

W ramach realizowanego przez miesięcznik „Builder” programu „Wspieramy młodych inżynierów budownictwa” dajemy możliwość pierwszych publikacji naukowych młodym doktorantom.

**Łukasz Radzik**  
Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego,  
Politechnika Wroclawska

Wśród systemów konstrukcyjnych używanych do przekryć powierzchni o znacznych rozpiętościach kratownice przestrzenne wyróżniają się lekkością konstrukcji. Wynika to między innymi z faktu przenoszenia obciążenia w elementach takiej konstrukcji poprzez siłę osiową, co prowadzi do równomiernego wykorzystania materiału w przekroju elementu [1]. Aby wykorzystać powyższą zaletę, należy poprawnie ukształtować konstrukcję. Zasady kształtowania ustrojów o pasach płaskich można znaleźć między innymi w [2]. Jednak w przypadku kształtowania ustroju przestrzennego powyższe zalecenia przestają być skuteczne [1]. Aby ukształtować ustrój racjonalnie, należy wykonać jego optymalizację, która wymaga przeprowadzenia obliczeń wielu wariantów geometrii konstrukcji. Zmiana złożonej geometrii układu przekrycia strukturalnego w programach obliczeniowych może być kłopotliwa. Technologia BIM (ang. *Building Information Modelling* – Modelowanie Informacji o Budynku) pozwala znacznie uprościć zadanie, wykorzystując wymianę informacji pomiędzy programami do modelowania konstrukcji i obliczeniowymi oraz obiektowe modelowanie parametryczne, pozwalające na kształtowanie złożonej geometrii, do której przypisane są informacje znaczeniowe [3] (np. koszt, parametry wytrzymałościowe materiału, parametry modelu analitycznego itp.). Zmiana geometrii może odbyć się poprzez zmianę wartości tekstowej ustalonego wcześniej parametru [4]. Zagadnienia te zostaną przedstawione dalej.

### Model kratownicy przestrzennej

Rozpatrywana kratownica przestrzenna ma wymiary 30 x 30 m. Pręty warstw ustawione są w kierunkach ortogonalnych (o siatce typu

# BIM W PROJEKTOWANIU KONSTRUKCJI

optymalizacja kratownicy przestrzennej

Dzięki wykorzystaniu parametrycznego modelowania obiektowego, na którym opiera się technologia BIM, możliwe było sprawne wykonanie obliczeń dla wielu wariantów konstrukcji kratownicy przestrzennej.

O-O). Podparta jest w węzłach obwodowych w sposób pozwalający na swobodę odkształceń (rys. 1.). Obciążenie przyłożone jest do węzłów górnych kratownicy. Poza ciężarem własnym kratownica została obciążona ciężarem paneli dachowych oraz ciężarem śniegu. Obciążenie wiatrem zostało w obliczeniach pominięte.

### Parametryzacja modelu

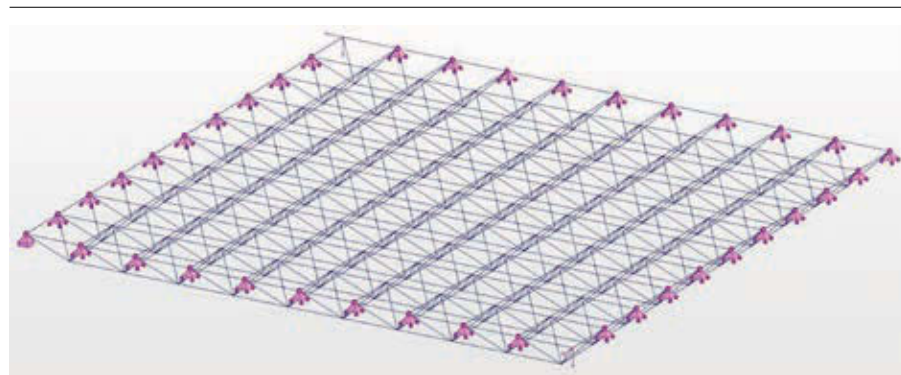
Geometria układu została zaprojektowana za pomocą programu Dynamo Studio [5], w którym zostały nadane parametry materiałowe, wstępne przekroje prętów, warunki podparcia oraz obciążenia. W programie sparametryzowana została geometria układu. Nadano następujące parametry optymalizujące:

- rozstaw warstw kratownicy – ustalano kolejno 1 m, 1,2 m, 1,4 m, 1,6 m (rys. 2.),
- ilość pól kratownicy – ustalano kolejno 10 x 10, 15 x 15, 20 x 20, 25 x 25 (rys. 3.),
- wyniesienie środkowego punktu kratownicy – ustalano kolejno 0 m, 2 m, 4 m, 6 m (rys. 4.).

Zaplanowano wykorzystanie pełnej kombinacji parametrów, a więc otrzymano 64 warianty geometrii konstrukcji. Wyniesienie środkowego punktu kratownicy zostało zrealizowane poprzez ukształtowanie górnej powierzchni kratownicy metodą przeciągania przez 3 krzywe, z czego 2 skrajne krzywe były odcinkami prostymi, natomiast środkowa krzywa – łukiem o określonej strzałce wygięcia (0, 2, 4 lub 6 metrów). Efekt takiego modelowania zilustrowany jest na rysunku 4. Po każdej zmianie geometrii modelu przeliczane były obciążenia wynikające z ciężaru przekrycia kratownicy panelami dachowymi oraz obciążenia śniegiem.

### Wymiana informacji pomiędzy programami

W technologii BIM informacje mogą być przesyłane pomiędzy programami za pomocą formatu wymiany plików IFC (ang. *Industrial Foundation Classes*), formatów natywnych aplikacji lub za pomocą API programów (ang. *Application Programming Interface*) [3].



Rys. 1. Warunki podparcia kratownicy przestrzennej  
Fig. 1. Condition of space frame support

W tym przypadku wykorzystano API programu Robot Structural Analysis. Model został przesłany z programu Dynamo Studio do programu Robot Structural Analysis. Podczas zmiany geometrii, obciążeń lub innych charakterystyk w programie Dynamo Studio model jest na bieżąco aktualizowany w programie Robot Structural Analysis bez straty informacji wprowadzonych w nim bezpośrednio.

## Praca w programie Robot Structural Analysis

W programie Robot Structural Analysis zostały stworzone kombinacje obciążeń oraz zostały nadane charakterystyki wybożeniowe prętów. Po aktualizacji modelu z programu Dynamo Studio informacje te nie wymagają ponownego wprowadzania. Pręty na potrzeby optymalizacji przekroju zostały podzielone na 3 grupy – warstwa górna, pręty międzywarstwowe oraz warstwa dolna (rys. 5.).

Zostały wykonane obliczenia statyczne oraz wymiarowanie, a następnie zostały dobrane pręty optymalne dla każdej z grup. Przekroje były dobierane z rodziny rur okrągłych katalogu profili „Polska 2007”. Po każdej zmianie przekroju w grupie zmieniał się ciężar własny konstrukcji oraz stosunek sztywności względnej prętów, co w układzie statycznie niewyznaczalnym, jakim jest optymalizowana kratownica przestrzenna, wpływało również na zmianę wartości sił wewnętrznych. Obliczenia prowadzono więc iteracyjnie. Gdy przekroje po kolejnej optymalizacji nie uległy zmianie (co oznaczało, że został określony dla każdej z grup przekrój optymalny), wyniki obliczeń zapisywano i wykonywano kolejne obliczenia dla zmienionych parametrów optymalizujących. Przedstawiony schemat postępowania zobrażowany został na rysunku 6.

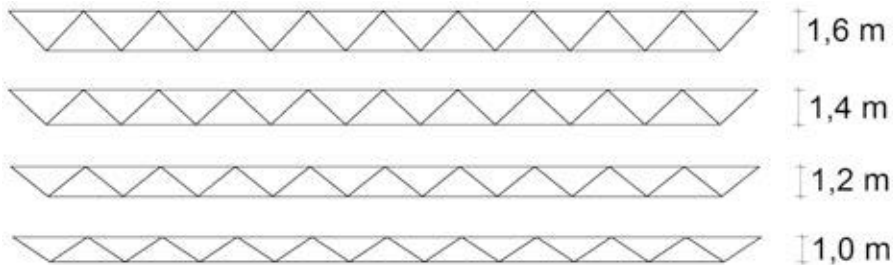
Dzięki wykorzystaniu technologii BIM możliwa była aktualizacja modelu w programie obliczeniowym po każdorazowej zmianie parametrów optymalizujących w programie Dynamo Studio. Kolejną zaletą takiego postępowania jest możliwość przesłania modelu do większości programów BIM-owskich, np. w celu sporządzenia dokumentacji budowlanej, harmonogramu budowy, kosztorysu itd. [3], [6], [7].

## Wyniki obliczeń optymalizacyjnych

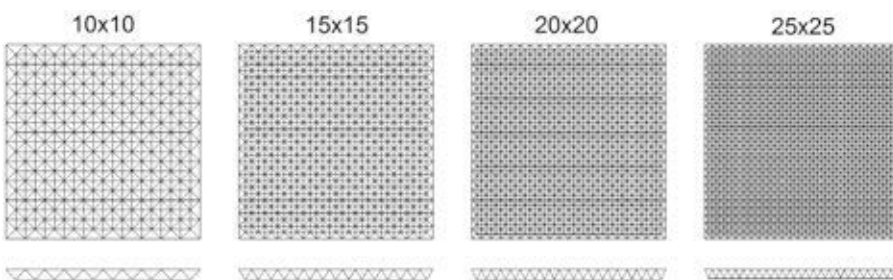
Dla każdego kroku optymalizacji został zapisany m.in. ciężar własny konstrukcji. Ze względu na „trójwymiarowość” optymalizacji przedstawiono jej wyniki na bąbelkowym wykresie 3D (rys. 7.). Widzimy na nim kule, których wielkość odpowiada ciężarowi własnemu konstrukcji. Każda z kul, poprzez lokalizację na wykresie, jest przypisana do określonej wartości parametrów.

## Analiza wyników

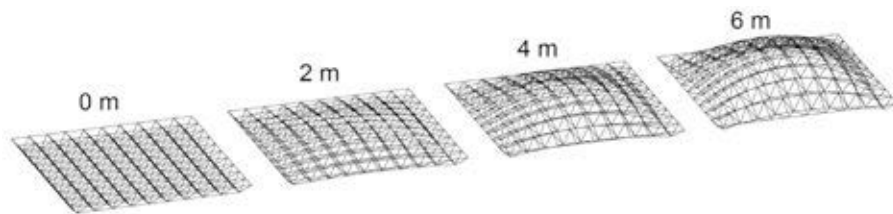
Z przeprowadzonych obliczeń wynika, że dla rozpatrywanej kratownicy przestrzennej najbardziej optymalnym wariantem pod względem ciężaru własnego w zadanym zestawie parametrów będzie poniższy wariant:



Rys. 2. Warianty rozstawu warstw kratownicy  
Fig. 2. Variants of a distance between grid layers



Rys. 3. Warianty ilości pól kratownicy  
Fig. 3. Number of space frame fields variants



Rys. 4. Warianty wyniesienia punktu środkowego kratownicy  
Fig. 4. Variants of elevation of the grid's center point



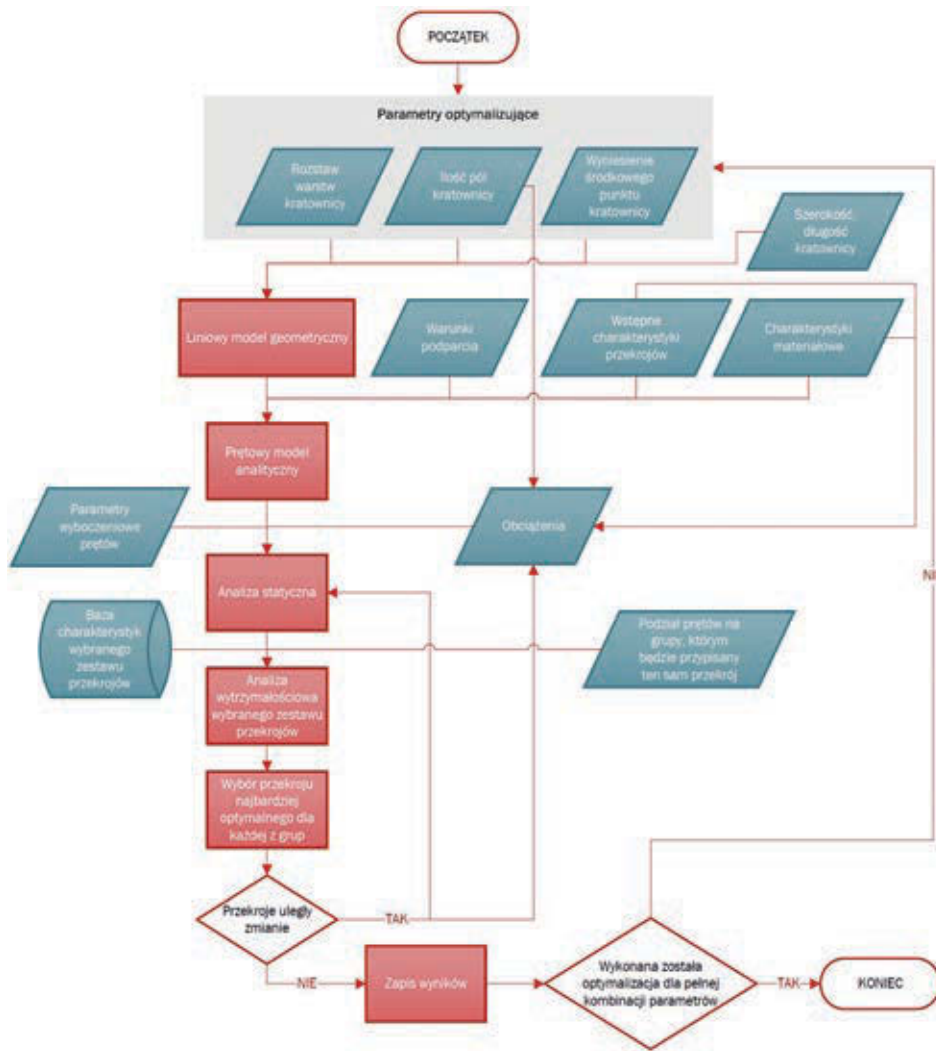
Rys. 5. Podział prętów na grupy  
Fig. 5. The division of the rods to the group

- rozstaw warstw kratownicy – 1,6 m,
- ilość pól kratownicy – 10 x 10,
- wyniesienie środkowego punktu kratownicy – 4 m.

Dla odniesienia środkowego punktu równego 0 m odzwierciedlenie w wynikach znajduje zalecenie literaturowe dotyczące smukłości przekrycia: „Przy średnich rozpiętościach nie należy stosować przekryć dachowych o smukłości

większej niż 20” [2], jednak dla pozostałych wartości powyższego parametru (2 m, 4 m, 6 m) wspomniane zalecenie nie ma większego wpływu na wyniki.

Ciężar rozpatrywanej kratownicy dla ustalonych parametrów geometrycznych cechuje się dużą rozpiętością wartości, co świadczy o dużym wpływie przyjętych parametrów na zużycie materiału.



Rys. 6. Proponowany schemat postępowania dla optymalizacji rozpatrywanej konstrukcji  
Fig. 6. The proposed workflow for optimizing the designed structure

## Podsumowanie i wnioski

W artykule zobrazowana została analiza wielowariantowa kratownicy przestrzennej z wykorzystaniem technologii BIM. Dzięki wykorzystaniu parametrycznego modelowania obiektowego, na którym opiera się technologia BIM, możliwe było sprawne wykonanie obliczeń dla wielu wariantów konstrukcji. Zaproponowano schemat postępowania dla optymalizacji tego typu konstrukcji oraz wykonano na jego podstawie obliczenia optymalizacyjne, pozwalające na wybór najbardziej optymalnego wariantu pod względem ciężaru własnego ustroju. Zauważono również, że w przypadku wyniesienia środkowego punktu konstrukcji jej smukłość nie ma tak dużego wpływu na wyniki, jak w przypadku braku takiego wyniesienia. Duża rozbieżność wyników sugeruje, że dla konstrukcji przestrzennej należy wykonywać obliczenia optymalizacyjne.

## Bibliografia

- [1] G. S. Ramaswamy, M. Eekhout: Analysis, Design and Construction of Steel Space Frames. Thomas Telford, 2002.
- [2] M. Łubiński, W. Zóitowski: Konstrukcje metalowe, Część II, Obiekty budowlane, II. Warszawa: Arkady, 2008.
- [3] C. Eastman, C. M. Eastman, P. Teicholz, R. Sacks: BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Managers, Designers, Engineers and Contractors. John Wiley & Sons, 2011.
- [4] D. Bryde, M. Broquetas, J. M. Volm: The project benefits of Building Information Modelling (BIM) Int. J. Proj. Manag., vol. 31, no. 7, pp. 971–980, październik 2013.
- [5] Dynamo Studio | Computational BIM Design | Autodesk [online]. Available: <http://www.autodesk.com/products/dynamo-studio/overview>. [Accessed: 15-Jan-2017].
- [6] Z. Hu, J. Zhang: BIM- and 4D-based integrated solution of analysis and management for conflicts and structural safety problems during construction: 2. Development and site trias, Autom. Constr., vol. 20, no. 2, pp. 167–180, Mar. 2011.
- [7] R. Eadie, M. Browne, H. Odeyinka, C. McKeown, S. McNiff: BIM implementation throughout the UK construction project lifecycle: An analysis, Autom. Constr., vol. 36, pp. 145–151, grudzień 2013.
- [8] A. Biegus: Stalowe budynki halowe. Arkady, 2010.
- [9] J. Bródka: Przekrycia strukturalne. Arkady, 1985.

## Streszczenie.

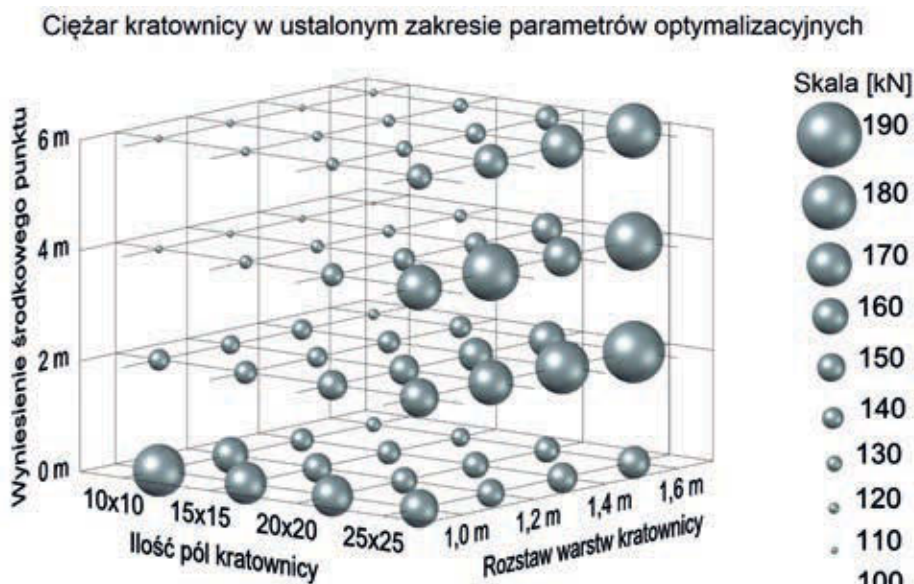
W artykule zostało przedstawione wykorzystanie technologii BIM przy optymalizacji kratownicy przestrzennej. Została zobrazowana analiza wielowariantowa kratownicy dla ustalonych wartości parametrów geometrycznych oraz zaproponowano schemat postępowania przy optymalizacji tego typu konstrukcji. Na podstawie przeprowadzonych obliczeń wyciągnięto wnioski dotyczące zaleceń odnośnie do kształtowania kratownic przestrzennych oraz wrażliwości wyników wobec wartości przyjętych parametrów.

Słowa kluczowe: kratownica przestrzenna, BIM, optymalizacja

## Abstract. MULTIVARIATE ANALYSIS OF SPACE FRAME USING BIM TECHNOLOGY

The article shows the use of BIM technology in the optimization of space frame. Multivariate analysis of structure for fixed values of geometrical parameters was illustrated. Worklow for optimizing this type of construction was proposed. Conducted calculations shown some recommendations for the shape of space frame forming.

Keywords: Space Frame, BIM, optimization



Rys. 7. Wykres ciężaru kratownicy w ustalonym zakresie parametrów optymalizacyjnych  
Fig. 7. A graph of space frame self weight in a fixed range of the parameters to optimize