

Metody numeryczne w modelowaniu struktur przestrzennych

Kształtowanie systemów konstrukcyjnych budynków wysokich

Numerical methods in modeling of space structures. Shaping of structural systems of tall buildings

Janusz Rębielak

WA Politechnika Krakowska

Słowa kluczowe: budynki wysokie, struktury przestrzenne, modelowanie, metody numeryczne

Keywords: tall buildings, space structures, modeling, numerical methods

Streszczenie

Od kilku lat modele numeryczne i język programowania Formian zyskują coraz większą popularność wśród architektów. Formian to język, który pozwala na łatwe projektowanie form przez generowanie numerycznych modeli powierzchniowych, nawet złożonej geometrii. Formułę konstrukcyjną struktur przestrzennych cechuje znaczny potencjał rozwojowy i dlatego już od dawna była ona stosowana przez autora w procesach kształtowania głównych systemów nośnych budynków wysokich. Przedstawiane są dwa różne systemy konstrukcyjne opracowane przez autora, a dotyczące konstrukcji naziemnej i jej posadowienia. Chodzi tu zwłaszcza o fundament zespolony. Cechy strukturalne fundamentu zespolonego bowiem umożliwiają jego zastosowanie w przypadku, gdy niemożliwe jest wykonanie nawet płytkich wykopów bezpośrednio pod budynkiem.

Ten innowacyjny system ma cechy przełomowego w skali światowej rozwiązania technicznego, co jednak może być potwierdzone po przeprowadzeniu wnikliwych analiz statycznych i dynamicznych oraz badań modelowych, a nade wszystko sprawdzenia założeń w wyniku jego zastosowań praktycznych. Przedstawiony zespolony system fundamentu oraz budynku wysokiego został opracowany przez autora w wyniku przekształceń strukturalnych jego wcześniejszego rozwiązania technicznego dotyczącego tego zakresu tematycznego. Wizualizacje wszystkich prezentowanych budynków zostały wykonane na podstawie modeli numerycznych zdefiniowanych w języku programowania Formian.

Abstract

The article presents examples of the results of numerical model applications defined in the programming language Formian in the shaping processes of structural systems of tall buildings. These models are prepared by means an assumed set of parameters, thanks to which shapes of the designed buildings can be quickly modified and adapted to the current requirements, what makes the co-operation between architects and engineers easier. Selected examples of buildings designed by means of two different structural systems proposed by the author have been presented. These exemplary buildings are located in the southern part of Wrocław. One of them is a system of framed polyhedron and it has been developed more than two decades ago. The combined structural system of tall building was invented only recently and it is considered to be the groundbreaking technical invention, which makes possible the safe foundation of heavily loaded objects possible on the ground of very low load bearing capacity. It can be especially useful for buildings located in earthquake areas. Inspiration from nature and from theory of structures play important role in the shaping process. Buildings designed using the proposed structural systems can obtain interesting and unique architectural forms.

Od kilku lat modele numeryczne i język programowania Formian zyskują coraz większą popularność wśród architektów. Formian to język, który pozwala na łatwe projektowanie form przez generowanie numerycznych modeli powierzchniowych, nawet złożonej geometrii. Znajduje on najlepsze zastosowanie w projektowaniu struktur prętowych, choć nie tylko. Istotną cechą modeli numerycznych napisanych w tym języku programowania jest możliwość zastosowania parametrów opisujących zasadniczą geometrię struktury (np. wysokość, szerokość, strzałkę ugięcia, liczbę podziałów). Występują one później wielokrotnie w definicji modelu numerycznego. Optymalizacja, bądź dostosowywanie projektowanej geometrii struktury do nowych warunków, polega na zmianie wartości tychże parametrów. W numerze AV 4/2012 przedstawione zostało zastosowanie modeli numerycznych w kształtowaniu prętowych przekryć dachowych definiowanych w języku programowania Formian¹.

¹ Patrz: J. Rębielak, *Metody numeryczne w modelowaniu struktur przestrzennych. Formy przekryć dachowych*, Archivolta, nr 4, 2012, s. 64-71.

Obecnie przedstawia się są wyniki zastosowania podobnych procedur odnośnie wybranych postaci systemów konstrukcyjnych opracowanych przez autora i proponowanych dla budynków wysokich łącznie ze strukturami ich posadowienia. Istotną rolę w procesach projektowych pełniły inspiracje tworam natury oraz wnioski pochodzące z podstawowych praw mechaniki budowli czy też teorii konstrukcji.

Forma architektoniczna oraz rodzaje systemów konstrukcyjnych budynków wysokich podlegały szybkiej ewolucji szczególnie od czasu pożaru Chicago w 1871. Ówczesna tendencja do wznoszenia obiektów o coraz większej liczbie kondygnacji na niewielkiej i zwykle bardzo drogiej śródmiejskiej działce budowlanej była racjonalnie uzasadniona czynnikami ekonomicznymi². Wbrew obawom wyrażanym bezpośrednio po zawaleniu się we wrześniu 2001 wież WTC w Nowym Jorku nie nastąpił regres lecz wręcz odwrotnie obserwujemy teraz niezwykle szybki rozwój budownictwa zwanego wysokościami szczególnie odnośnie budynków najwyższych³. Wiele przesłanek uzasadnia przypuszczenie, że obecnie główną przyczyną ich powstawania jest prezentacja potęgi finansowej inwestorów oraz dążenie do spektakularnej manifestacji znaczącej pozycji gospodarczej osiągniętej ostatnio przez metropolie państw świata rozwijających się teraz najszybciej. Przesłanki wynikające ze zmian ekonomicznych, ekologicznych czy też demograficznych uzasadniają jednak potrzebę prowadzenia prac projektowych dotyczących przyszłościowych form megastruktur mieszkaniowych o szerokim programie funkcjonalnym. Budynek bardzo wysoki ze względu na swe wymiary geometryczne i przez to olbrzymią zwykle kubaturę ma niezmiernie zróżnicowany program funkcjonalny, dla którego prawidłowego spełnienia konieczna jest również niezwykle złożona infrastruktura techniczna samego budynku jak i jego bliższego oraz dalszego otoczenia. Taki obiekt jest często określany mianem „miasta w mieście”. Tendencja do wznoszenia budynków o coraz większej wysokości bezwzględnej prowadzi do opracowywania nowych rodzajów systemów konstrukcyjnych umożliwiających ich pewne i bezpieczne funkcjonowanie nawet na terenach aktywnych sejsmicznie. W drugiej połowie XX wieku dominowały systemy konstrukcyjne w różnych formach powłok ramowych wykonywanych najczęściej jako konstrukcje stalowe. Wymogi bezpieczeństwa przeciwpożarowego oraz znaczący wzrost wytrzymałości nowych gatunków betonów sprawiły, że począwszy od ostatniej dekady minionego wieku obiekty aktualnie najwyższe są projektowane i realizowane głównie w technologii żelbetowej⁴.

Formułę konstrukcyjną struktur przestrzennych cechuje znaczny potencjał rozwojowy i dlatego już od dawna była ona stosowana przez autora w procesach kształtowania głównych systemów nośnych budynków wysokich⁵. Wymukłe formy wybranych modułów w postaci odpowiednich wielościanów były podstawą w procesie kształtowania systemu konstrukcyjnego nazwanego wielościanem ramowym, który był proponowany przez autora od połowy lat 90. ubiegłego stulecia jako bardzo sztywna i wydajna ekonomicznie konstrukcja budynków wysokich⁶. Trójkątna siatka prętów o odpowiednio dobranej gęstości podziału znajduje się na każdej ścianie bocznej wydłużonego wielościanu przyjętego jako bryła podstawowa budynku. Wysokość pojedynczego pola trójkątnego tej siatki może być równa wysokości jednej lub zestawu kilku kondygnacji typowych. Forma podstawowa może być rozbudowywana zgodnie z formułą konstrukcyjną systemu wielościanu ramowego. Tą rozbudowaną

² Por. R. M. Kowalczyk, R. Sim, M. B. Kilmister (red.), *Structural systems for tall buildings*, Council on Tall Buildings and Urban Habitat, McGraw-Hill, New York 1993.

³ Por. M. M. Ali, K. S. Moon, *Structural development in tall buildings: current trends and future prospects*, *Architectural Science Review*, Vol. 50, No 3, 2007, 205-223.

⁴ Więcej patrz: C. H. Thornton, R. L. Tomasetti i inni., *The world tallest building – The Miglin Beitler Tower, Chicago, Illinois*, *Proceedings of the IV-th World Congress of Tall Buildings*, Hong Kong 1990, a także: R. Robinson, *Malaysia's Twins: High-rise, High Strength*, *Civil Engineering*, nr 7, 1994, 63 -65 oraz H. Markowski, K. Szulborski, *Najwyższy budynek świata w Dubaju*, *Inżynieria i Budownictwo*, nr 4, 2010, 207-209.

⁵ Patrz: J. Rębielak, *Space structures used in the construction of large span roofs and tall buildings*, w: *Space Structures 4*, *Proceedings of the Fourth International Conference on Space Structures*, 1993, Vol. 2, Thomas Telford, London 1993, 1581-1590.

⁶ Por. J. Rębielak, *Some proposals of space structures shaping*, *Proceedings of the International Colloquium: Structural Morphology - Towards the New Millennium*, University of Nottingham 1997, 144-151, także patrz: Rębielak J., *Some proposals of structural systems for long span roofs and high-rise buildings*, *Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures*, Vol. 40, nr 1, 1999, 65-75.

formę, pokazaną także na rysunku powyżej, przyjęto jako postać głównego budynku wysokiego w autorskiej koncepcji zagospodarowania przestrzeni w południowej dzielnicy Wrocławia po wyburzeniu biurowca firmy *Poltegor* znajdującego się u zbiegu ulic Powstańców Śląskich i Wielkiej. Dzięki zastosowaniu tego efektywnego systemu konstrukcyjnego cały zespół obiektów może uzyskać unikatową i interesującą formę architektoniczną. Obszar opracowania został podzielony na dwie części: wschodnią oraz zachodnią. W części wschodniej, tzw. biurowo-kongresowej przylegającej do ul. Powstańców Śląskich, przewidziano lokalizację budynku wysokiego oraz zespołu obiektów Centrum Kongresowego. Budynek główny liczy 47 kondygnacji nadziemnych, których typowa wysokość jest równa 4,20 m, oraz trzy kondygnacje podziemne, każda o wysokości 3,60 m. Na poziomie parteru przestrzeń foyer ma wysokość równą dwóm kondygnacjom typowym. Podstawa budynku na poziomie terenu (+/- 0,00 m) ma wymiary w osiach 48,00 m x 48,00 m. Dach najwyższej kondygnacji typowej znajduje się na wysokości około 203,00 metrów. Część zachodnią całego kompleksu, przylegającą do ul. Gwiazdzistej, przeznaczono na funkcje mieszkalno-usługowe.

Konstrukcja budynku wysokiego powinna odznaczać się jednocześnie dwiema przeciwstawnymi cechami, co oznacza że będąc odpowiednio sztywną powinna wykazywać się stosowną podatnością na odkształcenia pod wpływem głównie obciążenia wiatrem. Takie cechy wykazują nade wszystko struktury biologiczne, których dobrym przykładem jest budowa pewnych gatunków drzew liściastych, gdzie jednak warunek znacznego ograniczenia przemieszczeń poziomych ich szczytów nie ma praktycznie większego znaczenia. Budynek wysoki jako obiekt silnie obciążony wymaga zastosowania odpowiedniego rodzaju fundamentu⁷. Jeśli ma być on wzniesiony na gruncie o niewielkiej nośności lub na terenie aktywnym sejsmicznie, to stopień złożoności zadań projektowych jest bardzo wysoki⁸.

Proponowany zespolony system fundamentu oraz budynku wysokiego został opracowany przez autora w wyniku przekształceń strukturalnych jego wcześniejszego rozwiązania technicznego dotyczącego tego zakresu tematycznego⁹. Impulsem do zaprojektowania ostatecznej postaci rozwiązania technicznego były wnioski pochodzące z analizy zniszczeń konstrukcji budynków spowodowane trzęsieniem ziemi na Haiti w styczniu 2010. Inspiracjami w procesie kształtowania były m.in. trajektorie naprężeń głównych w belce wolno podpartej oraz postać powierzchniowo rozłożystego systemu korzeniowego jednego z gatunków drzew o nazwie *ficus microcarpa*. Zasada konstrukcyjna proponowanego systemu polega na rozłożeniu obciążeń pionowych na możliwie jak największą powierzchnię podstawy fundamentu. Dzięki temu przemieszczenia gruntu mogące powstać nawet na znacznej części powierzchni podstawy w wyniku np. zjawisk sejsmicznych będą mieć stosunkowo niewielki wpływ na wzrost wartości naprężeń w gruncie pod fundamentem, a struktura nośna powinna zapewnić także wymaganą stabilność całej budowli. Obciążenia są przekazywane do systemu elementów pośrednich, Rys. 8, złożonego z dwóch podsystemów np. umieszczonych ściśle w wąskiej przestrzeni pomiędzy dwiema równoległymi do siebie belkami żelbetowymi (1) i spoczywającymi na wspólnej płycie podstawy. Pionowe obciążenia są przekazywane na materię fundamentu za pomocą krótkiego pręta AB umieszczonego pomiędzy np. dwiema belkami (1) precyzyjnie w pionowych prowadnicach i mającego teoretyczną możliwość przesunięcia jedynie w kierunku pionowym oraz. Węzły główne systemu elementów pośrednich są rozmieszczone równomiernie wzdłuż osi obojętnej belek. Jeśli układy tych dwóch podsystemów są symetryczne względem tej osi to w węzłach skrajnych wystąpią jedynie reakcje pionowe, w tym przypadku skierowane jednak w dół. W celu stabilizacji tej

⁷ Więcej patrz: K. Biernatowski, *Fundamentowanie*, PWN, Warszawa 1984, także: Z. Witun, *Zarys geotechniki*, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa, 1987 oraz A. J. Ledwoń, *Budownictwo na terenach szkód górniczych*, Arkady, Warszawa 1983.

⁸ Patrz: J. Moehle, Y. Bozorgnia i inni, *Case studies of the seismic performance of tall buildings designed by alternative means*, Report for the Tall Buildings Initiative, PEER Report 5, 2011, Pacific Earthquake Engineering Research Center, College of Engineering, University of California, Berkeley, CSSC Report 11-02, także: K. Matso, *Lessons from Kobe*, Civil Engineering, nr 4, 1995, 42-47 oraz G. C. Har, S.C. Huang, R. H. Lobo, A. Jain, M. Van Winkle, *Earthquake response of strengthened steel special moment resisting frames*, The Structural Design of Tall Buildings 6 (1), 1997, 37-58; M-S. Sheu, J-H. Jong, C-C. Chang, C-H. Chou, L-C. Ting, *Design and failure of high-rise building structures in Taiwan*, Proceedings of IASS-APCS International Symposium on New Perspectives for Shell and Spatial Structures, Taipei, Taiwan 2003, 8-9.

⁹ J. Rębielak, *Fundament zespolony*, Politechnika Wrocławska, Polska, Patent Nr 149760, zgł. poat. nr P – 265885/1987/1990.

części należy uformować tam rodzaj czerpaka, którego dolna płyta będzie obciążona gruntem usytuowanym w tzw. klinie odłamu, Rys. 8d. Pokazany na tym rysunku kratownicowy układ elementów pośrednich jest preferowanym dla takich celów. Należy zaznaczyć, iż w takich przypadkach węzeł typu C nie może być połączony z materią belek głównych, które mogą utworzyć rodzaj kasetonów stanowiących powtarzalne jednostki fundamentu, a węzły typu C muszą znajdować się w narożnych strefach ich łączenia. Powierzchnia proponowanej postaci fundamentu zespolonego może być zatem teoretycznie nieograniczona. Jeśli w nadziemnej strukturze obiektu będzie zastosowany odpowiedni rodzaj pionowo usytuowanego dźwigara soczewkowego i będzie ona oparta na proponowanym fundamencie, to układ taki określa się mianem zespolonego systemu konstrukcyjnego budynku wysokiego¹⁰. Stabilność końcówek fundamentu może być zwiększona poprzez rozmieszczenie dodatkowych pali kotwiących (Pk) bezpośrednio poniżej węzłów skrajnych.

W przestrzeni fundamentu może się znajdować kilka kondygnacji, a sam fundament niekoniecznie musi być zagłębiony lecz może być umieszczony niemal bezpośrednio na powierzchni gruntu. Z analizy schematu przekroju poprzecznego (por. rysunki powyżej) wynika, iż ten system nośny posiada sam w sobie cechy konstrukcyjne umożliwiające skuteczne tłumienie drgań spowodowanych obciążeniami dynamicznymi. Zdolność ta może zostać znacząco zwiększona przez rozmieszczenie w wybranych elementach tego układu konstrukcyjnego zestawu siłowników hydraulicznych sterowanych numerycznie oraz poziome odseparowanie podłoża od materii fundamentu zespolonego.

Część nadziemna budynku wysokiego może zatem opierać się na takiej „pełnej” formie systemu fundamentu zespolonego, bądź na kształcie fundamentu pokazanym na powyższym rysunku. Cechy strukturalne fundamentu zespolonego umożliwiają jego zastosowanie w przypadku, gdy niemożliwe jest wykonanie nawet płytkich wykopów bezpośrednio pod budynkiem i trzeba sięgnąć do gruntu o wystarczającej nośności znajdującego się poza obrysem podstawy budynku. Proponowany system fundamentu zespolonego, dzięki zastosowaniu odpowiednich jego form oraz typów wspomnianych siłowników hydraulicznych, może również posłużyć do wyprostowania obiektów istniejących i niebezpiecznie już pochylonych. Ten innowacyjny system ma cechy przełomowego w skali światowej rozwiązania technicznego, co jednak może być potwierdzone po przeprowadzeniu wnikliwych analiz statycznych i dynamicznych oraz badań modelowych, a nade wszystko sprawdzenia założeń w wyniku jego zastosowań praktycznych.

Modularne kasetony tego systemu mogą być rozłożone na dużej powierzchni stanowiąc podstawę dla megastruktur budowlanych, których przykładową postać pokazano na rysunku powyżej. W podobnej konwencji opracowano projekt kompleksu o nazwie *GeoDome Sky Towers*, który został przygotowany na konkurs architektoniczny *eVolo 2012 Skyscraper Competition*¹¹. Jest on umiejscowiony w obszarze miejskim Wrocławia takim samym jak zespół budynków pokazany na rysunku. Tworzy go głównie zespół czterech oddzielnych prostopadłościennych budynków wieżowych zawierających 80 kondygnacji typowych, każda o wysokości 4,50 m, a w ich przestrzeniach zaplanowano pomieszczenia o funkcjach głównie biurowych, usługowych i mieszkalnych. Pojedyncze budynki umieszczone są na planie kwadratu o boku równym 36,00 m na wspólnej szerokiej podstawie kwadratowej, zaprojektowanej w postaci systemu fundamentu zespolonego posadowionego niemal bezpośrednio na powierzchni gruntu, gdzie spód fundamentu znajduje się na głębokości ok. 0,50 m poniżej poziomu przylegającego terenu. Zawiera on trzy kondygnacje nadziemne, każda o wysokości 6,00 m, jego przestrzeń przeznaczona jest na cele usługowo-techniczne, a dach pokryto trawnikiem i zaprojektowano tam zielony ogród, który nie jest jednak powszechnie dostępny. Projektowany zespół budynków tworzących *GeoDome Sky Towers* osiąga wysokość całkowitą nieco powyżej 380 m.

¹⁰ Patrz: J. Rębielak, *Systemowy fundament zespolony*, Zgłoszenie patentowe, Urząd Patentowy RP, nr P.394745, 2011, także: J. Rębielak, *Combined form of structural system proposed for tall buildings*, Proceedings of IABSE-IASS Symposium, London, 20-23 September, 2011, 308 oraz J. Rębielak, *Budynek o zespolonej formie systemu konstrukcyjnego*, Czasopismo Techniczne PK 11/108, 2-A/2/2011, 303-308; J. Rębielak, *Koncepcja systemu konstrukcyjnego budynku wysokiego*, Inżynieria i budownictwo, nr 1, 2012, 45-51.

¹¹ Patrz: J. Rębielak, *Model numeryczny GeoDome Sky Towers*, XVI Międzynarodowa Szkoła Komputerowego Wspomagania Projektowania, Wytwarzania i Eksploatacji, WAT, Warszawa-Jurata, 14-18 maja 2012, artykuł opublikowany w „Mechanik”, nr 7, 604/CD 2012, 835, także: J. Rębielak, *System of combined foundation for tall buildings*, Journal of Civil Engineering and Architecture, nr 12, 2012, 562-569.

Cztery budynki wysokie są połączone ze sobą za pomocą dwóch rodzajów struktur przestrzennych. Pierwsza z nich ma postać łuków usytuowanych pionowo i biegnących od połowy wysokości wież do stosownie dobranych ich stref dolnych i górnych. W rzucie poziomym osie centralne tych łuków biegną wzdłuż przekątnych kwadratowej formy podstawy całego zespołu. Kształt tych łuków inspirowany jest trajektoriami naprężeń głównych w belkach. W ich wnętrzu zaplanowano przestrzenie rekreacyjne dostępne dla użytkowników całego kompleksu, gdzie zaproponowano urządzenie zespołu ogrodów zielonych z roślinnością pochodzącą z różnych, głównie tropikalnych stref klimatycznych. Struktura sferyczna o średnicy równej 100,00 m jest drugim rodzajem struktury łączącej te cztery budynki podstawowe, tym razem w połowie swych wysokości. Jest ona wykonana jako stalowa konstrukcja prętowa z pokryciem w postaci przezroczystych i półprzezroczystych paneli osłonowych. Struktura geodezyjna jest podparta w czterech węzłach znajdujących się w odpowiednich narożnikach tych budynków, a jej przestrzeń jest podzielona na dwie części główne. W górnej zaplanowano centrum rekreacyjne pod nazwą *Wyspy Tropikalnej* z dużymi basenami, piaszczystymi plażami oraz stosowną infrastrukturą. Podporą dla tego założenia jest potężna przestrzenna struktura prętowa o formie połówki ośmiościanu foremnego odwróconej swym wierzchołkiem w dół ze stosownymi podziałami pośrednimi. W przestrzeni tej struktury rozmieszczono liczne pomieszczenia usługowe i techniczne w postaci różnych wielkości sal konferencyjnych, widowiskowo-sportowych, kinowych i o innych przeznaczeniach funkcjonalnych.

Na podstawie przeglądu prezentowanych przykładów można ponownie stwierdzić, że dzięki stosowaniu podstawowych praw teorii konstrukcji obowiązujących w całym świecie przyrody można kształtować efektywne ekonomicznie rozwiązania konstrukcyjne umożliwiające nadanie projektowanym obiektom interesujących i unikalnych form architektonicznych. Projektowanie niekiedy bardzo złożonych form konstrukcji nośnych jest bardzo ułatwione dzięki zastosowaniu odpowiednich modeli numerycznych. Wizualizacje wszystkich prezentowanych budynków zostały wykonane na podstawie modeli numerycznych zdefiniowanych w języku programowania Formian w toku realizacji projektu badawczego nr NN527 2464 38 pt. „Metody numeryczne w projektowaniu nowoczesnych form architektonicznych struktur przestrzennych” kierowanego przez autora i finansowanego przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego oraz Narodowe Centrum Nauki.

BIBLIOGRAFIA

- [1] K. Biernatowski, *Fundamentowanie*, PWN, Warszawa 1984.
- [2] A. J. Ledwoń, *Budownictwo na terenach szkód górniczych*, Arkady, Warszawa 1983.
- [3] H. Markowski, K. Szulborski, *Najwyższy budynek świata w Dubaju*, Inżynieria i Budownictwo, nr 4, 2010, 207-209.
- [4] K. Matso, *Lessons from Kobe*, Civil Engineering, nr 4, 1995, 42-47.
- [5] J. Moehle, Y. Bozorgnia i inni, *Case studies of the seismic performance of tall buildings designed by alternative means*, Report for the Tall Buildings Initiative, PEER Report 5, 2011, Pacific Earthquake Engineering Research Center, College of Engineering, University of California, Berkeley, CSSC Report 11-02,
- [6] J. Rębielak, *Model numeryczny GeoDome Sky Towers*, XVI Międzynarodowa Szkoła Komputerowego Wspomagania Projektowania, Wytwarzania i Eksploatacji, WAT, Warszawa-Jurata, 14-18 maja 2012, także: także „Mechanik”, nr 7, 604/CD 2012, 835.
- [7] J. Rębielak, *Fundament zespolony*, Politechnika Wroclawska, Polska, Patent Nr 149760, zgł. poat. nr P – 265885/1987/1990.
- [8] J. Rębielak, *Some proposals of space structures shaping*, Proceedings of the International Colloquium: *Structural Morphology - Towards the New Millennium*, University of Nottingham 1997, 144-151.
- [9] J. Rębielak J., *Some proposals of structural systems for long span roofs and high-rise buildings*, Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures, Vol. 40, nr 1, 1999, 65-75.
- [10] J. Rębielak, *Budynek o zespolonej formie systemu konstrukcyjnego*, Czasopismo Techniczne PK 11/108, 2-A/2/2011, 303-308.
- [11] J. Rębielak, *Combined form of structural system proposed for tall buildings*, Proceedings of IABSE-IASS Symposium, London, 20-23 September, London 2011.
- [12] J. Rębielak, *Koncepcja systemu konstrukcyjnego budynku wysokiego*, Inżynieria i budownictwo, nr 1, 2012, 45-51.
- [13] J. Rębielak, *Metody numeryczne w modelowaniu struktur przestrzennych. Formy przekryć dachowych*, Archivolta, nr 4, 2012, s. 64-71.

- [14] R. Robinson, *Malaysia's Twins: High-rise, High Strength*, Civil Engineering, nr 7, 1994, 63 -65.
- [15] C. H. Thornton, R. L. Tomasetti i inni., *The world tallest building – The Miglin Beitler Tower, Chicago, Illinois*, Proceedings of the IV-th World Congress of Tall Buildings, Hong Kong 1990.
- [16] M-S. Sheu, J-H. Jong, C-C. Chang, C-H. Chou, L-C. Ting, *Design and failure of high-rise building structures in Taiwan*, Proceedings of IASS-APCS International Symposium on New Perspectives for Shell and Spatial Structures, Taipei, Taiwan 2003, 8-9.
- [17] Z. Wiłun, *Zarys geotechniki*, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 1987.