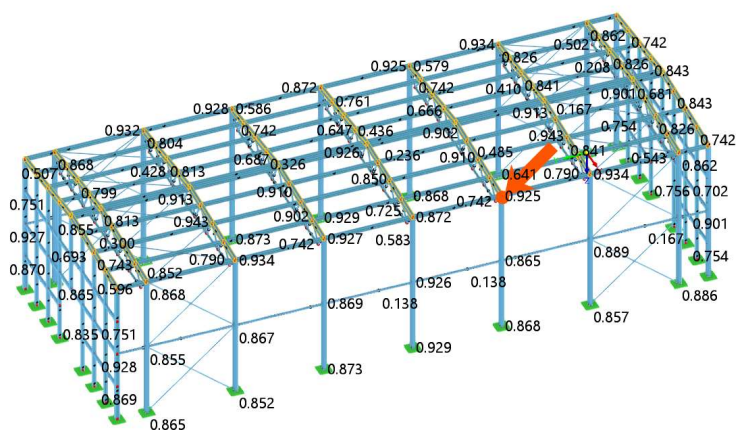
Rys. 43. Lokalizacja najbardziej wyężonego słupa HEB 220 – hala nr 4.



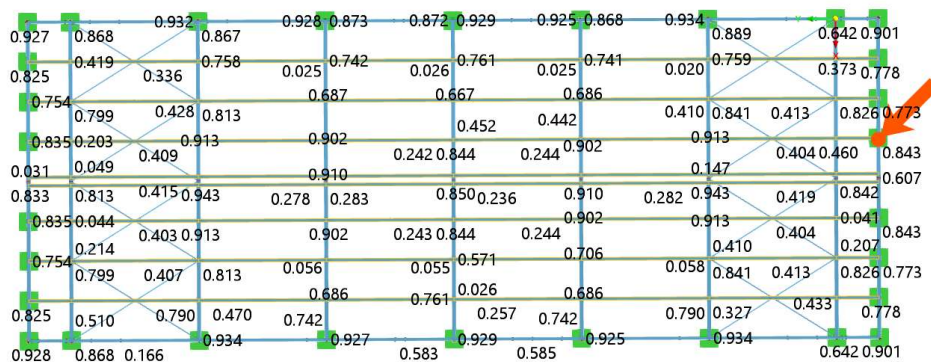
Rys. 44. Lokalizacja najbardziej wyężonego przekroju słupa ściany szczytowej HEB 160 – hala nr 4.



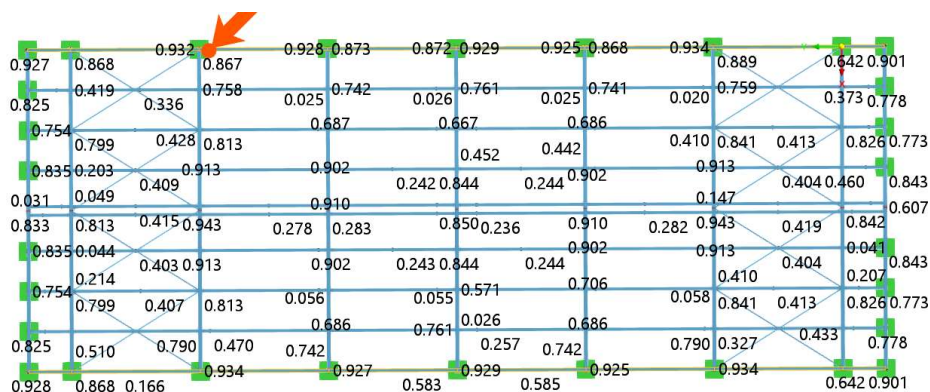
Rys. 45. Lokalizacja najbardziej wyężonego przekroju pasa dolnego kratownicy IPE 100 – hala nr 4.



Rys. 46. Lokalizacja najbardziej wyężonego przekroju pasa górnego kratownicy IPE 330 – hala nr 4.



Rys. 47. Lokalizacja najbardziej wyężonego przekroju łąwi IPE 240 – hala nr 4.



Rys. 48. Lokalizacja najbardziej wyężonego przekroju łąwi okapowej IPE 240 – hala nr 4.

Tab. 9. Największe wyężenia przekrojów w hali nr 1 według podejcia normowego.

Element konstrukcji	Przekrój	Największe wyężenie [%]
słup główny	HEB 220	94,5
słup ściany szczytowej	IPE 270	95,0
pas dolny kratownicy	IPE 180	89,5
pas górny kratownicy	IPE 330	95,9
środkowe krzyżulce kratownicy	SHC 60x4,5	89,9
skrajny krzyżulec kratownicy	SHC 65x5	94,1
platów	IPE 220	97,4
platów okapowa	IPE 240	66,8
rygiel ściany szczytowej	SHC 120x5	97,0
rygiel ściany podłużnej	60x3	37,5
stężenie połaciowe	∅12	84,1
stężenie pionowe ścienne	∅14	84,1

Tab. 10. Największe wyężenia przekrojów w hali nr 2 według podejcia normowego.

Element konstrukcji	Przekrój	Największe wyężenie [%]
słup główny	HEB 220	98,2
słup ściany szczytowej	IPE 220	95,5
pas dolny kratownicy	IPE 100	95,3
pas górny kratownicy	IPE 330	82,9
środkowe krzyżulce kratownicy	SHC 50x4	79,6
skrajny krzyżulec kratownicy	SHC 50x4,5	86,3
platew	IPE 220	93,8
platew okapowa	IPE 220	72,8
rygiel ściany szczytowej	SHC 100x4,5	90,7
rygiel ściany podłużnej	SHC 60x3	44,1
stężenie połaciowe	∅10	69,6
stężenie pionowe ścienne	∅10	70,7

Tab. 11. Największe wyężenia przekrojów w hali nr 3 według podejcia normowego.

Element konstrukcji	Przekrój	Największe wyężenie [%]
słup główny	HEB 200	89,8
słup ściany szczytowej	HEB 180	91,7
pas dolny kratownicy	IPE 180	91,8
pas górny kratownicy	IPE 330	86,8
środkowe krzyżulce kratownicy	SHC 70x3,6	95,6
skrajny krzyżulec kratownicy	SHC 80x4	97,1
platew	IPE 270	92,6
platew okapowa	IPE 270	67,2
rygiel ściany szczytowej	SHC 125x6	97,2
rygiel ściany podłużnej	SHC 60x3	43,8
stężenie połaciowe	∅16	85,5
stężenie pionowe ścienne	∅20	86,9

Tab. 12. Największe wyężenia przekrojów w hali nr 4 według podejcia normowego.

Element konstrukcji	Przekrój	Największe wyężenie [%]
słup główny	HEB 220	92,9
słup ściany szczytowej	HEB 160	83,5
pas dolny kratownicy	IPE 100	94,3
pas górny kratownicy	IPE 330	84,8
środkowe krzyżulce kratownicy	SHC 50x4	79,0
skrajny krzyżulec kratownicy	SHC 50x4	93,4
platew	IPE 240	84,3
platew okapowa	IPE 240	76,0
rygiel ściany szczytowej	SHC 120x4	92,8
rygiel ściany podłużnej	60x3	58,4
stężenie połaciowe	∅12	84,2
stężenie pionowe ścienne	∅12	88,9

Tab. 13. Globalne przemieszczenia hal dla obciążeń według podejścia normowego.

Numer hali	Kierunek działania wiatru	Przemieszczenie na kierunku X [mm]	Przemieszczenie na kierunku Y [mm]	Przemieszczenie na kierunku Z [mm]
1	0°	97,6	44,0	44,6
	90°	15,8	47,4	46,1
	180°	-97,6	44,0	44,6
	270°	15,8	-47,4	46,1
2	0°	111,1	26,2	19,9
	90°	15,4	20,9	21,1
	180°	-111,1	26,2	19,9
	270°	15,4	-20,9	21,1
3	0°	94,4	46,8	46,1
	90°	19,9	47,3	47,3
	180°	-94,4	46,8	46,1
	270°	19,9	-47,3	47,3
4	0°	91,9	25,8	19,7
	90°	14,0	24,6	21,5
	180°	-91,9	25,8	19,7
	270°	14,0	-24,6	21,5

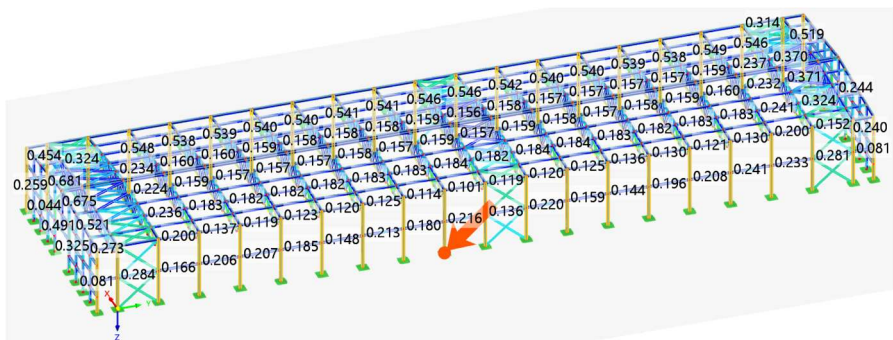
2.4.2. Podejście eksperymentalne

Wartości wytyżeń dla poszczególnych hal w przypadku podejścia eksperymentalnego dla obliczeniowych kombinacji obciążeń przedstawiono w tabelach 14 – 17. Wartości przemieszczeń konstrukcji zgodnych z globalnym układem współrzędnych dla charakterystycznej kombinacji obliczeniowej przedstawiono w tabeli 18. Globalny układ współrzędnych zorientowany jest w następujący sposób i jest analogiczny jak dla podejścia normowego:

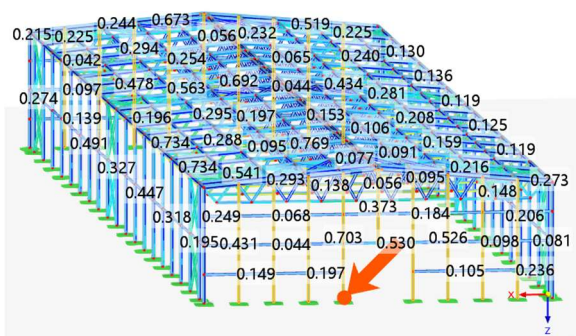
- oś X wzdłuż płaszczyzny ściany szczytowej,
- oś Y wzdłuż ściany podłużnej hali,
- oś Z skierowana zgodnie z kierunkiem grawitacji.

2.4.2.1. Hala nr 1

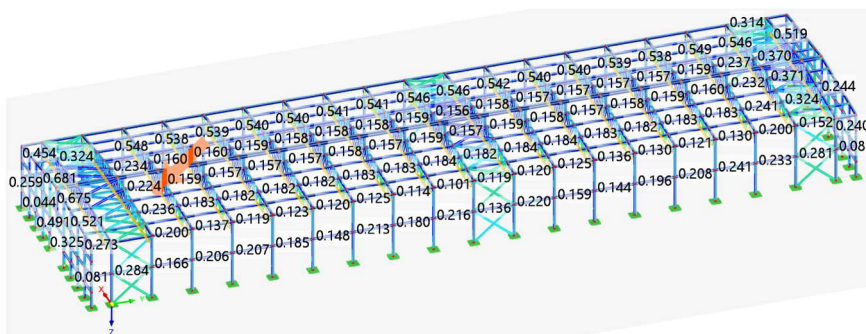
Lokalizację najbardziej wytyżonych przekrojów dla hali nr 1 przedstawiono na rysunkach 49 – 54.



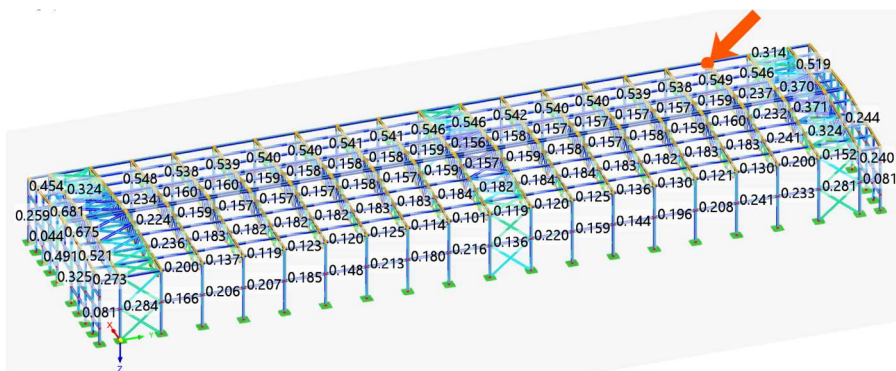
Rys. 49. Lokalizacja najbardziej wyężonego słupa HEB 220 – hala nr 1.



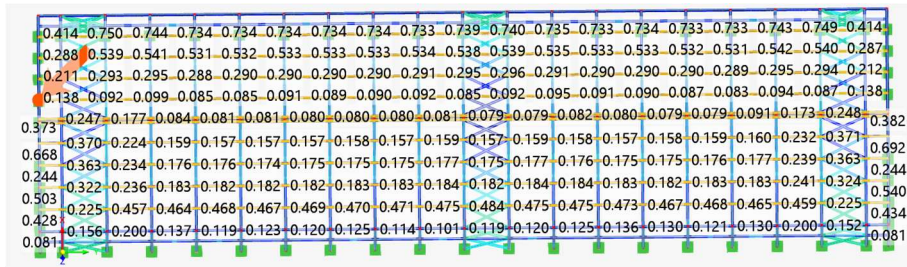
Rys. 50. Lokalizacja najbardziej wyężonego przekroju słupa ściany szczytowej IPE 270 – hala nr 1.



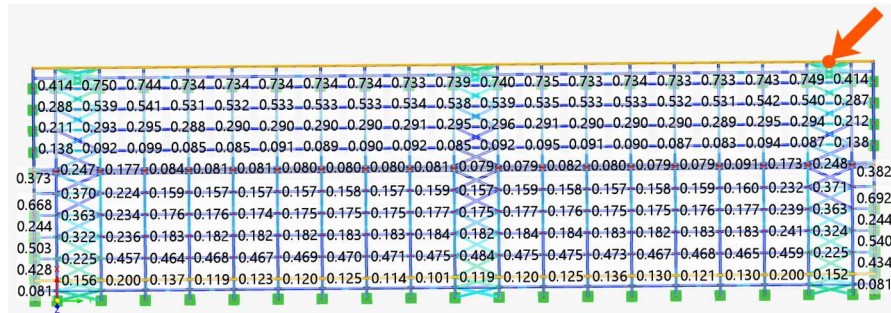
Rys. 51. Lokalizacja najbardziej wyężonego przekroju pasa dolnego kratownicy IPE 180 – hala nr 1.



Rys. 52. Lokalizacja najbardziej wyężonego przekroju pasa górnego kratownicy IPE 330 – hala nr 1.



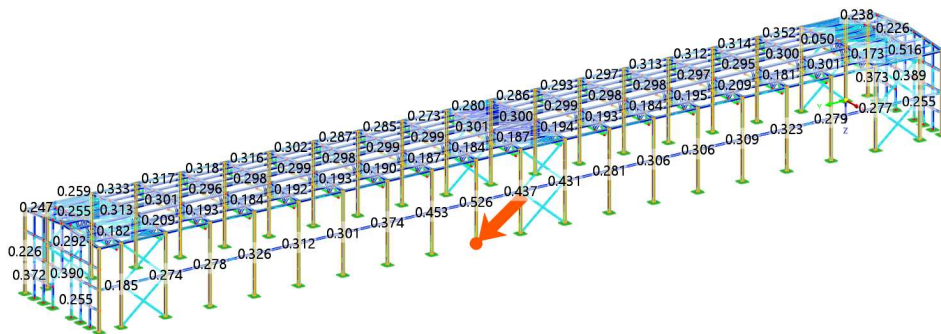
Rys. 53. Lokalizacja najbardziej wyężonego przekroju płatwi IPE 220 – hala nr 1.



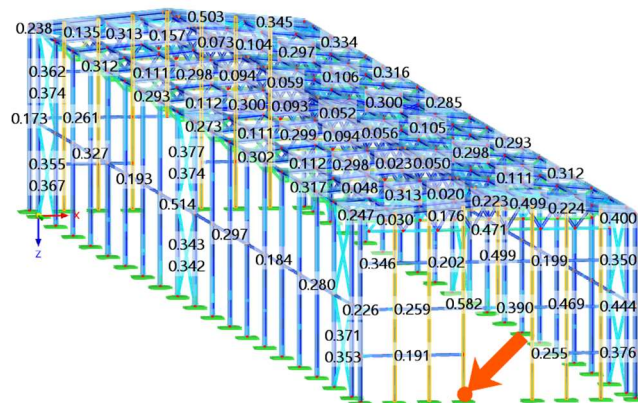
Rys. 54. Lokalizacja najbardziej wyężonego przekroju płatwi okapowej IPE 240 – hala nr 1.

2.4.2.2. Hala nr 2

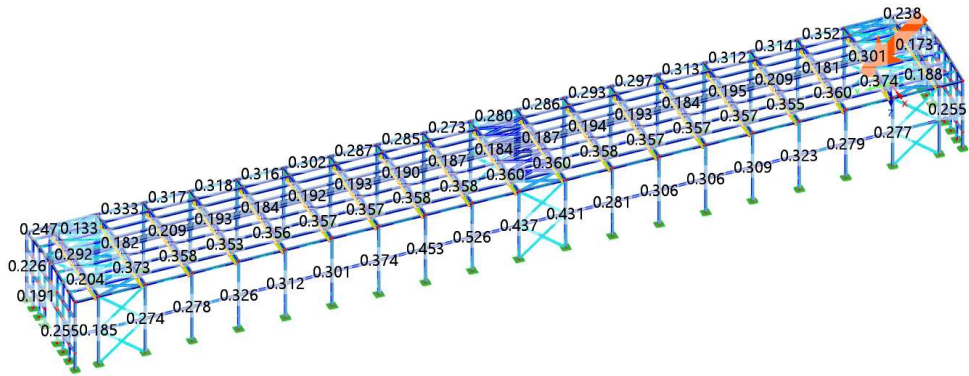
Lokalizację najbardziej wyężonych przekrojów dla hali nr 2 przedstawiono na rysunkach 55 – 60.



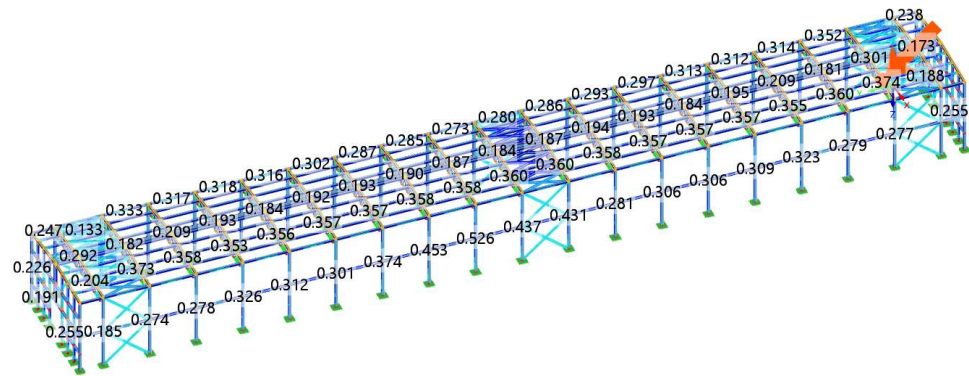
Rys. 55. Lokalizacja najbardziej wyężonego słupa HEB 220 – hala nr 2.



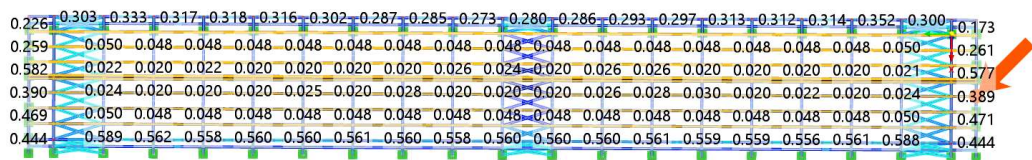
Rys. 56. Lokalizacja najbardziej wyężonego przekroju słupa ściany szczytowej IPE 220 – hala nr 2.



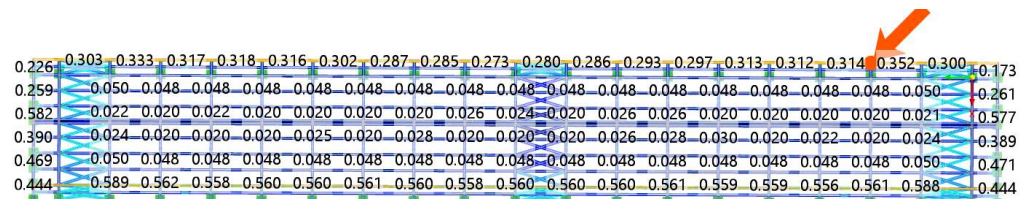
Rys. 57. Lokalizacja najbardziej wyężonego przekroju pasa dolnego kratownicy IPE 100 – hala nr 2.



Rys. 58. Lokalizacja najbardziej wyężonego przekroju pasa górnego kratownicy IPE 330– hala nr 2.



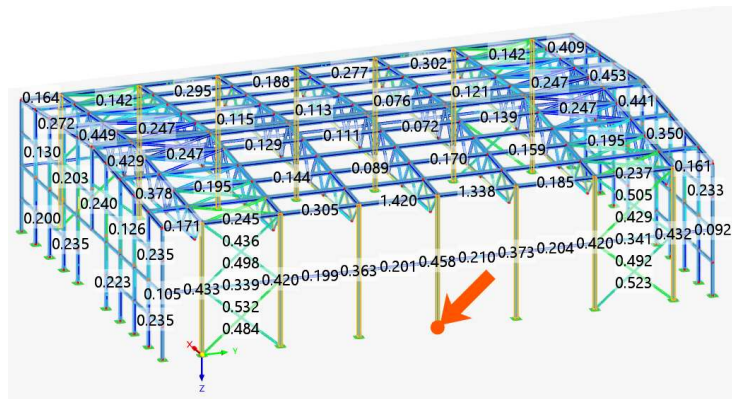
Rys. 59. Lokalizacja najbardziej wyężonego przekroju płatwi IPE 220 – hala nr 2.



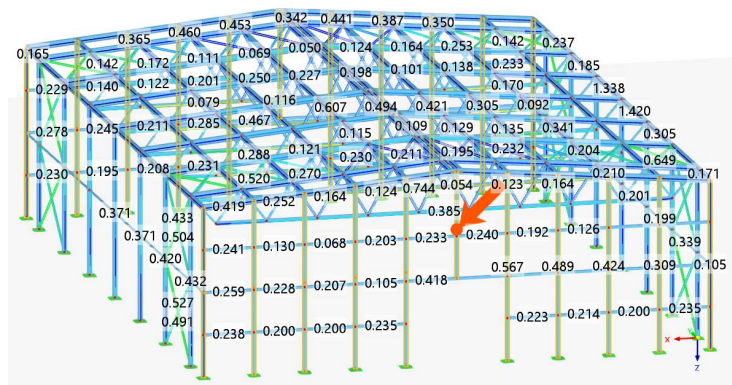
Rys. 60. Lokalizacja najbardziej wyężonego przekroju płatwi okapowej IPE 220 – hala nr 2.

2.4.2.3. Hala nr 3

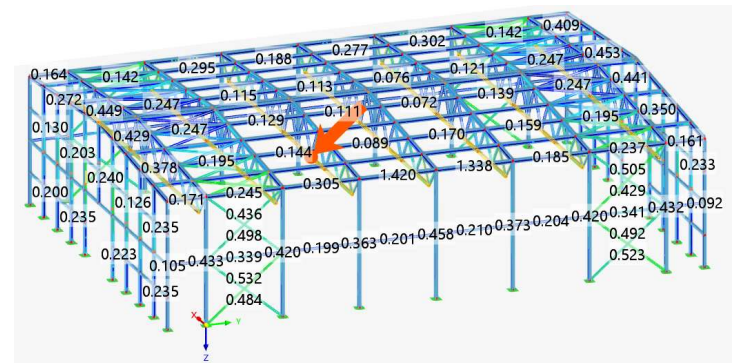
Lokalizację najbardziej wyężonych przekrojów dla hali nr 3 przedstawiono na rysunkach 61 – 66.



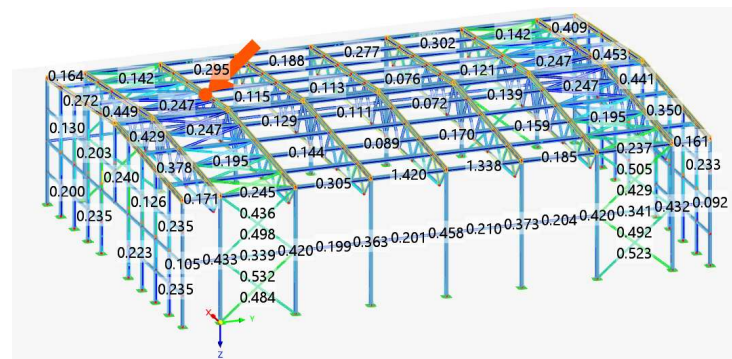
Rys. 61. Lokalizacja najbardziej wyężonego słupa HEB 200 – hala nr 3.



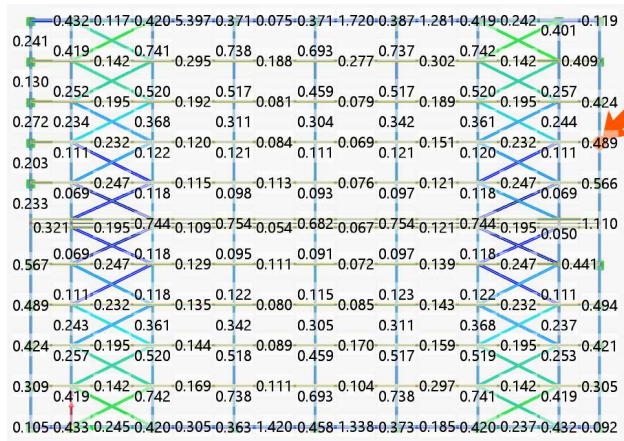
Rys. 62. Lokalizacja najbardziej wyężonego przekroju słupa ściany szczytowej HEB 180 – hala nr 3.



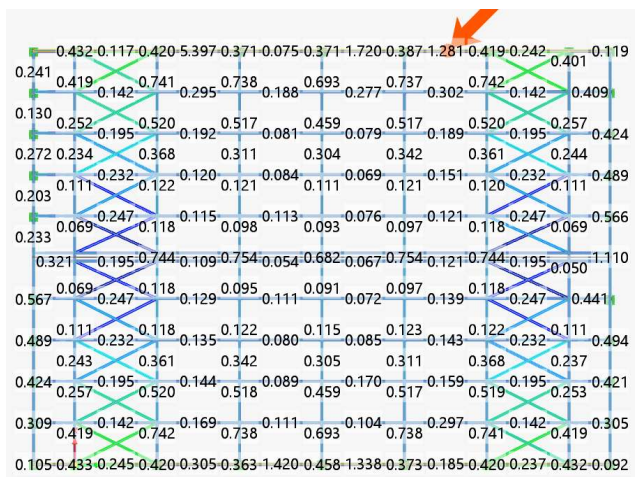
Rys. 63. Lokalizacja najbardziej wyężonego przekroju pasa dolnego kratownicy IPE 180 – hala nr 3.



Rys. 64. Lokalizacja najbardziej wyężonego przekroju pasa górnego kratownicy IPE 330 – hala nr 3.



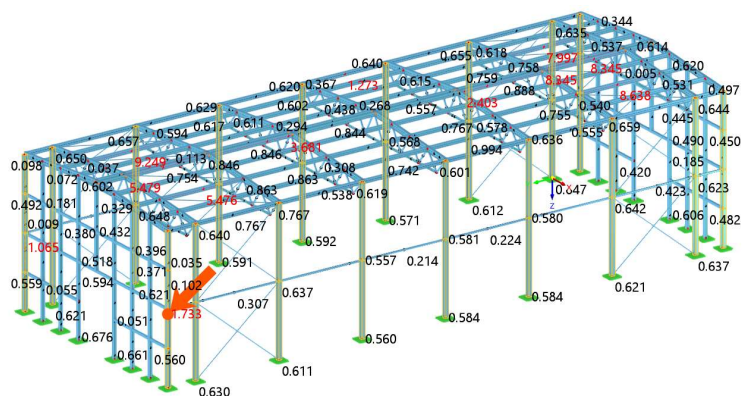
Rys. 65 Lokalizacja najbardziej wyężonego przekroju płatki IPE 270 – hala nr 3.



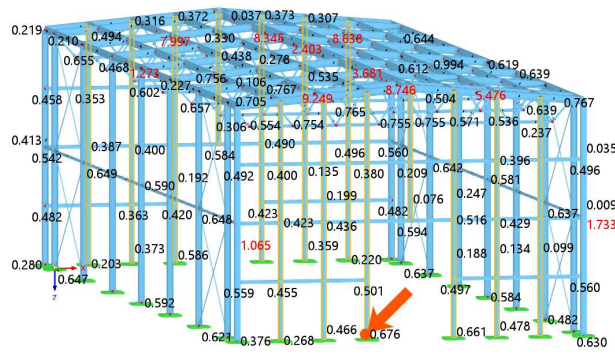
Rys. 66. Lokalizacja najbardziej wyężonego przekroju płatki okapowej IPE 270 – hala nr 3.

2.4.2.4. Hala nr 4

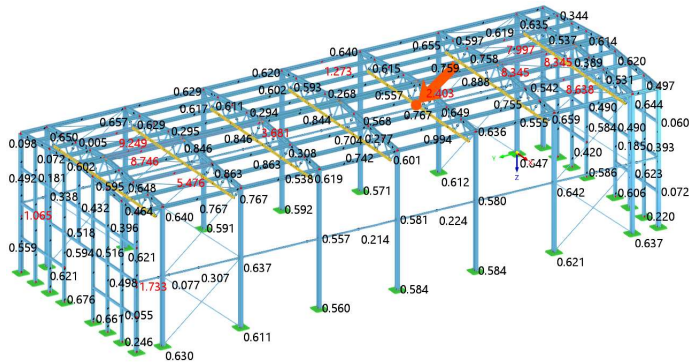
Lokalizację najbardziej wyężonych przekrojów dla hali nr 4 przedstawiono na rysunkach 67 – 72.



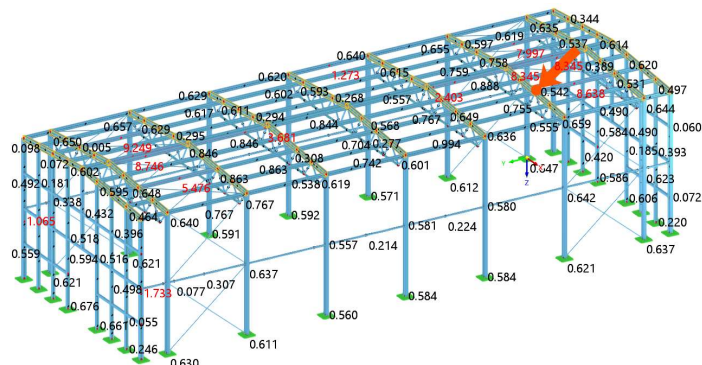
Rys. 67. Lokalizacja najbardziej wyężonego słupa HEB 220 – hala nr 4.



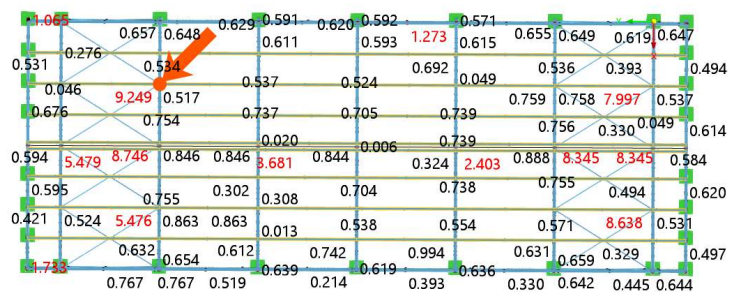
Rys. 68. Lokalizacja najbardziej wyężonego przekroju słupa ściany szczytowej HEB 160 – hala nr 4.



Rys. 69. Lokalizacja najbardziej wyężonego przekroju pasa dolnego kratownicy IPE 100 – hala nr 4.



Rys. 70. Lokalizacja najbardziej wyężonego przekroju pasa górnego kratownicy IPE 330 – hala nr 4.



Rys. 71. Lokalizacja najbardziej wyężonego przekroju płatwi IPE 240 – hala nr 4.



Rys. 72. Lokalizacja najbardziej wyężonego przekroju płatwi okapowej IPE 240 – hala nr 4.

Tab. 14. Największe wyężenia przekrojów w hali nr 1 według podejścia eksperymentalnego.

Element konstrukcji	Przekrój	Największe wyężenie [%]
słup główny	HEB 220	49,5
słup ściany szczytowej	IPE 270	70,3
pas dolny kratownicy	IPE 180	78,3
pas górny kratownicy	IPE 330	49,2
środkowe krzyżulce kratownicy	SHC 60x4,5	75,0
skrajny krzyżulec kratownicy	SHC 65x5	65,3
płatów	IPE 220	68,1
płatów okapowa	IPE 240	31,4
rygiel ściany szczytowej	SHC 120x5	60,9
rygiel ściany podłużnej	60x3	29,2
stężenie połaciowe	Ø12	46,6
stężenie pionowe ścienne	Ø14	43,1

Tab. 15. Największe wyężenia przekrojów w hali nr 2 według podejścia eksperymentalnego.

Element konstrukcji	Przekrój	Największe wyężenie [%]
słup główny	HEB 220	52,6
słup ściany szczytowej	IPE 220	58,2
pas dolny kratownicy	IPE 100	79,7
pas górny kratownicy	IPE 330	31,3
środkowe krzyżulce kratownicy	SHC 50x4	64,1
skrajny krzyżulec kratownicy	SHC 50x4,5	58,9
płatów	IPE 220	50,3
płatów okapowa	IPE 220	35,2
rygiel ściany szczytowej	SHC 100x4,5	44,7
rygiel ściany podłużnej	SHC 60x3	30,6
stężenie połaciowe	Ø10	34,3
stężenie pionowe ścienne	Ø10	37,7

Tab. 16. Największe wyężenia przekrojów w hali nr 3 według podejcia eksperymentalnego.

Element konstrukcji	Przekrój	Największe wyężenie [%]
slup glówny	HEB 200	45,8
slup ściany szczytowej	HEB 180	169,5
pas dolny kratownicy	IPE 180	75,4
pas górny kratownicy	IPE 330	36,8
środkowe krzyżulce kratownicy	SHC 70x3,6	74,2
skrajny krzyżulec kratownicy	SHC 80x4	70,7
platew	IPE 270	46,0
platew okapowa	IPE 270	421,2
rygiel ściany szczytowej	SHC 125x6	46,7
rygiel ściany podłużnej	SHC 60x3	34,1
stężenie połaciowe	∅16	55,4
stężenie pionowe ścienne	∅20	53,2

Tab. 17. Największe wyężenia przekrojów w hali nr 4 według podejcia eksperymentalnego.

Element konstrukcji	Przekrój	Największe wyężenie [%]
slup glówny	HEB 220	104,2
slup ściany szczytowej	HEB 160	67,6
pas dolny kratownicy	IPE 100	76,7
pas górny kratownicy	IPE 330	48,5
środkowe krzyżulce kratownicy	SHC 50x4	63,2
skrajny krzyżulec kratownicy	SHC 50x4	65,9
platew	IPE 240	924,9
platew okapowa	IPE 240	127,3
rygiel ściany szczytowej	SHC 120x4	59,4
rygiel ściany podłużnej	60x3	39,4
stężenie połaciowe	∅12	54,0
stężenie pionowe ścienne	∅12	65,0

Tab. 18. Globalne przemieszczenia hal dla obciążeń według podejcia eksperymentalnego.

Numer hali	Kierunek działania wiatru	Przemieszczenie na kierunku X [mm]	Przemieszczenie na kierunku Y [mm]	Przemieszczenie na kierunku Z [mm]
1	0°	47,6	28,4	30,0
	90°	14,2	33,6	41,8
	180°	-46,9	30,8	29,7
	270°	13,3	-33,7	41,8
2	0°	51,4	17,8	13,5
	90°	13,7	15,8	18,2
	180°	-51,1	17,7	13,4
	270°	13,6	-15,7	18,2

3	0°	37,3	27,8	31,5
	90°	18,6	34,8	40,3
	180°	-32,8	27,9	31,6
	270°	18,7	-34,8	40,3
4	0°	53,1	21,9	12,2
	90°	14,2	24,1	18,2
	180°	-53,0	22,3	12,2
	270°	13,8	-24,0	18,2

2.5. Analiza wyników

2.5.1. Wytężenia przekrojów

Zestawienie wytężeń dla wszystkich hal z podziałem na przekrój poprzeczny elementu oraz w zależności od wybranej metody obliczeniowej przedstawiono na rysunkach 73 – 76.

2.5.1.1. Hala nr 1

W przypadku hali nr 1 zauważono wyraźną tendencję mniejszego wytężenia wszystkich przekrojów zastosowanych w konstrukcji dla podejścia eksperymentalnego. Dla hali nr 1 największą różnicę wytężenia przekroju zaobserwowano dla pasa górnego kratownicy wykonanego z IPE 330. Różnica w tym przypadku wyniosła 46,7%, natomiast najmniejsza różnica wyniosła 11,2% i dotyczyła pasa dolnego kratownicy z IPE 180. Pas górny o największym wykorzystaniu przekroju w obu przypadkach dotyczył tego samego wiązara, natomiast pas dolny dla podejścia eksperymentalnego znajdował się 6 m bliżej środka długości hali. Umieszczenie najbardziej wytężonego słupa głównego HEB 220 w zależności od podejścia obliczeniowego zmieniło się. Dla podejścia normowego, słup o największym wykorzystaniu przekroju, znajdował się dokładnie w środku rozpiętości hali, natomiast dla podejścia eksperymentalnego był to słup umiejscowiony 12 m bliżej ściany szczytowej po przeciwnej stronie hali. Oba wytężenia dotyczyły kombinacji obliczeniowej KO1 (0°). Dla słupa ściany szczytowej w obu podejściach największe wytężenie dotyczyło słupa umiejscowionego w tym samym miejscu i dla tej samej kombinacji obliczeniowej KO3 (180°), lecz również po przeciwnych stronach hali. Najbardziej wytężone płatwie okapowe dla obu podejść obliczeniowych charakteryzowały się tą samą lokalizacją i tą samą kombinacją obliczeniową KO3, natomiast najbardziej wytężona z płatwi środkowych znajdowała się w innym miejscu. Dla podejścia normowego była to kombinacja obliczeniowa KO3 (180°), a dla podejścia eksperymentalnego KO4 (270°). Zauważono, że w przypadku obciążenia konstrukcji w sposób normowy, w większości przekrojów decydującą kombinacją obliczeniową była KO3 (180°), natomiast dla podejścia eksperymentalnego wyniki nie wskazywały podobnej tendencji, jednak najczęściej decydowały kombinacje KO3 (180°) i KO4 (270°). Dodatkowo najbardziej wytężone przekroje, tylko w połowie przypadków odpowiadały tej samej kombinacji obliczeniowej. Porównując oba podejścia obliczeniowe, różnica procentowego wytężenia przekrojów wynosi ok 30,6%.

2.5.1.2. Hala nr 2

Dla hali nr 2 również zauważono wyraźną tendencję mniejszego wyiężenia wszystkich przekrojów zastosowanych w konstrukcji dla podejścia eksperymentalnego. Największą różnicę z uwagi na wyiężenie przekroju, zaobserwowano dla pasa górnego kratownicy wykonanego z IPE 330. Różnica w tym przypadku wyniosła 51,6 %, natomiast najmniejsza różnica wyniosła 13,5 % i dotyczyła rygla ściany podłużnej z profilu SHC 60x3. Pas górny o największym wykorzystaniu przekroju w obu przypadkach dotyczył tego samego wiązara jednak dla podejścia normowego zadecydowała kombinacja obliczeniowa KO1, natomiast dla podejścia eksperymentalnego KO4 (270°). Dla rygla ściany podłużnej sytuacja największego wyiężenia dotyczyła tej samej kombinacji obliczeniowej KO1 (0°). Umieszczenie najbardziej wyiężonego słupa głównego HEB 220 w zależności od podejścia obliczeniowego zmieniło się. Dla podejścia normowego, słup o największym wykorzystaniu przekroju, znajdował się dokładnie w środku rozpiętości hali, natomiast dla podejścia eksperymentalnego był to słup umiejscowiony 12 m bliżej ściany szczytowej po przeciwnej stronie hali. Oba wyiężenia dotyczyły kombinacji obliczeniowej KO3 (180°). Słup ściany szczytowej o największym wykorzystaniu przekroju dla podejścia normowego znajdował się bliżej krawędzi budynku, natomiast w podejściu eksperymentalnym był to słup zlokalizowany przy otworze drzwiowym. Słupy znajdowały się na przeciwległych stronach hali i dotyczyły innej kombinacji obliczeniowej, odpowiednio KO3 (180°) i KO1 (0°). Najbardziej wyiężone płatwie dla obu podejść obliczeniowych charakteryzowały się tą samą lokalizacją, lecz inną kombinacją obliczeniową, analogicznie jak w przypadku słupów ściany szczytowej. Najbardziej wyiężony pas dolny kratownicy jest umiejscowiony po przeciwległych stronach hali. Dla podejścia obliczeniowego według normy decydująca okazała się kombinacja KO2, natomiast dla podejścia eksperymentalnego KO4 (270°). Zauważono, że w przypadku obciążenia konstrukcji w sposób normowy, w większości przekrojów decydującymi kombinacjami obliczeniowymi były KO1 (0°) i KO3 (180°), natomiast dla podejścia eksperymentalnego o wynikach decydowała głównie kombinacja KO1 (0°). Dodatkowo najbardziej wyiężone przekroje, tylko w połowie przypadków odpowiadały tej samej kombinacji obliczeniowej. Różnica wyiężenia przekrojów dla analizowanych sposobów obciążenia konstrukcji wynosi ok. 33,5%.

2.5.1.3. Hala nr 3

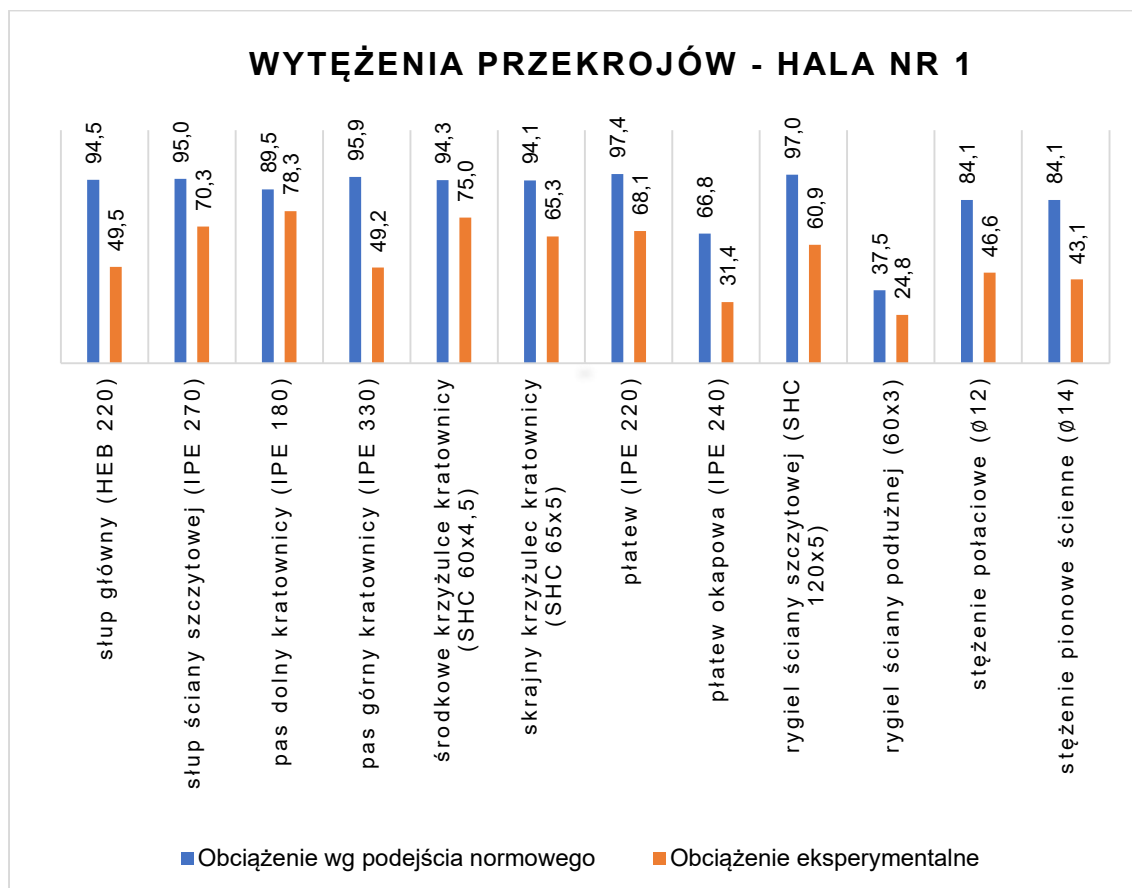
Analizując wyniki dla hali nr 3 zauważono przekroczenie nośności dla słupa ściany szczytowej z HEB 180 oraz dla płatwi okapowej z IPE 270. Różnica wyiężeń przekrojów wyniosła odpowiednio 77,8 % oraz 353,9 % na niekorzyść rozwiązania eksperymentalnego. Najbardziej wyiężony słup ściany szczytowej dla podejścia normowego znajdował się przy otworze drzwiowym, a decydującą kombinacją obliczeniową była KO1 (0°). Dla podejścia eksperymentalnego decydowała KO3 (180°), a wyiężony słupek znajdował się nad otworem drzwiowym po przeciwległej stronie hali. Lokalizacja najbardziej wyiężonej płatwi okapowej jest jednakowa dla obu podejść obliczeniowych i odpowiada tej samej kombinacji obliczeniowej. Poza tymi dwoma wyjątkami zauważono, że pozostałe przekroje mają zdecydowanie mniejsze wyiężenie dla podejścia eksperymentalnego. Najbardziej wyiężony słup główny HEB 200

zachował tą samą lokalizację dla obu podejść obliczeniowych, jednak po przeciwnych stronach hali. Decydowała również ta sama kombinacja obliczeniowa KO1 (0°). Pas dolny kratownicy o największym wykorzystaniu przekroju w obu przypadkach dotyczył tego samego wiązara jednak dla podejścia normowego zadecydowała kombinacja obliczeniowa KO2 (90°), natomiast dla podejścia eksperymentalnego KO4 (270°). Dla pasa górnego kratownicy lokalizacja decydującego przekroju według podejścia normowego znajdowała się 6 m bliżej środka hali w porównaniu do podejścia eksperymentalnego. W pierwszym przypadku decydowała kombinacja obliczeniowa KO1 (0°), a w drugim KO4 (270°). Najbardziej wyężona płatew środkowa dla podejścia eksperymentalnego znajdowała się w większej odległości od kalenicy w porównaniu do podejścia normowego. W obu przypadkach decydowała kombinacja obliczeniowa KO1 (0°). Zauważono, że w przypadku obciążenia konstrukcji w sposób normowy, w większości przekrojów decydującymi kombinacjami obliczeniowymi były KO1 (0°) i KO2 (90°), natomiast dla podejścia eksperymentalnego o wynikach decydowały głównie kombinacje KO1 (0°) i KO4 (270°). Dodatkowo najbardziej wyężone przekroje, w połowie przypadków odpowiadały tej samej kombinacji obliczeniowej. Po odrzuceniu wyników dotyczących słupa ściany szczytowej oraz płatwi okapowej, zauważono, że różnica procentowego wyężenia przekrojów wynosi ok. 30,8%.

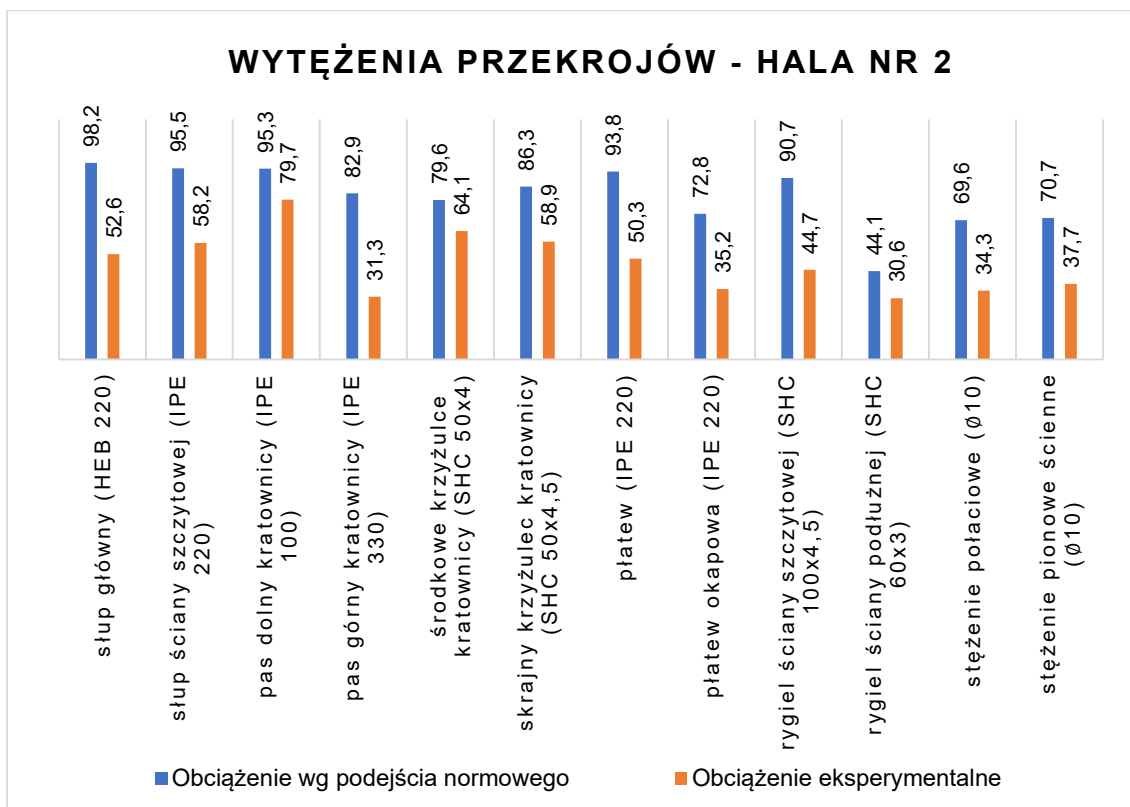
2.5.1.4. Hala nr 4

Wśród wyników dla hali nr 4 również zauważono przekroczenie nośności, które dotyczyło słupa głównego z HEB 220 oraz płatwi środkowych i okapowych z IPE 240. Różnica wyężeń przekrojów wyniosła odpowiednio 11,3 %, 840,6 oraz 51,3 % na niekorzyść rozwiązania eksperymentalnego. Najbardziej wyężony słup główny dla podejścia normowego znajdował się w środku długości hali i decydowała dla niego kombinacja obliczeniowa KO1 (0°), natomiast dla podejścia eksperymentalnego decydowała KO4 (270°), a słup zlokalizowany był na skraju hali po przeciwległej stronie. Lokalizacja najbardziej wyężonej płatwi okapowej jest jednakowa dla obu podejść obliczeniowych, jednak odpowiada innym kombinacjom obliczeniowym. Według podejścia normowego decyduje KO1 (0°), natomiast według podejścia eksperymentalnego KO4 (270°). Najbardziej wyężona płatew środkowa znajdowała się w większej odległości od kalenicy według obciążenia eksperymentalnego. W przypadku normowym decydowała kombinacja obliczeniowa KO3 (180°), a dla eksperymentalnego KO1 (0°). Poza trzema wyjątkami opisanymi powyżej, zauważono, że pozostałe przekroje mają mniejsze wyężenie dla podejścia eksperymentalnego. Dla słupa ściany szczytowej w obu podejściach największe wyężenie dotyczyło słupa umiejscowionego po tej samej stronie hali, lecz po przeciwnej stronie otworu drzwiowego. Pas dolny kratownicy o największym wykorzystaniu przekroju dla podejścia normowego dotyczył wiązara zlokalizowanego o jedno przęsło bliżej skraju hali. Dla pasa górnego kratownicy lokalizacja odnośnie przypadków obliczeniowych była odwrotna. Dla podejścia normowego w przypadku słupa ściany szczytowej i pasa górnego kratownicy decydowała kombinacja obliczeniowa KO1 (0°), natomiast dla pasa górnego KO2 (90°). W przypadku podejścia eksperymentalnego dla pasów kratownicy krytyczna okazała się KO4 (270°), a dla

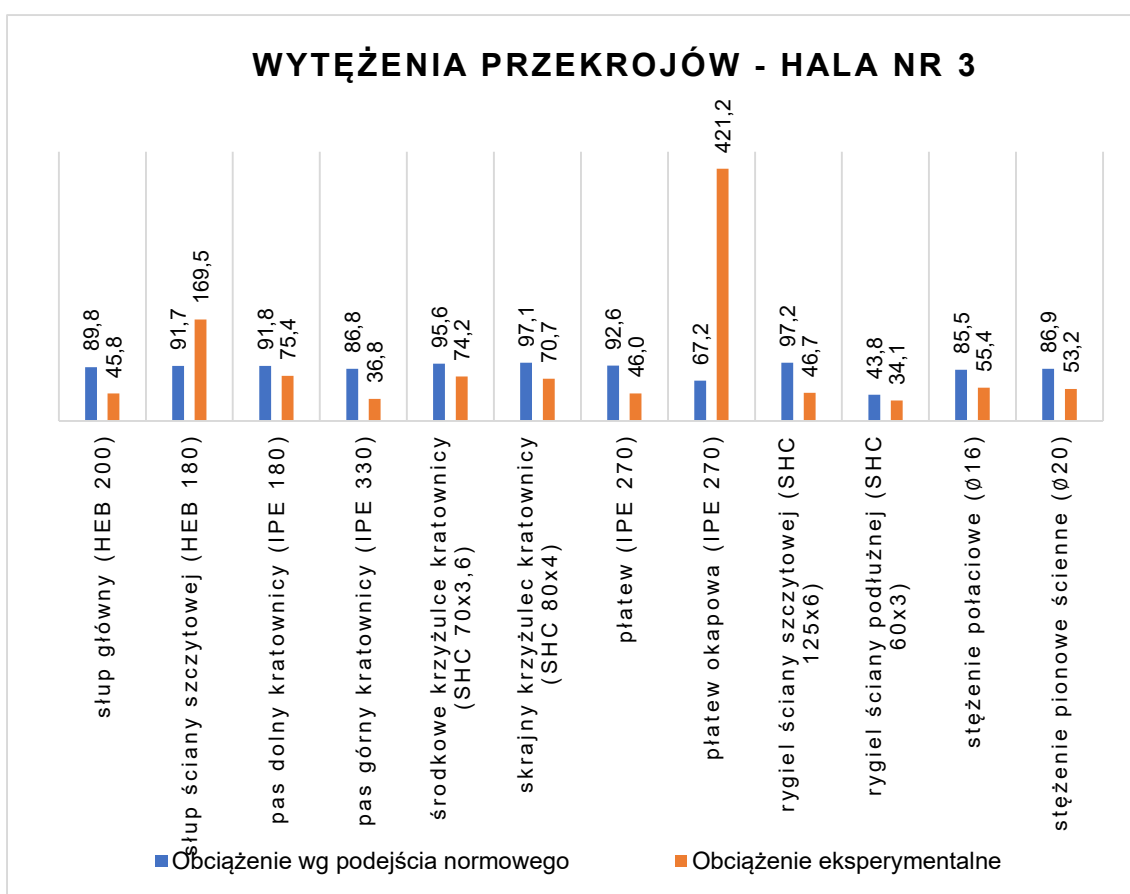
słupa ściany szczytowej KO3 (180°). Zauważono, że w przypadku obciążenia konstrukcji w sposób normowy, w większości przekrojów decydującą kombinacją obliczeniową była KO1 (0°), natomiast dla podejścia eksperymentalnego o wynikach decydowała głównie kombinacja KO4 (270°). Dodatkowo najbardziej wyęźnione przekroje, w większości przypadków odpowiadały innej kombinacji obliczeniowej. Różnica wyęźnienia przekrojów dla analizowanych podejść obciążenia konstrukcji, bez uwzględnienia wyników płatew środkowych wynosi ok.14,3%.



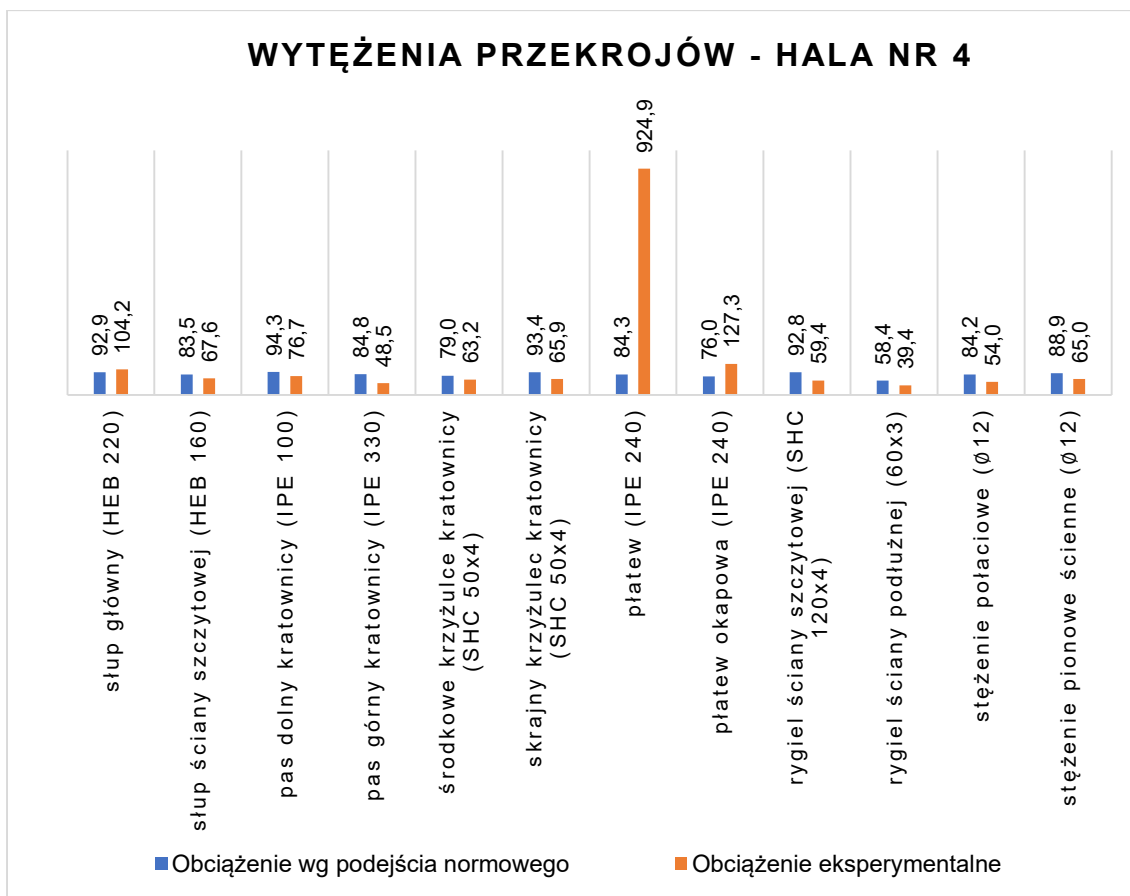
Rys. 73. Porównanie wyęźnień dla decydujących przekrojów w konstrukcji hali nr 1.



Rys. 74. Porównanie wyteżeń dla decydujących przekrojów w konstrukcji hali nr 2.



Rys. 75. Porównanie wyteżeń dla decydujących przekrojów w konstrukcji hali nr 3.



Rys. 76. Porównanie wyłężenia dla decydujących przekrojów w konstrukcji hali nr 4.

Analizując wyłężenia przekrojów zauważono, że dla konstrukcji obciążonych w sposób normowy decydującym kierunkiem działania wiatru jest 0° i 180° . Jedynie w przypadku hali nr 3 kierunek 90° okazał się decydować o wyniku w połowie przypadków największego wykorzystania przekroju. Dla obciążenia konstrukcji wiatrem z podejścia eksperymentalnego, nie zauważono wyraźnej tendencji dla jednego kierunku oddziaływania wiatru, który by decydował o wyniku. Dla trzech hal (nr 1, 3 i 4) najczęściej współdecydował kierunek 270° . Dla hal nr 2 i 3 krytyczny okazał się kierunek wiatru 0° , natomiast w przypadku hali nr 1 decydował również kierunek 180° .

2.5.1. Przemieszczenia konstrukcji

Przemieszczenia węzłowe konstrukcji na kierunkach zgodnych z daną osią globalnego układu współrzędnych, co do wartości bezwzględnej odpowiadają sobie w przypadku obciążenia konstrukcji w sposób normowy. Wartości przemieszczeń węzłowych dla podejścia eksperymentalnego są zbliżone do siebie wyłącznie dla przemieszczeń na kierunku Z. Różnice przemieszczeń wynoszą maksymalnie 0,3 mm. W przypadku przemieszczeń na kierunku X, największa różnica wartości to 4,5 mm dla hali nr 3. Dla przemieszczeń na kierunku Y, największa różnica wartości jest dla hali nr 1 i wynosi 2,4 mm. Różnice wartości przemieszczeń w przypadku obciążenia konstrukcji w sposób eksperymentalny, mogą wynikać z faktu, iż program wykonujący symulację przepływu wiatru, którego charakterystyka jest turbulentna, wybiera chwilową wartość

obciążenia, którą uważa za najgorszy przypadek. Z racji, że model turbulencji $k - \epsilon$ jest niedostatecznie szczegółowy, może przez to powodować różnice w otrzymanych wynikach, jednak dzięki jego uproszczeniu, obliczenia nie zajmują dużo czasu [15].

Dla hali nr 1 największe przemieszczenia występują w przypadku obciążenia wiatrem na kierunkach 0° i 180° . Zauważono, że niezależnie od kierunku działania wiatru, przemieszczenia dla konstrukcji obciążonej według podejścia normowego są większe niż dla obciążeń generowanych w sposób eksperymentalny. Największe różnice przemieszczeń wzdłuż globalnej osi X są dla wiatru działającego na kierunku 0° i 180° oraz wynoszą odpowiednio 50 mm i 50,7 mm. Dla pozostałych kierunków oddziaływania wiatru różnice przemieszczeń są mniejsze i oscylują w granicy od 1,6 mm do 2,5 mm na kierunku X, ok. 13,8 mm na kierunku Y i 4,3 mm na kierunku Z.

Największe przemieszczenia w przypadku hali nr 2 również występują dla obciążenia wiatrem na kierunkach 0° i 180° . Przemieszczenia dla konstrukcji obciążonej według podejścia normowego są większe niż dla obciążeń eksperymentalnych. Największe różnice przemieszczeń wzdłuż globalnej osi X są dla wiatru oddziaływującego na kierunku 0° i 180° oraz wynoszą odpowiednio 59,7 mm i 60 mm. Różnice przemieszczeń są mniejsze dla pozostałych kierunków działania wiatru i wynoszą 1,8 mm na kierunku X, 5,1 mm na kierunku Y i 2,9 mm na kierunku Z.

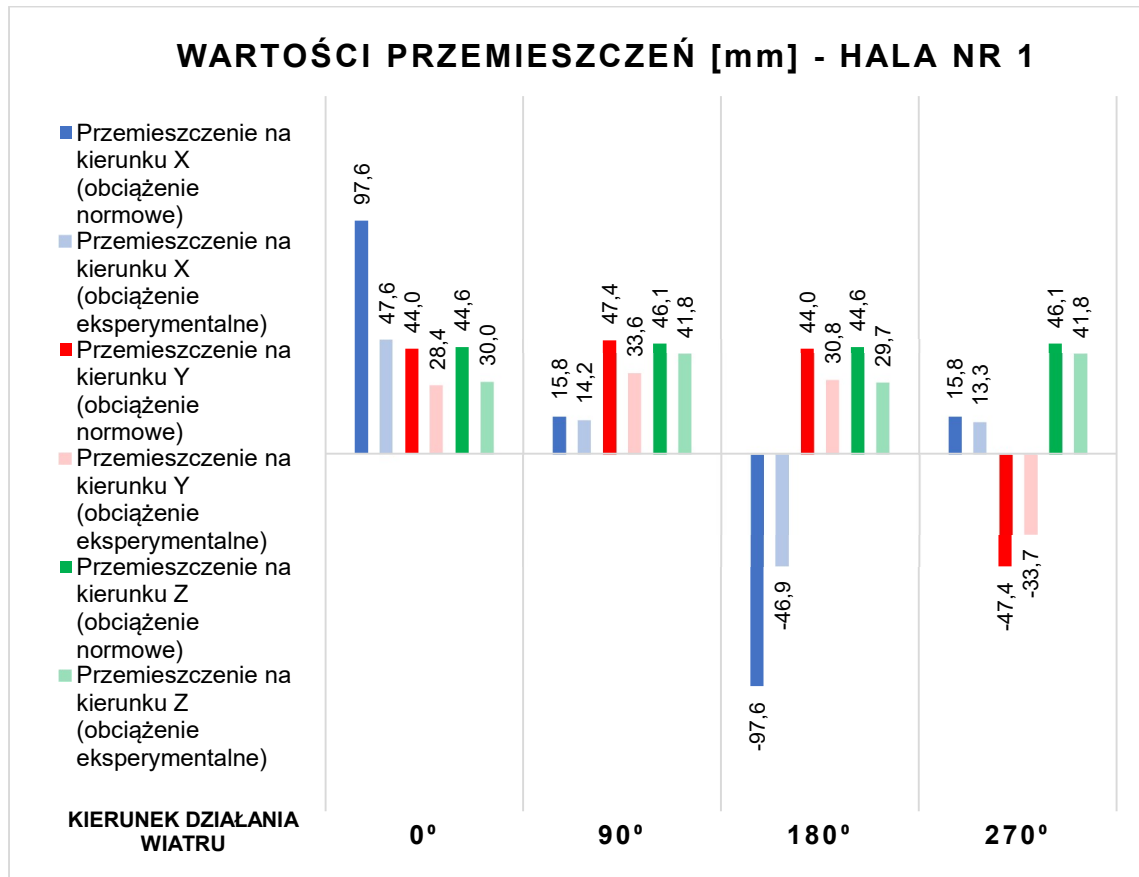
Dla hali nr 3 największe przemieszczenia występują także dla obciążenia wiatrem na kierunkach 0° i 180° . Dla obciążenia według podejścia eksperymentalnego przemieszczenia są mniejsze dla wszystkich kierunków wiatru porównując do wyników otrzymanych z obciążenia według podejścia normowego. Największe różnice przemieszczeń wzdłuż globalnej osi X są dla wiatru działającego na kierunku 0° i 180° oraz wynoszą odpowiednio 57,1 mm i 61,6 mm. Dla pozostałych kierunków oddziaływania wiatru różnice przemieszczeń są mniejsze i mieszczą się w granicy 1,3 mm na kierunku X, 12,5 mm na kierunku Y i 7 mm na kierunku Z.

Analizując wyniki dla hali nr 4 zauważono, że największe przemieszczenia również występują dla obciążenia wiatrem na kierunkach 0° i 180° . Dla obciążeń eksperymentalnych przemieszczenia dla konstrukcji są mniejsze w odniesieniu do modeli obciążonych według podejścia normowego. Największe różnice przemieszczeń wzdłuż globalnej osi X występują dla wiatru oddziaływującego na kierunku 0° i 180° oraz wynoszą ok. 38,9 mm. W odniesieniu do wyniku normowego różnica stanowi ok. 42%. Różnice przemieszczeń są mniejsze dla pozostałych kierunków działania wiatru i wynoszą 0,2 mm na kierunku X, ok. 0,6 mm na kierunku Y i 3,3 mm na kierunku Z.

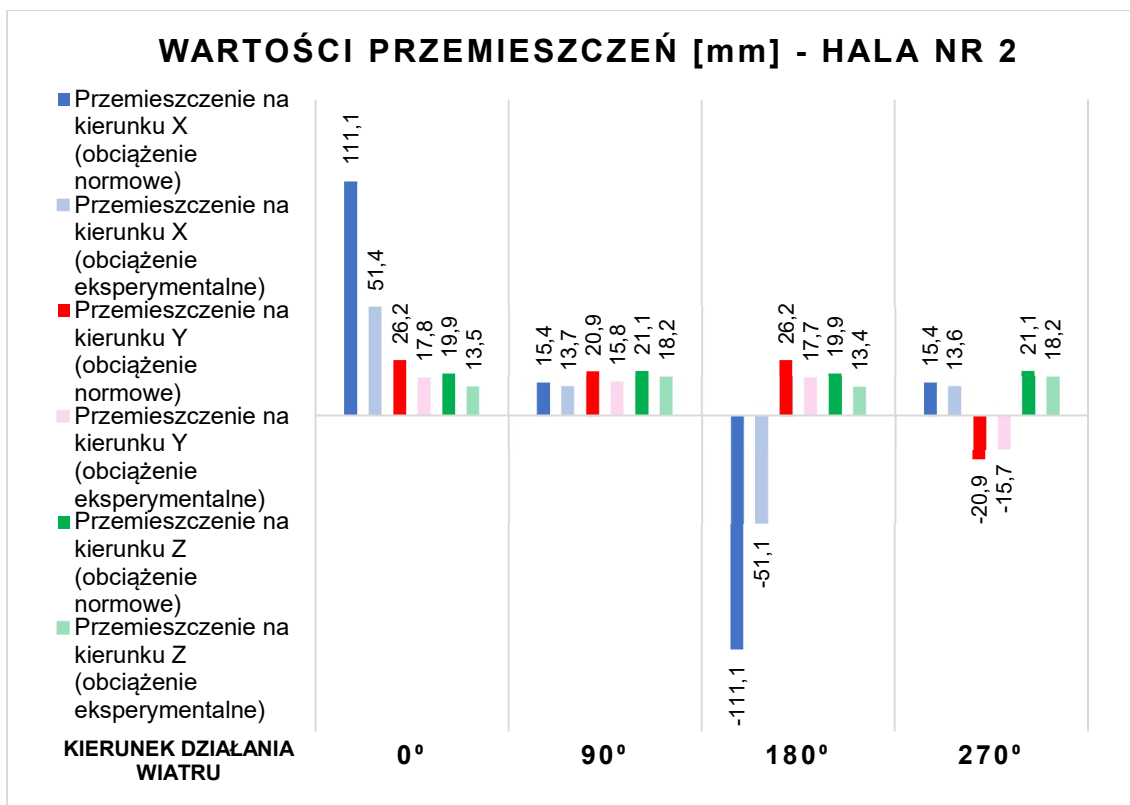
Na podstawie wyników przemieszczeń konstrukcji zauważono, że największe przemieszczenia dla wszystkich analizowanych przypadków, występują dla obciążenia wiatrem na kierunku X, czyli dla wiatru wiejącego na kierunku 0° i 180° . Fakt ten można uzasadnić większymi obciążeniami jakie musi przenieść konstrukcja, ponieważ powietrzchnia, na którą oddziałuje wiatr jest większa w porównaniu do powierzchni ściany szczytowej. Dodatkowo, w kierunku poprzecznym elementem usztywniającym halę na kierunku X jest kratownica, a słupy główne są w dużej odległości od siebie. Z kolei przemieszczenia na kierunku Y są niwelowane

przez stężenia, rygle ściany podłużnej oraz płatwie, które usztywniają konstrukcję na tym kierunku. Dodatkowo, odległość słupów głównych jest znacznie mniejsza w porównaniu do ich rozstawu poprzecznego.

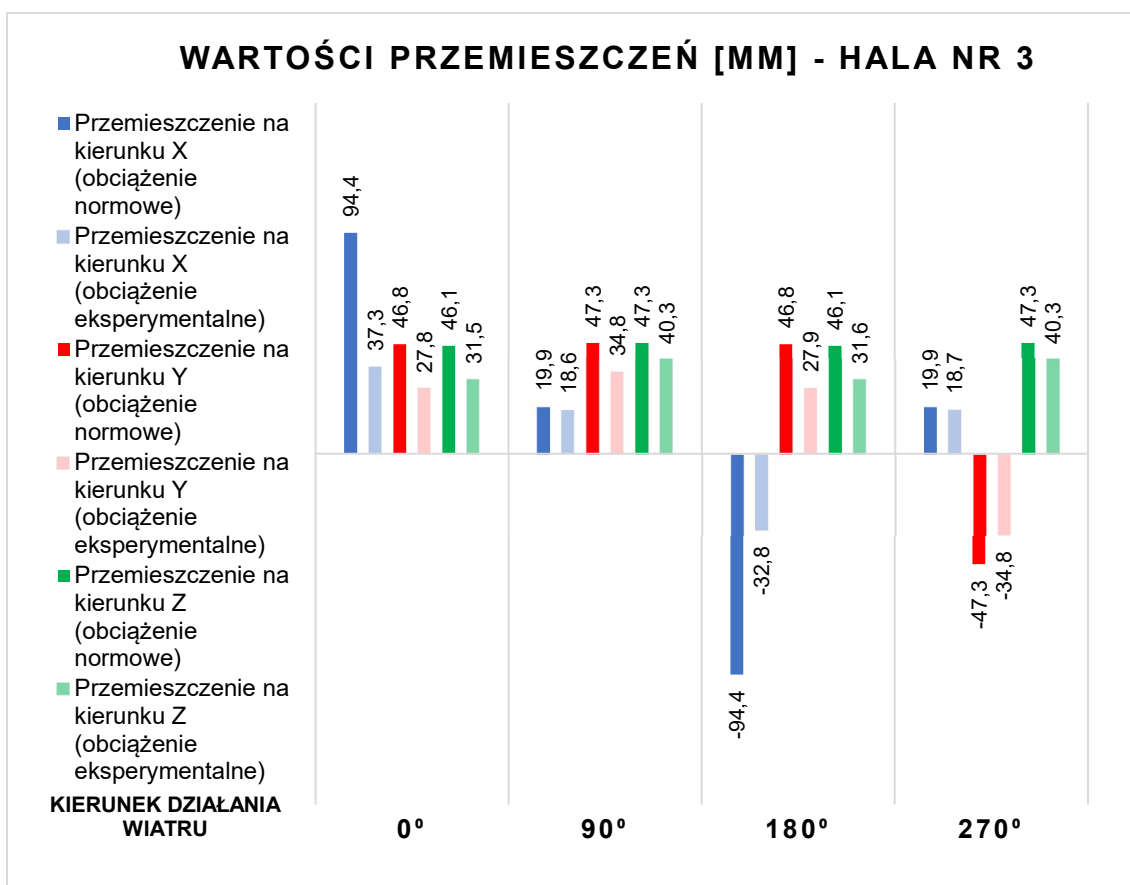
Zauważono, że największe przemieszczenia konstrukcji obciążonej w sposób normowy występują dla hali nr 2, natomiast w przypadku obciążenia eksperymentalnego największe przemieszczenia otrzymano dla hali nr 4.



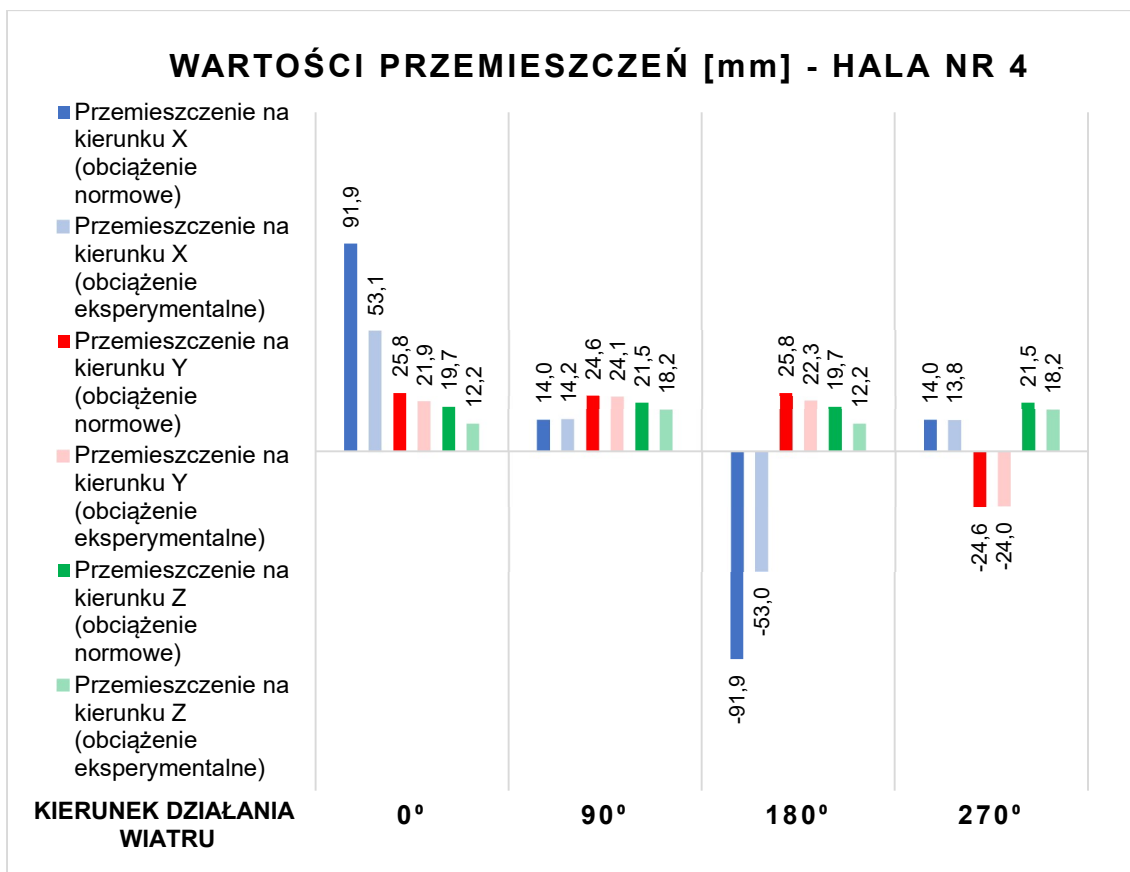
Rys. 77. Porównanie wartości przemieszczeń konstrukcji hali nr 1.



Rys. 78. Porównanie wartości przemieszczeń konstrukcji hali nr 2.



Rys. 79. Porównanie wartości przemieszczeń konstrukcji hali nr 3.



Rys. 80. Porównanie wartości przemieszczeń konstrukcji hali nr 4.

3. PODSUMOWANIE

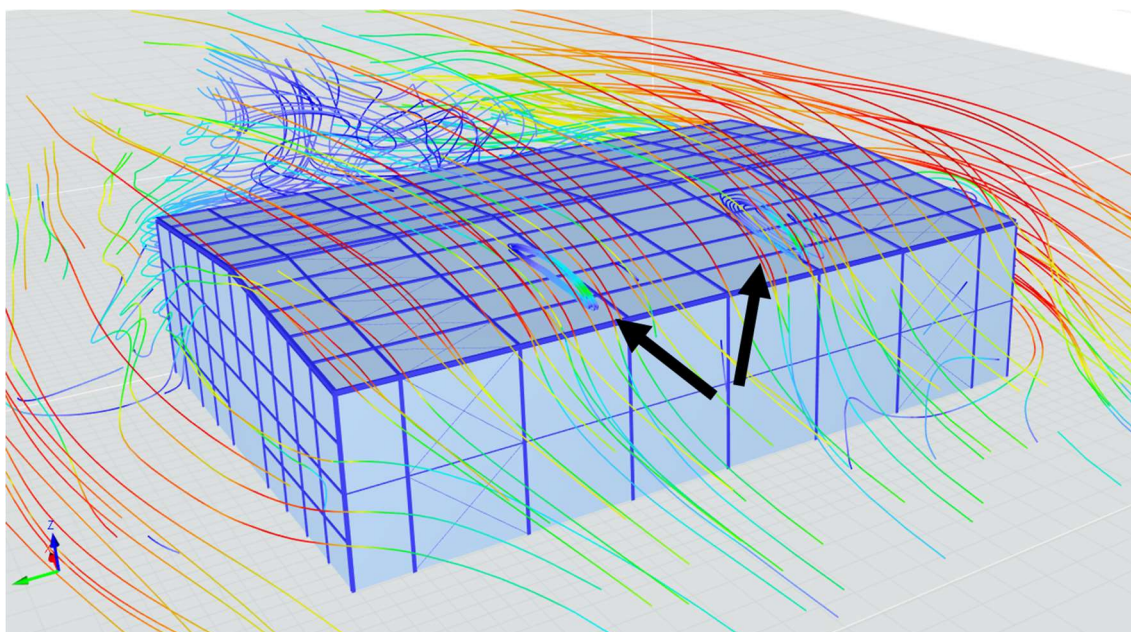
Analizie zostały poddane cztery hale stalowe o różnych rozmiarach i konstrukcji opisanej szczegółowo w rozdziale 2.1. Wszystkie konstrukcje zostały obciążone ciężarem własnym, obciążeniem technologicznym, śniegiem zgodnie z Eurokodem [13] oraz wiatrem. Obciążenie wiatrem zostało przyłożone do konstrukcji w sposób zalecany przez Eurokod [1] oraz według podejścia eksperymentalnego za pomocą numerycznej dynamiki płynów CFD w programie RWIND 2. Szczegółowy sposób oraz przyjęte założenia do obciążeń od wiatru opisano w rozdziale 2.2. Każda konstrukcja analizowanej hali została poddana optymalizacji przekrojów w odniesieniu do obciążenia konstrukcji według podejścia normowego, a sumaryczne zużycie stali w przeliczeniu na m² hali przedstawiono w tabeli 1. Dla większości elementów konstrukcji, celowo założono taki przekrój, aby w miarę możliwości otrzymać wyężenie bliskie 100%. Wyjątkiem był rygiel ściany podłużnej, który przyjęto z profilu SHC 60x3, a jego wyężenie oscylowało w granicy ok. 46 %. Najbardziej wyężony przekrój został przyjęty w hali nr 2 i był to słup główny z HEB 220, którego nośność została wykorzystana w 98,2%. W ten sposób chciano uwypuklić różnice otrzymanych wyników względem obciążenia konstrukcji w sposób eksperymentalny.

Przegląd wyników wyężeń otrzymanych dla hali nr 1 z obu podejść obciążenia konstrukcji wykazuje wyraźną tendencję mniejszego wykorzystania przekroju dla konstrukcji obciążonej w sposób eksperymentalny. Kluczowym przekrojem okazał się pas górny kratownicy, różnica wyężeń sięga 46,7 %. W pozostałych przypadkach różnica ta wyniosła średnio 30,6 %. Lokalizacja decydujących przekrojów była w dużym stopniu zbliżona dla obu podejść obciążenia, jednak w przypadku słupów umiejscowienie najbardziej wyężonego elementu znajdowała się po przeciwległej stronie hali. Dla podejścia normowego była to strona nawietrzna, natomiast dla podejścia eksperymentalnego – strona zawietrzna. Kluczową kombinacją obliczeniową w przypadku obciążeń normowych była kombinacja KO3 (180°). Dla obciążeń wynikających z wiatru symulowanego w tunelu aerodynamicznym, decydujące okazały się kombinacje obliczeniowe KO3 (180°) i KO4 (270°). Analizując przemieszczenia węzłowe konstrukcji zauważono, że największe przemieszczenia są na kierunku zgodnym z osią X globalnego układu współrzędnych i odpowiadają kierunkowi działania wiatru 0° i 180°. Stwierdzono, że wartości przemieszczeń różnią się o ok. 51% w zależności od zastosowanej metody obciążenia konstrukcji, a mniejsze wartości przemieszczeń otrzymano dla podejścia eksperymentalnego. Na pozostałych kierunkach przemieszczeń dla wiatru 90° i 270° maksymalne różnice przemieszczeń stanowią ok. 13,8 mm.

Interpretacja otrzymanych wartości wyężeń dla hali nr 2 dla obu podejść obciążenia konstrukcji również wykazuje wyraźną tendencję mniejszego wykorzystania przekroju dla konstrukcji obciążonej w sposób eksperymentalny. Najbardziej wyężonym przekrojem był także pas górny kratownicy, a różnica wyężeń wyniosła 51,6 %. Dla pozostałych przekrojów różnica ta wyniosła średnio 33,5 %. Lokalizacja kluczowych przekrojów była zbliżona do siebie w przypadku obu podejść obciążenia, jednak umiejscowienie słupów o największym

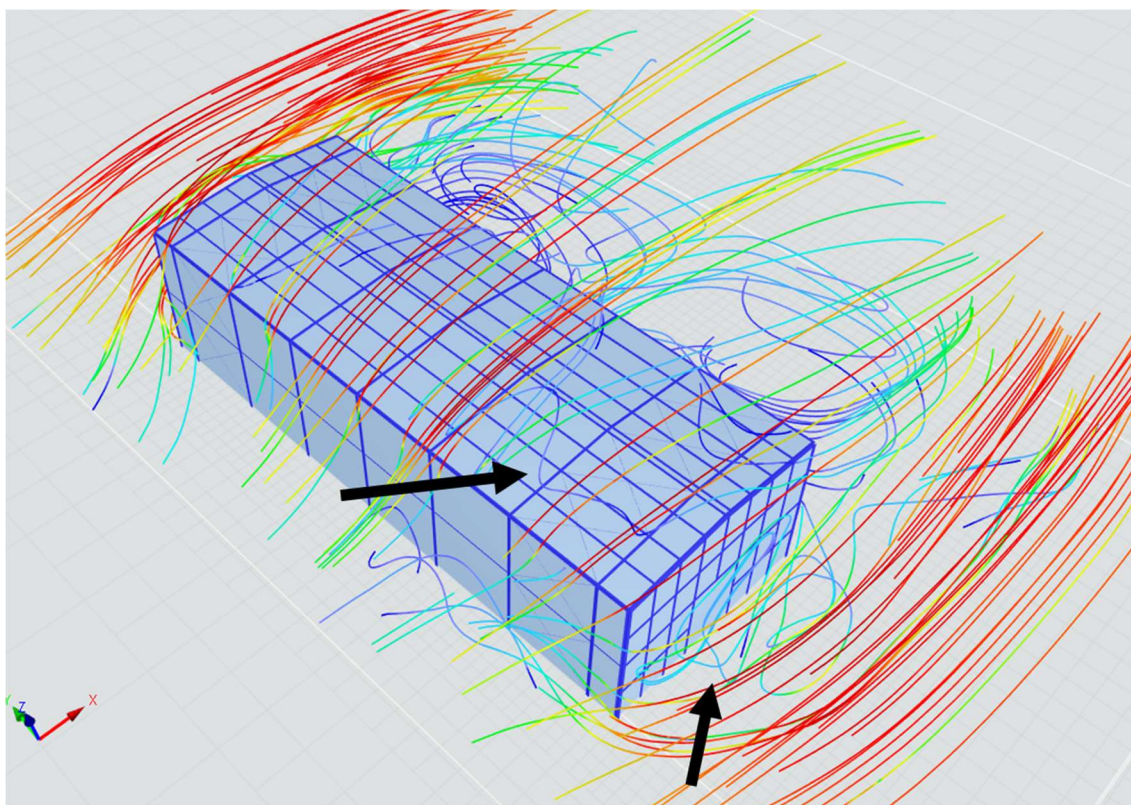
wykorzystaniu przekroju znajdowała się po przeciwległej stronie hali. Dla obciążeń wygenerowanych na podstawie symulacji wiatru była to strona zawietrzna, natomiast dla obciążeń zgodnych z podejściem normowym – strona nawietrzna. Decydującą kombinacją obliczeniową dla obciążeń normowych była kombinacja KO2 (90°). Dla obciążeń z podejścia eksperymentalnego, najbardziej krytyczna okazała się kombinacja obliczeniowa KO4 (270°). Dokonując analizy przemieszczeń węzłowych konstrukcji stwierdzono, że największe przemieszczenia są na kierunku zgodnym z osią X globalnego układu współrzędnych, które odpowiadają kierunkowi działania wiatru 0° i 180°. Odnotowano różnicę wartości przemieszczeń wynoszącą ok. 54% w zależności od zastosowanej metody obciążenia konstrukcji, natomiast mniejsze wartości przemieszczeń wynikały z obciążenia według podejścia eksperymentalnego. Największe różnice przemieszczeń na pozostałych kierunkach wynoszą 5,1 mm.

Analiza wartości wytyżeń dla hali nr 3 w przypadku słupa ściany szczytowej oraz płatwi okapowej wykazała przekroczenie nośności podczas obciążenia konstrukcji wiatrem z symulacji numerycznej. Różnice wyniosły odpowiednio 77,8 % i 353,9 % na niekorzyść rozwiązania eksperymentalnego. Znaczne wytyżenie tych elementów najprawdopodobniej jest spowodowane niedokładnością przyjętego modelu turbulencji. Z uwagi na skrajne usytuowanie profili i przyjętą w obliczeniach analizę II rzędu, wartości te mogą być niemiernodajne. Na podstawie analizy przepływu powietrza, zauważono, że w miejscach nadmiernego wytyżenia profili, znajdują się lokalne turbulencje (rys. 81). W pozostałych przypadkach średnia różnica wyniosła 30,8 % bez uwzględnienia wyników dla powyższych elementów. Poza dwoma wyjątkami stwierdzono znacznie większe wykorzystanie nośności dla podejścia normowego. Lokalizacja decydujących przekrojów była w dużym stopniu zbliżona lub jak w przypadku płatwi okapowej – taka sama dla obu podejść obciążenia. Najbardziej wytyżone słupy były umiejscowienie po przeciwległych stronach hali. Dla podejścia normowego była to strona nawietrzna, natomiast dla podejścia eksperymentalnego – strona zawietrzna. Decydującą kombinacją obliczeniową w przypadku obciążeń normowych była kombinacje KO1 (0°) i KO2 (90°), które odpowiadają działaniu wiatru na kierunkach 0° i 90°. Dla obciążeń wynikających z symulacji wiatru, decydujące okazały się kombinacje obliczeniowe KO1 (0°) i KO4 (270°). Analizując przemieszczenia węzłowe konstrukcji zauważono, że największe przemieszczenia są na kierunku zgodnym z osią X globalnego układu współrzędnych i odpowiadają kierunkowi działania wiatru 0° i 180°. Stwierdzono, że wartości przemieszczeń różnią się o 65% w zależności od zastosowanej metody obciążenia konstrukcji, lecz mniejsze wartości przemieszczeń otrzymano dla podejścia eksperymentalnego. Przemieszczenia na pozostałych kierunkach dla wiatru 90° i 270° różnią się maksymalnie o 12,5 mm.



Rys. 81. Lokalne turbulencje wiatru dla hali nr 3.

Z wyników wytyżeń dla hali nr 4 wynika, że nośność dla słupa głównego oraz płatek została znacznie przekroczona dla obciążenia konstrukcji w sposób eksperymentalny. Maksymalna różnica wykorzystania przekroju wyniosła 840,6 %, natomiast po odrzuceniu tych wyników średnia różnica dla pozostałych przekrojów wynosi 14,3 %. Analogicznie jak dla hali nr 3, zauważono lokalne turbulencje wiatru (rys. 82). Lokalizacja kluczowych przekrojów różniła do siebie w przypadku obu podejść obciążenia. Decydującą kombinacją obliczeniową dla obciążeń normowych była kombinacja KO1 (0°). Dla obciążeń z podejścia eksperymentalnego, decydująca okazała się kombinacja obliczeniowa KO4 (270°). Analizując przemieszczenia węzłowe konstrukcji stwierdzono, że największe z nich są na kierunku zgodnym z osią X globalnego układu współrzędnych, które odpowiadają kierunkowi działania wiatru 0° i 180°. Stwierdzono różnicę wartości przemieszczeń wynoszącą ok. 42% w zależności od zastosowanej metody obciążenia konstrukcji, natomiast mniejsze wartości przemieszczeń wynikały z obciążenia według podejścia eksperymentalnego. Największe różnice w wartościach przemieszczeń na pozostałych kierunkach wynoszą 3,3 mm.



Rys. 82. Lokalne turbulencje wiatru dla hali nr 4.

Głównym wnioskiem wynikającym z przeprowadzonych badań numerycznych jest fakt, że obciążając konstrukcję w numerycznym tunelu aerodynamicznym, otrzymujemy mniejsze wyężenia przekrojów oraz mniejsze wartości przemieszczeń. Dodatkowo można stwierdzić, że podczas projektowania zgodnie z zapisami normowymi, otrzymujemy konstrukcję z ok. 50% zapasem nośności co również stwierdzono w artykule [16] i [17] w porównaniu do wyników otrzymanych z symulacji wykorzystującej CFD. Numeryczne metody obciążenia konstrukcji, zdecydowanie mogą być przyszłościową alternatywą dla tradycyjnych badań w tunelu aerodynamicznym, ponieważ pozwalają na symulację przepływu powietrza co może zmniejszyć potrzebę przeprowadzania kosztownych i czasochłonnych badań eksperymentalnych co również stwierdzono podczas badań opisanych w pracy dyplomowej [18].

Sytuacje związane ze zmianą lokalizacji najbardziej wyężonego przekroju w zależności od podejścia obciążenia konstrukcji mogą wynikać z zastosowanego modelu turbulencji RAS $k-\epsilon$, który powoduje zawyżone wyniki dla ssania wiatru za badanym obiektem co potwierdzono w badaniach [19]. Ponadto rozbieżność wyników oraz bardzo duże przekroczenia nośności mogą wynikać również z uproszczeń przyjętego modelu turbulencji [15]. Stosowanie tego modelu jest powszechne mimo jego niedokładności, ponieważ znacząco skraca czas obliczeń [20]. W celu poprawienia jakości wyników, należałoby skorzystać z bardziej rozbudowanych modeli turbulencji $k-\epsilon$ oraz użycia bardziej wydajnego sprzętu komputerowego, który skróciłby czas potrzebny na wykonanie symulacji.

4. SPIS ILUSTRACJI

Rys. 1. Wizualizacja hali nr 1 o wymiarach 114 x 30 m.

Rys. 2. Wizualizacja hali nr 2 o wymiarach 114 x 15 m.

Rys. 3. Wizualizacja hali nr 3 o wymiarach 42 x 30 m.

Rys. 4. Wizualizacja hali nr 4 o wymiarach 42 x 15 m.

Rys. 5. Widok ściany szczytowej hali nr 1.

Rys. 6. Wymiary kratownicy hali nr 1.

Rys. 7. Widok ściany szczytowej hali nr 2.

Rys. 8. Wymiary kratownicy hali nr 2.

Rys. 9. Widok ściany szczytowej hali nr 3.

Rys. 10. Wymiary kratownicy hali nr 3.

Rys. 11. Widok ściany szczytowej hali nr 4.

Rys. 12. Wymiary kratownicy hali nr 4.

Rys. 13. Zwrot i kierunek działania wiatru na konstrukcję.

Rys. 14. Hala nr 1 z okładzinami.

Rys. 15. Profil wiatru według normy PN-EN 1991 2015-10'.

Rys. 16. Domena obliczeniowa.

Rys. 17. Przepływ wiatru o kierunku 0° dla hali nr 1.

Rys. 18. Przepływ wiatru o kierunku 90° dla hali nr 2.

Rys. 19. Przepływ wiatru o kierunku 180° dla hali nr 3.

Rys. 20. Przepływ wiatru o kierunku 270° dla hali nr 4.

Rys. 21. Obciążenie wiatrem o kierunku 0° dla hali nr 1 – widok od strony nawietrznej.

Rys. 22. Obciążenie wiatrem o kierunku 90° dla hali nr 2 – widok od strony nawietrznej.

Rys. 23. Obciążenie wiatrem o kierunku 180° dla hali nr 3 – widok od strony nawietrznej.

Rys. 24. Obciążenie wiatrem o kierunku 270° dla hali nr 4 – widok od strony nawietrznej.

Rys. 25. Lokalizacja najbardziej wyężonego słupa HEB 220 – hala nr 1.

Rys. 26. Lokalizacja najbardziej wyężonego przekroju słupa ściany szczytowej IPE 270 – hala nr 1.

Rys. 27. Lokalizacja najbardziej wyężonego przekroju pasa dolnego kratownicy IPE 180 – hala nr 1.

Rys. 28. Lokalizacja najbardziej wyężonego przekroju pasa górnego kratownicy IPE 330 – hala nr 1.

Rys. 29. Lokalizacja najbardziej wyężonego przekroju płatwi IPE 220 – hala nr 1.

- Rys. 30. Lokalizacja najbardziej wyężonego przekroju łatwi okapowej IPE 240 – hala nr 1.
- Rys. 31. Lokalizacja najbardziej wyężonego łupa HEB 220 – hala nr 2.
- Rys. 32. Lokalizacja najbardziej wyężonego przekroju łupa łciany szczytowej IPE 220 – hala nr 2.
- Rys. 33. Lokalizacja najbardziej wyężonego przekroju pasa dolnego kratownicy IPE 100 – hala nr 2.
- Rys. 34. Lokalizacja najbardziej wyężonego przekroju pasa górnego kratownicy IPE 330– hala nr 2.
- Rys. 35. Lokalizacja najbardziej wyężonego przekroju łatwi IPE 220 – hala nr 2.
- Rys. 36. Lokalizacja najbardziej wyężonego przekroju łatwi okapowej IPE 220 – hala nr 2.
- Rys. 37. Lokalizacja najbardziej wyężonego łupa HEB 200 – hala nr 3.
- Rys. 38. Lokalizacja najbardziej wyężonego przekroju łupa łciany szczytowej HEB 180 – hala nr 3.
- Rys. 39. Lokalizacja najbardziej wyężonego przekroju pasa dolnego kratownicy IPE 180 – hala nr 3.
- Rys. 40. Lokalizacja najbardziej wyężonego przekroju pasa górnego kratownicy IPE 330– hala nr 3.
- Rys. 41. Lokalizacja najbardziej wyężonego przekroju łatwi IPE 270 – hala nr 3.
- Rys. 42. Lokalizacja najbardziej wyężonego przekroju łatwi okapowej IPE 270 – hala nr 3.
- Rys. 43. Lokalizacja najbardziej wyężonego łupa HEB 220 – hala nr 4.
- Rys. 44. Lokalizacja najbardziej wyężonego przekroju łupa łciany szczytowej HEB 160 – hala nr 4.
- Rys. 45. Lokalizacja najbardziej wyężonego przekroju pasa dolnego kratownicy IPE 100 – hala nr 4.
- Rys. 46. Lokalizacja najbardziej wyężonego przekroju pasa górnego kratownicy IPE 330– hala nr 4.
- Rys. 47. Lokalizacja najbardziej wyężonego przekroju łatwi IPE 240 – hala nr 4.
- Rys. 48. Lokalizacja najbardziej wyężonego przekroju łatwi okapowej IPE 240 – hala nr 4.
- Rys. 49. Lokalizacja najbardziej wyężonego łupa HEB 220 – hala nr 1.
- Rys. 50. Lokalizacja najbardziej wyężonego przekroju łupa łciany szczytowej IPE 270 – hala nr 1.
- Rys. 51. Lokalizacja najbardziej wyężonego przekroju pasa dolnego kratownicy IPE 180 – hala nr 1.
- Rys. 52. Lokalizacja najbardziej wyężonego przekroju pasa górnego kratownicy IPE 330– hala nr 1.
- Rys. 53. Lokalizacja najbardziej wyężonego przekroju łatwi IPE 220 – hala nr 1.
- Rys. 54. Lokalizacja najbardziej wyężonego przekroju łatwi okapowej IPE 240 – hala nr 1.
- Rys. 55. Lokalizacja najbardziej wyężonego łupa HEB 220 – hala nr 2.
- Rys. 56. Lokalizacja najbardziej wyężonego przekroju łupa łciany szczytowej IPE 220 – hala nr 2.
- Rys. 57. Lokalizacja najbardziej wyężonego przekroju pasa dolnego kratownicy IPE 100 – hala nr 2.
- Rys. 58. Lokalizacja najbardziej wyężonego przekroju pasa górnego kratownicy IPE 330– hala nr 2.
- Rys. 59. Lokalizacja najbardziej wyężonego przekroju łatwi IPE 220 – hala nr 2.

- Rys. 60. Lokalizacja najbardziej wyężonego przekroju łatwi okapowej IPE 220 – hala nr 2.
- Rys. 61. Lokalizacja najbardziej wyężonego łupa HEB 200 – hala nr 3.
- Rys. 62. Lokalizacja najbardziej wyężonego przekroju łupa łciany szczytowej HEB 180 – hala nr 3.
- Rys. 63. Lokalizacja najbardziej wyężonego przekroju pasa dolnego kratownicy IPE 180 – hala nr 3.
- Rys. 64. Lokalizacja najbardziej wyężonego przekroju pasa górnego kratownicy IPE 330– hala nr 3.
- Rys. 65. Lokalizacja najbardziej wyężonego przekroju łatwi IPE 270 – hala nr 3.
- Rys. 66. Lokalizacja najbardziej wyężonego przekroju łatwi okapowej IPE 270 – hala nr 3.
- Rys. 67. Lokalizacja najbardziej wyężonego łupa HEB 220 – hala nr 4.
- Rys. 68. Lokalizacja najbardziej wyężonego przekroju łupa łciany szczytowej HEB 160 – hala nr 4.
- Rys. 69. Lokalizacja najbardziej wyężonego przekroju pasa dolnego kratownicy IPE 100 – hala nr 4.
- Rys. 70. Lokalizacja najbardziej wyężonego przekroju pasa górnego kratownicy IPE 330– hala nr 4.
- Rys. 71. Lokalizacja najbardziej wyężonego przekroju łatwi IPE 240 – hala nr 4.
- Rys. 72. Lokalizacja najbardziej wyężonego przekroju łatwi okapowej IPE 240 – hala nr 4.
- Rys. 73. Porównanie wyężeń dla decydujących przekrojów w konstrukcji hali nr 1.
- Rys. 74. Porównanie wyężeń dla decydujących przekrojów w konstrukcji hali nr 2.
- Rys. 75. Porównanie wyężeń dla decydujących przekrojów w konstrukcji hali nr 3.
- Rys. 76. Porównanie wyężeń dla decydujących przekrojów w konstrukcji hali nr 4.
- Rys. 77. Porównanie wartości przemieszczeń konstrukcji hali nr 1.
- Rys. 78. Porównanie wartości przemieszczeń konstrukcji hali nr 2.
- Rys. 79. Porównanie wartości przemieszczeń konstrukcji hali nr 3.
- Rys. 80. Porównanie wartości przemieszczeń konstrukcji hali nr 4.
- Rys. 81. Lokalne turbulencje wiatru dla hali nr 3.
- Rys. 82. Lokalne turbulencje wiatru dla hali nr 4.

5. SPIS TABEL

- Tab. 1. Sumaryczne zużycie stali dla hal nr 1-4.
- Tab. 2. Przypadki obciążeń według podejścia normowego i eksperymentalnego.
- Tab. 3. Obciążenie wiatrem dla hali nr 1.
- Tab. 4. Obciążenie wiatrem dla hali nr 2.
- Tab. 5. Obciążenie wiatrem dla hali nr 3.
- Tab. 6. Obciążenie wiatrem dla hali nr 4.
- Tab. 7. Wymiary domen obliczeniowych dla hal nr 1-4 z podziałem na kierunek oddziaływania wiatru.
- Tab. 8. Kombinacje obliczeniowe dla obciążenia konstrukcji według podejścia normowego.
- Tab. 9. Największe wyężenia przekrojów w hali nr 1 według podejścia normowego.
- Tab. 10. Największe wyężenia przekrojów w hali nr 2 według podejścia normowego.
- Tab. 11. Największe wyężenia przekrojów w hali nr 3 według podejścia normowego.
- Tab. 12. Największe wyężenia przekrojów w hali nr 4 według podejścia normowego.
- Tab. 13. Globalne przemieszczenia hal dla obciążeń według podejścia normowego.
- Tab. 14. Największe wyężenia przekrojów w hali nr 1 według podejścia eksperymentalnego.
- Tab. 15. Największe wyężenia przekrojów w hali nr 2 według podejścia eksperymentalnego.
- Tab. 16. Największe wyężenia przekrojów w hali nr 3 według podejścia eksperymentalnego.
- Tab. 17. Największe wyężenia przekrojów w hali nr 4 według podejścia eksperymentalnego.
- Tab. 18. Globalne przemieszczenia hal dla obciążeń według podejścia eksperymentalnego.

WYKAZ LITERATURY

- [1] PN-EN 1991-1-4:2008. Eurokod 1: Oddziaływania na konstrukcje -- Część 1-4: Oddziaływania ogólne -- Oddziaływania wiatru
- [2] Szkobodziński M. , Miedziałowski Cz.: Problemy ustalania obciążenia wiatrem w nietypowych konstrukcjach budowlanych. *Budownictwo i Inżynieria Środowiska* 2015, tom 6, nr 4, s. 201 – 211.
- [3] MESCO, <https://mesco.com.pl/skryptowanie-w-ansys-spaceclaim-direct-modeler/> (data dostępu 01.04.2023r.)
- [4] Gnatowski M., Klimasara J.: Analiza modelowania numerycznego konstrukcji budynku biblioteki uniwersyteckiej. *Przegląd Budowlany* 2021, nr 2, s. 37 – 47.
- [5] Premium Solutions, <https://premiumsolutions.pl/program/solidworks-flow-simulation/> (data dostępu 01.04.2023r.)
- [6] Dlubal, <https://www.dlubal.com/pl/pomoc-techniczna-szkolenia/pomoc-techniczna/baza-informacji/001691> (data dostępu 01.04.2023r.)
- [7] Jamińska P.: Wpływ sposobu zdefiniowania struktury wiatru w modelu turbulencji $k-\epsilon$ w wersji standard na rozkład współczynnika ciśnienia na powierzchni ścian prostopadłościanu. *Budownictwo i Architektura* 2012, tom 10, s. 93-104.
- [8] Boroń S., Kubica P.: Zastosowanie numerycznej mechaniki płynów CFD do modelowania zabezpieczania pomieszczeń stałymi urządzeniami gaśniczymi gazowymi. *Państwowy Instytut Badawczy, CNBOP-PIB, BiTP Vol. 42 Issue 2, 2016, pp. 151–157.*
- [9] Sztarbała G., CFD jako narzędzie do projektowania wentylacji pożarowej garaży. *Polski Instalator* 9/2004, str. 2-6.
- [10] Marków, M., Janecki, D., Misiołek, M., Warmuziński, K.: Zastosowanie CFD w ocenie drożności górnych dróg oddechowych. *Polski Przegląd Otorynolaryngologiczny* 2016, 5(3), 24–27.
- [11] *Biotechnologia*, <https://biotechnologia.pl/technologie/zastosowanie-obliczeniowej-mechaniki-plynow-w-medycynie,22079> (data dostępu 01.04.2023r.)
- [12] Dlubal, <https://www.dlubal.com/pl/produkty/samodzielne-programy-do-analazy-statycznie-wytrzymałościowej/rwind> (data dostępu 01.04.2023r.)
- [13] PN-EN 1991-1-3:2005. Eurokod 1 -- Oddziaływania na konstrukcje -- Część 1-3: Oddziaływania ogólne -- Obciążenie śniegiem.
- [14] Grafika z programu RFEM 6 firmy Dlubal.
- [15] Błazik-Borowa E., Problemy związane ze stosowaniem modelu turbulencji $k-\epsilon$ wyznaczania parametrów opływu budynków, Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, 2008.
- [16] Okoński R., Ambroziak A.: Wyznaczenie obciążeń wiatrem dla budynku wysokiego o złożonej geometrii z wykorzystaniem analizy przepływu CFD. *Przegląd Budowlany* 2022, tom 93, nr 11-12, s.42-51.
- [17] MESCO, <https://mesco.com.pl/symulacja-oplywu-wiatru-wokol-reaktora-scr/> (data dostępu 01.04.2023r.)

- [18] Werth M.: *Vergleichende Studie zu Windlastmodellen im Hochbau: Numerische Strömungsberechnung vs. Druckmessungen im Windkanal*, 2019.
- [19] Tominaga Y., Akabayashi S., Kitahara T., Arinami Y.: *Air flow around isolated gable-roof buildings with different roof pitches: Wind tunnel experiments and CFD simulations*. *Building and Environment* 2015, tom 84, s.204-213.
- [20] Okoński R., Ambroziak A.: *Analiza porównawcza sposobów wyznaczania obciążeń wiatrem na podstawie norm projektowych i analizy przepływu CFD*. *Przegląd Budowlany* 2022, tom 93, nr 3-4, s.46-57.