

Optymalizacja konstrukcji nośnej hali stalowej Optimization of the supporting structure of steel hall

Leszek Chodor¹, Łukasz Malik²

¹*Katedra Mechaniki, Konstrukcji Metalowych i Metod Komputerowych,
Department of Structure Mechanics, Metal Structures and Computer Methods
Wydział Budownictwa i Architektury, Politechnika Świętokrzyska
Faculty of Civil Engineering and Architecture, Technological University of Kielce
al. 100-lecia Państwa Polskiego 7, 25-323 Kielce
e-mail: leszek@chodor.co*

²*Student specjalności Konstrukcje budowlane
Student of Building Structures
Wydział Budownictwa i Architektury, Politechnika Świętokrzyska
Faculty of Civil Engineering and Architecture, Technological University of Kielce
al. 100-lecia Państwa Polskiego 7, 25-323 Kielce
e-mail: malder2@o2.pl*

Streszczenie

W pracy przedstawiono wybrane analizy konstrukcji hal stalowych na słupach stalowych lub żelbetowych z warunku optymalizacji kosztu dla najczęściej stosowanych rozwiązań konstrukcyjnych w różnych strefach klimatycznych. Wariantowano rodzaj przekrycia (płatwiowe, bezpłatwiowe), rozstawy między płatwiami oraz dźwigarami kratowymi przy różnym typie wykratowania, a także rodzaj słupów (stalowe, żelbetowe). Wymiarowanie elementów przeprowadzono według norm europejskich [1 do 4] z uwzględnieniem racjonalnych zasad globalnej analizy stateczności ram z imperfekcjami, pracujących w zakresie sprężysto-plastycznym.

Abstract

The paper presents selected structural analysis of steel halls for steel or reinforced concrete columns with a condition to optimize the cost for the most common design solutions in different climatic zones. Variants of the type of roof covering (with or without purlins), spacing between purlins and lattice girders with different laced strut, and the type of columns (steel, concrete). Sizing of elements were carried out by European standards [1 to 4] taking into account the reasonable rules of global stability analysis framework of imperfections, working in the elastic-plastic range.

Słowa kluczowe: optymalizacja, konstrukcja stalowa hal, słupy żelbetowe
Keywords: optimization, steel structure halls, reinforced concrete columns

1. Wstęp

Problematyka optymalizacji konstrukcji hal stalowych ma rosnące znaczenie ze względu na rozwój inwestycji przemysłowych, magazynowych, targowych czy też widowiskowych z jednoczesnym wprowadzaniem racjonalnych metod wymiarowania konstrukcji: globalnej analizy stateczności oraz metod nośności plastycznej (granicznej) [1,3]

Analizy ekonomiczne rozmaitych rozwiązań hal stalowych, w istocie sprowadzają się do oszacowania zużycia stali. Takie rozważania prowadził już Krzyśpiak (1976) [4], a w ostatnich latach Pawlak [5,6]. Optymalizacja konstrukcji hal jest jednym z głównych tematów podręczników projektowania konstrukcji stalowych, np. Steel Designers Manuals (2003) [7].

W pracy [8] pokazano, że pokrycia z ryglami kratowymi są znacznie lżejsze od ram z ryglami pełnościennymi dla rozpiętości ram większych od 16 m. Analizy prowadzone w niniejszej pracy ograniczono do ram z ryglem kratowym. Przedstawiono wybrane wyniki analiz prowadzonych przez Malika (2014) w dyplomowej pracy inżynierskiej. Analizowano konstrukcję hal zlokalizowanych w strefach klimatycznych 1,2,3 (strefa obciążenia śniegiem lub wiatrem) dla różnych wariantów pokrycia: rozstawu i rozpiętości płatwi, dźwigarów, i innych parametrów, a przede wszystkim materiału słupów: stal/ żelbet.

1. Introduction

The subject of hall construction optimization is significantly growing due to the development of industrial, warehouse, market or entertainment investments, while providing rational methods of dimensioning construction: global stability analysis and methods of plastic resistance (border) [1,3]

Economic analyses of different steel hall solutions practically boil down to estimations of steel consumption. Such consideration were already performed by Krzyśpiak (1976) [4], and in recent years by Pawlak [5,6]. Optimization of hall construction is one of the main topics in textbooks devoted to the design of steel constructions for example Steel Designers Manuals (2003) [7].

In the work [8] it was shown that coverings with lattice bolts are much lighter than those with transmural bolts for span frames higher than 16m. The analyzes conducted in this study was limited to the framework of lattice bolt. In the following work author presents selected results of analysis conducted by Malik (2014) in the engineer thesis. The construction of halls located in climate zones 1,2,3 were analyzed (snow or wind loaded zone) for different covering variants: span and spacing of purlins, girders, and other parameters, and especially

Uzyskane wyniki zestawione w postaci wykresów mogą stanowić wartościowy materiał na etapie koncepcyjnego projektowania hal stalowych.

2. Założenia

Analizowano hale jednonawowe dla ustalonej wysokości w kalenicy 7,5 m oraz nachyleniu połaci dachowej 5%, z pokryciem typu lekkiego na blasze trapezowej. Przyjęto, że dach jest kategorii H, a przekrycie obciążone instalacjami podwieszonymi $0,3 \text{ kN/m}^2$.

Halę zbudowano z 10-ciu układów poprzecznych o rozstawie 6,0; 7,5; 9,0 lub 12,0 m. Rozpiętość nawy wynosiła: 21, 24 27 i 30 m.

Porównano konstrukcje bezpłatniowe oraz płatwiowe przy rozstawie płatwi 1,5; 3,0 lub 4,5 m.

Analizowano trzy rodzaje płatwi: walcowane IPE, gięte na zimno o profilu Z oraz kratowe. Płatwie kratowe miały wysokość 60 cm dla długości 9 m oraz 80 cm dla długości 12 m oraz wykratowanie typu V.

Rygle ram przyjęto jako kratowe dwutrapezowe z obniżonym pasem o zróżnicowanych parametrach: skratowanie typu V bez słupków, typu V ze słupkami i typu N.

Wysokość dźwigarów h przyjęto 1,75 m dla długości $L=21$ m; $h=2,0$ m dla $L=24$ m; $h=2,25$ m dla $L=27$ m i $h=2,50$ m dla $L=30$ m.

Słupy przyjmowane jako stalowe lub żelbetowe o wysokości 8,41 do 8,59 m co 7,5 m.

Kalkulacje kosztowe poszczególnych elementów konstrukcji przyjęto jako średnie z cenników firm „Centrostal”, „RolStal”, „Ruukki” i zgodnie z zasadami wyceny prowadzonymi przez „Sekocenbud”.

3. Analiza przypadków

Dla wybranych konstrukcji hal uzyskano następujące rezultaty:

Przypadek 1 [obiekt wzorcowy – najekonomiczniejszy]

Wymiary hali $24 \times 67,5 \text{ m}$, co daje powierzchnię posadzki 1620 m^2 . Rozstaw układów nośnych co 7,5 m. Dach wykonano w konstrukcji **bezpłatwiowej**, stosując blachę trapezową T153-840 gr.0,75/320. Blachę tę mocujemy do dźwigarów kratowych o skratowaniu V ze słupkami, pasy zaprojektowane jako dwuteowniki HEA, natomiast krzyżulce i słupki jako rury kwadratowe. Słupy nośne zaprojektowano jako elementy żelbetowe o przekroju $30 \times 40 \text{ cm}$ C35/40 i wysokości 8,53 m zbrojenie stalą B500 o przekroju $17,3 \text{ cm}^2$. Obiekt zlokalizowano w strefie klimatycznej 2/1 (śnieg/wiatr).

Oszacowano, że ciężar przekrycia stalowego wynosi **18,8** kg/m^2 , a jego koszt łącznie ze słupami żelbetowymi **168,0** zł/m^2 posadzki hali. W koszty wliczono prefabrykację elementów żelbetowych i stalowych w wytwórni, łącznie z malowaniem antykorozyjnym i montażem konstrukcji.

Przypadek 2 [dach płatwiowy]

Wymiary hali $24 \times 67,5 \text{ m}$ rozstaw układów nośnych co 7,5 m, dach wykonano w konstrukcji płatwiowej stosując blachę trapezową T55-976 gr.0,60/280 i płatwie LP Z/300 gr.2,5/350 o rozstawie co 1,5 m. Płatwie są mocowane do dźwigarów kratowych na słupach żelbetowych jak w przypadku 1. Oszacowano, że ciężar konstrukcji stalowej wynosi **19,52** kg/m^2 , a koszt konstrukcji łącznie ze słupami **191,3** zł/m^2 .

Przypadek 3 [wykratowanie dźwigara]

Rozpatrujemy obiekt jak w przykładzie 1, ale z innym typem

columns material: steel/ reinforced concrete. Obtained results compiled in the form of graphs may play an important role at the conceptual stage of steel halls design.

2. Assumptions

Single nave halls were analyzed for the fixed height in ridge 7.5 m and 5% slope of the decking roof with the light type of covering with trapezoidal sheet. It was assumed that the roof is of H category and load bearded with installation suspended 0.3 kN/m^2 .

Halls were built with 10 transverse system with the spacing of 6.0; 7.5; 9.0 or 12.0 m. The hall span was verified for 21, 24, 27 and 30 m.

The non-purlin and purlin solutions with the purlin spacing of 1.5; 3.0 or 4.5 m were compared.

Three types of purlins were analyzed: IPE rolled purlin, cold formed steel profile Z, and lattice. Lattice purlins were assumed with type of latticework V, height of 60 cm for length of 9 m and 80 cm for length of 12 m.

Frame bolts were assumed to be lattice bi-trapezoidal with different parameters: type of latticework V without vertical bars, type V with vertical and type N.

The height of girder h was assumed 1.75 m for length $L=21$ m; $h=2.0$ m for 24 m; $h=2.25$ m for $L=27$ m and $h=2.50$ m for $L=30$ m.

The columns are steel or reinforced concrete with the height: 8.41 to 8.59 m every 7.5 m.

Costs calculation for each element of construction are taken as the average from the price list of „Centrostal”, „RolStal”, „Ruukki” and according to the “Sekocenbud” calculation rules.

3. Case study

For selected hall construction following results were obtained:

Case 1 [model object – the most economical]

Hall dimensions $24 \times 67,5 \text{ m}$, which gives the floor surface 1.620 m^2 . Spacing of bearing systems every 7.5 m. Roof made in the non-purlin construction using trapezoidal sheet T153-840 t. 0.75/320. The metal sheet is fastened to the truss girders of the latticework V type, with vertical bars. Chord designed as H-beams, while diagonal and vertical bars as square tubes. Load-bearing columns were designed as reinforced concrete elements of $30 \times 40 \text{ cm}$ C35/40 and height 8.53 m reinforced steel B500-section 17.3 cm^2 . The object located in climate zone 2/1 (snow/wind).

It was estimated that the weight of covering the steel is **18.8** kg/m^2 , and its cost including reinforced concrete pillars **168.0** zł/m^2 floor hall. The cost includes fabrication of reinforced concrete and steel elements in the record, including the painting of corrosion and installation design.

Case 2 [purlin roof]

Hall dimension: $24 \times 67,5 \text{ m}$ spacing of 7.5 m, the roof built in the purlin system with using of trapezoidal sheet T55-976 t. 0.60/280 and purlins LP Z/300 t. 2.5/350 with the spacing every 1.5 m. The purlins are fixed to lattice girders on the reinforced concrete columns as in the first case. It has been estimated that the weight of the steel structure is **19.52** kg/m^2 , and the cost of construction, including the columns **191.3** zł/m^2 .

wykratowania dźwigara: zamiast typu V ze słupkami wystąpi wykratowanie typu N. W przyjętym rozwiązaniu ciężar przekrycia wynosi **19,4 kg/m²**, a koszty wraz ze słupami żelbetowymi **176,1 zł/m²**.

Przypadek 4 [słupy stalowe, czy żelbetowe]

Projekt obiektu z przypadku 1 wykonano przy zastosowaniu słupów żelbetowych, natomiast w niniejszym wariantcie zmieniono je na stalowe. Pozostałe parametry konstrukcji pozostawiono bez zmian. Mimo zmniejszenia ciężaru konstrukcji, wskutek większej ceny jednostkowej stali od ceny żelbetu, uzyskano znaczący (o 30%) wzrost ceny obiektu, wynoszący **214,1 zł/m²**.

Przypadek 5 [strefy obciążeń klimatycznych]

W celu oceny wpływu strefy klimatycznej na obiekt wykonano projekt obiektu dla strefy klimatycznej 3/1. Przesunięcie obiektu z 2/1 strefy (przypadek 1) do strefy 3/1 spowodowała wzrost ciężaru dźwigara kratowego do **8,65 kg/m²**, a także wzrost wymiarów słupa żelbetowego (30x45cm). Spowodowało to wzrost kosztów łącznych do **178,1 zł/m²**, czyli o 6%

Case 3 [girder lattice type]

The object is analyzed as in the first example but with other girder lattice type: instead of V type with vertical bars there is N type lattice. In the assumed solution weight covering amounts **19.4 kg/m²**. The cost of construction execution with the reinforced concrete amounts to **176.1 zł/m²**.

Case 4 [steel or concrete columns]

The project of the object in the first example was built with the using of reinforced concrete columns but here they are changed to steel. The other construction parameters are without changes. Despite reducing the weight of the construction, the cost of the object has significantly grown due to higher unit price of steel than of reinforced concrete It was achieved a significant (about 30%) increase in object prices, amounting to **214.1 zł/m²**

Case 5 [climate-loading zones]

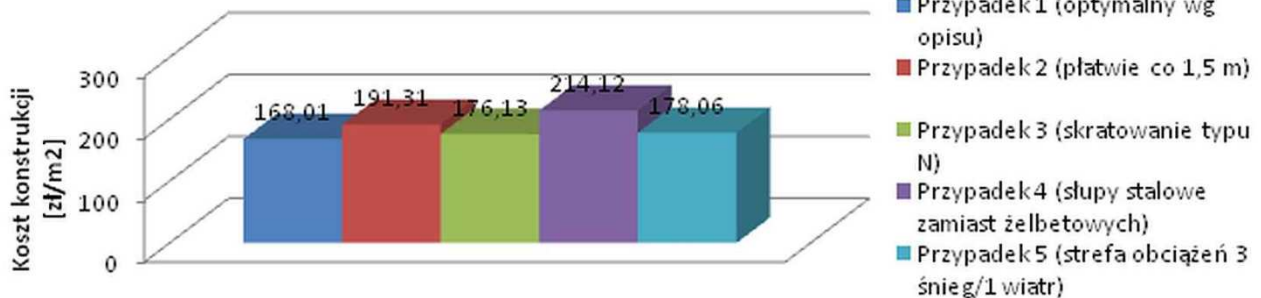
In order to estimate the influence of the climate zone on the object, it was designed in the zone 3/1. The move of the object from 2/1 zone to 3/1 zone caused increase of the weight of lattice girder to **8.65 kg/m²** and increase of reinforced concrete posts dimensions (30x45cm). It generated increase of the total costs to **178.1 zł/m²** (6% more).

4. Wykresy porównawcze

Na rys.1 pokazano porównanie analizowanych przypadków na wykresach słupkowych, a na rys.2. pokazano wykresy porównawcze dla różnych wariantów dźwigarów oraz płatwi.

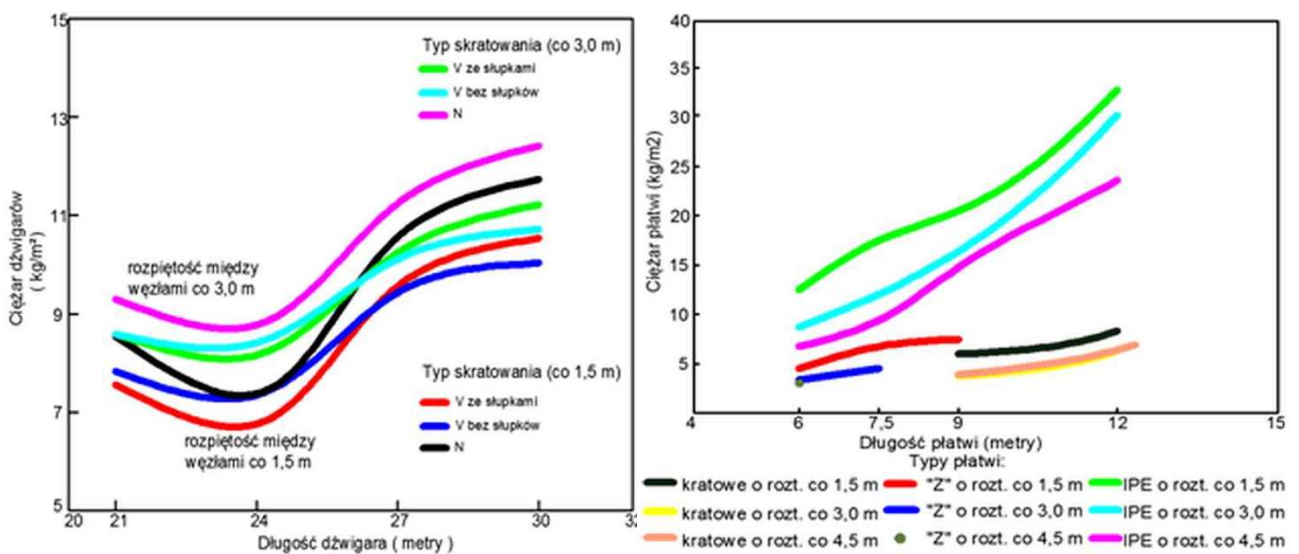
4. Comparative Charts

Fig. 1. presents comparison of analyzed cases on bar charts. Fig. 2. presents comparison charts for different variant of girders and purlins.



Rys.1. Wykresy słupkowe dla analizowanych przypadków,

Fig.1. Bar graphs for the analyzed cases



Rys.2. Wykresy porównawcze dla różnych dźwigarów i płatwi

Fig.2. Comparison charts for different girders and purlins

5. Uwagi i wnioski

Na podstawie przeprowadzonych w pracy analiz można przedstawić następujące wnioski [8]:

1. Zastosowanie słupów żelbetowych jest rozwiązaniem znacznie korzystniejszym od zastosowania słupów stalowych. Koszt słupa żelbetowego jest nawet trzykrotnie mniejszy od stalowego. Zmniejszenie całego kosztu konstrukcji hali dochodzi do 30%.
2. Najoptymalniejszym typem wykratowania dla dźwigarów kratowych w zakresie długości 21 do 24 m jest typ V ze słupkami, natomiast w przypadku większych rozpiętości typ V bez słupków. Typ wykratowania zwiększa cenę wykonania obiektu od 5% wzwyż.
3. Zużycie stali na płatwie istotnie zależy od rozpiętości oraz rozstawu, a w mniejszym stopniu od strefy śniegowej. Ciężar, a także koszty płatwi walcowanych IPE znacznie przewyższają koszty płatwi giętych na zimno i kratowych nawet po uwzględnieniu kosztów robocizny oraz kosztów wytworzenia.
4. W przypadku płatwi giętych na zimno obszar zastosowania jest w zasadzie ograniczony do długości 9 m i rozstawu do 1,5 m. Optymalnie jest je stosować przy długości do 6 m i rozstawie do 3 m – w tym zakresie charakteryzują się one małym ciężarem, ale również małym kosztem. Zakres zastosowania płatwi kratowych rozpoczyna się od 9 m wzwyż. Optymalnym rozstawem jest ok. 2,5 m. Zmiana stref klimatycznych przy badanych długościach praktycznie nie miała wpływu na zużycie stali i kosztu.
5. Przekrycie płatwiowe jest mniej korzystne od bezpłatwiowego i zwiększa koszty całości konstrukcji o ok 15%.
6. Istotny wpływ na rodzaj blachy trapezowej pokrycia ma rozstaw płatwi w przypadku przekryć płatwiowych lub dźwigarów w przypadku przekryć bezpłatwiowych, a znacznie mniejszy strefa obciążeń klimatycznych. Zmiana strefy wiatrowej nie ma praktycznie żadnego znaczenia, a zmiana strefy śniegowej ingeruje w rodzaj blachy w typoszeręgu w przypadku dachów bezpłatwiowych przy długościach powyżej 7,5 m.
7. Lokalizacja obiektu, a dokładniej obciążenia spowodowane oddziaływaniami atmosferycznym mogą zwiększyć koszt o około 6%.
8. Na podstawie analiz prowadzonych w pracy i w ramach przyjętych założeń, stwierdzono, że najoptymalniejszą konstrukcją jest przekrycie bezpłatwiowe, w którym stosuje się dźwigar ze skratowaniem typu V ze słupkami, o długości 24 metrów, w rozstawie między układami nośnymi 6 m.
Przekrycie należy oprzeć na słupach żelbetowych.

Literatura • References

- [1] PN-EN 1990, Eurokod: *Podstawy projektowania konstrukcji*
- [2] PN-EN 1992, Eurokod 2, *Projektowanie konstrukcji z betonu*
- [3] PN-EN 1993, Eurokod 3, *Projektowanie konstrukcji stalowych*
- [4] Krzyśpiak T. (1976), *Konstrukcje stalowe hal, Arkady*, Warszawa
- [5] Pawlak Z. (2008), *Ekonomiczna rozpiętość nawy hali stalowej*. Nowoczesne Hale, 1/2008, Elamed, str. 16-18
- [6] Pawlak Z. (2011), *Optymalizacja konstrukcji hal wielkopowierzchniowych*. Nowoczesne Hale, 1/2011, Elamed, str. 26-28
- [7] Buick D., Owens G.W (Ed (2003)), *Steel Designer's Manual*, The Steel Construction Institute, Blackwall Publishing, 6th Edition
- [8] Malik Ł., (2014), *Optymalizacja przekrycia hali betonowo-stalowej*. Praca inżynierska, Wydział Budownictwa i Architektury Politechniki Świętokrzyskiej, Promotor Leszek Chodor, Wydawnictwo Π Press, Kielce

5. Conclusions

On the basis of presented analyses in this paper, following conclusions can be derived:

1. The use of concrete columns is a significantly more favorable than the use of steel columns. The cost of concrete column is three times less than steel. Reducing the total cost of construction of the hall reaches 30%.
2. The most optimal type of latticework for truss girders in the field length from 21 to 24 m is a type V with vertical bars, but in the case of larger spans V-type without the vertical. Type of latticework increases the price of the object construction from 5% upwards.
3. Consumption of steel purlins significantly depends on the span and spacing, and it depends less on the snow zone. Weight, and the cost of IPE purlins exceed significantly the cost of cold-rolled purlins and lattice even after taking into account the cost of labor and production costs.
4. In the case of cold-rolled purlins the application is limited to length of 9.0 m and the spacing of 1.5 m. The optimal way to use them is for length of 6.0 m and spacing of 3.0 m. In these areas they are characterized by not only small weight but also lower cost. The scope of lattice purlins application starts from 9.0 and more. The optimal spacing is 2.5 m. The change of climate zones at the verified lengths practically does not affect the steel consumption and the costs.
5. The purlins covering is less profitable than non-purlins covering, and increases cost of construction by 15%.
6. Spacing of purlins has a significant impact on the type of trapezoidal sheet in the case of purlin covering (spacing of girders in the case of non-purlins covering), climate-load zone has smaller influence. Change of the wind-zone has no special meaning, but change of the snow-zone affects the type of trapezoidal sheet in the family of shapes in the case of non-purlin roofs by the lengths above 7,5 m.
7. Location of object, and specifically the whether factors may increase cost about 6%.
8. On the basis of analyses performed in this paper and fixed assumptions, it was concluded that the most optimal construction is non-purlins covering made of V type girder with vertical bars and the length of 24 m, the spacing between bearing systems amounts to 6.0 m.
The covering should be based on reinforced concrete columns.