

Innowacyjne rozwiązania technologiczne w zrównoważonym budynku Muzeum Przyszłości w Dubaju



dr inż.
JERZY SZOŁOMICKI
Politechnika Wroclawska
Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego
ORCID: 0000-0002-1339-4470



dr inż. arch.
HANNA GOLASZ-SZOŁOMICKA
Politechnika Wroclawska
Wydział Architektury
ORCID: 0000-0002-1125-6162

W artykule przedstawiono elementy analizy konstrukcyjnej i architektonicznej zrównoważonego awangardowego Muzeum Przyszłości w Dubaju w Zjednoczonych Emiratach Arabskich, którego realizacja związana była z organizacją wystawy World Expo 2020.

Wprowadzenie

W ostatnich latach charakter muzeów pełniących funkcje pasywnych form gromadzenia zbiorów zmienił się na formę bardziej kreatywną, która ma stymulować rozwój kultury i nauki, wykorzystując do tego wszystkie dostępne formy multimedialne. W tego typu trend wpisuje się Muzeum Przyszłości, którego powstanie związane było z organizowaną w Dubaju wystawą World Expo 2020. Celem muzeum było stworzenie centrum inspiracji, innowacji i opracowywania rozwiązań z wykorzystaniem najnowszych technologii. Organizowane obecnie stałe wystawy muzealne w tym obiekcie mają podkreślać zrównoważony rozwój i są poświęcone zmianom klimatycznym, przestrzeni kosmicznej oraz przyszłości opieki zdrowotnej.

Cechą szczególną prezentowanego budynku jest jego forma przestrzenna i oryginalnie zaprojektowana fasada. Dodatkowo wnętrze i elewacja zewnętrzna wykończona zo-

stała materiałem kompozytowym, podkreślającym wrażenie budowli futurystycznej.

W artykule przedstawiono analizę konstrukcji budynku muzeum wraz z zastosowanymi materiałami budowlanymi na podstawie badań *in situ* i zebranych danych w literaturze naukowej. Ponadto przeanalizowano zaawansowane metody jego projektowania oraz realizacji.

Układ przestrzenny i konstrukcyjny budynku Muzeum Przyszłości

Muzeum Przyszłości zostało zaprojektowane przez Shauna Killa przy współpracy z Buro Happold, BAM Higgs & Hill i Transgulf. Budynek zlokalizowany jest na obrzeżach dzielnicy finansowej przy głównej ulicy Sheikh Zayed Rd w sąsiedztwie hotelu Jumeirah Emirates Towers. Do muzeum prowadzą dwa nadziemne tunele komunikacyjne, jeden rozciągający się od sąsiedniego hotelu Jumeirah Emirates

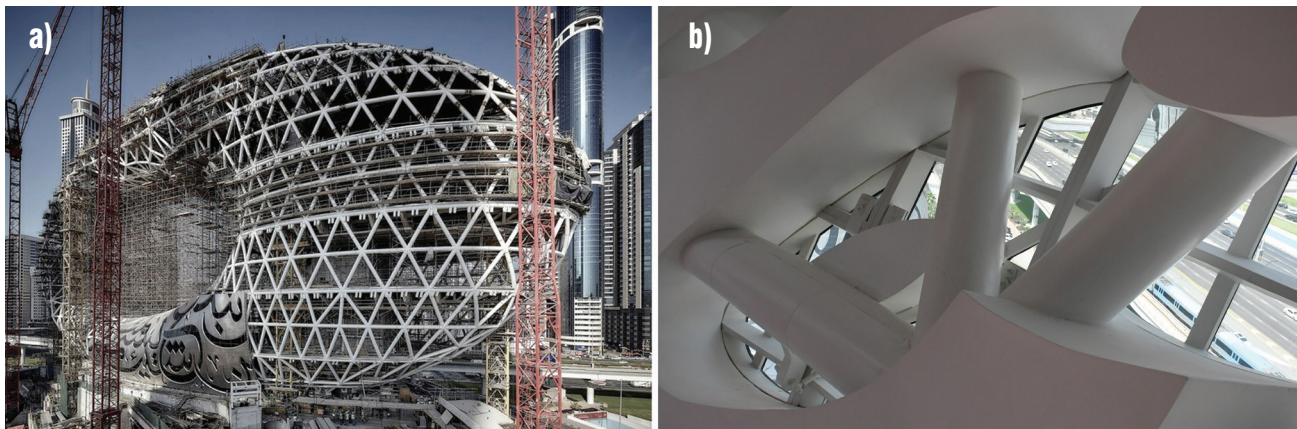
Towers, a drugi łączący muzeum z pobliską stacją metra Emirates Towers. Budynek zaprojektowano w kształcie torusa wieńczącego niewysokie sztucznie utworzone wzgórze pokryte zielenią [1]. Swoją formą przypomina współczesną rzeźbę pełniącą funkcję pomnika. Całkowita wysokość muzeum wynosi 77 m. Budowla ma 10 kondygnacji, z których trzy zostały ukryte w konstrukcji wzgórza pełniącego funkcję podium, a siedem tworzy konstrukcję nadziemną muzeum.

W muzeum kondygnacje 1–5 pełnią funkcję wystawienniczą, natomiast 6–7 zaprojektowano na miejsce spotkań oraz dla celów prywatnych rodziny królewskiej i dygnitarzy.

Muzeum zaprojektowano na planie „elipsy” i posadowiono na podium o nieregularnym rzucie. Na osi podłużnej założenia (północny wschód – południowy zachód) umieszczono dwa główne piony komunikacyjne (windy, klatki schodowe oraz przyległe toalety), natomiast na osi poprzecznej zaprojektowano



Rys. 1. Muzeum Przyszłości; źródło: zdjęcia wykonane przez autorów



Rys. 2. Konstrukcja typu diagrid: a) w trakcie realizacji; źródło: zdjęcie Killa Design [2]; b) zrealizowany szczegół konstrukcji typu diagrid; źródło: zdjęcie wykonane przez autorów

dwa wejścia z holem o wysokości trzech kondygnacji. W przyziemiu podium po bokach holu umieszczono parkingi na dwóch kondygnacjach, a na trzeciej kondygnacji zaprojektowano audytorium oraz salę dla interaktywnych wykładów i warsztatów oraz usługi handlowe i restauracje. Eliptyczny kształt budowli naziemnej podkreślono w rzucie planem sal oraz korytarzy, połączonych dwoma pomostami, z których południowy stanowi przedłużenie tunelu metra. W holu zaprojektowano dodatkowe schody na planie koła w kształcie podwójnej helisy, w których jeden bieg prowadzi do pomostu, a drugi bieg łączy przyziemie podium z pierwszą kondygnacją muzeum. Na pierwszej kondygnacji muzeum umieszczono schody o kształcie pojedynczej helisy prowadzące do siódmej kondygnacji.

W holu wyróżniają się schody o kształcie podwójnej helisy oraz przeszklone pionowe windy, umieszczone w podświetlonych kominach nadających wysokiemu wnętrzu przestronności i głębi. Również na drugiej kondygnacji muzeum w połowie długości sali wystawowej zastosowano dwa atria łączące dwie kondygnacje.

Budynek jest posadowiony na palach. Główną konstrukcję nośną stanowi żelbetowy trzon ze wspornikowymi kompozytowymi płytami żelbetowymi poszczególnych stropów,

który podtrzymuje zewnętrzną stalową konstrukcję kratownicową typu diagrid.

Konstrukcja diagrid składa się z 2400 elementów o przekroju rurowym i tworzy kształt torusa. Jest ona osadzona na eliptycznym, żelbetowym wieńcu o obwodzie 174 m i wymiarach przekroju 2,5 m na 2,5 m. Na konstrukcji diagrid oparta jest fasada budynku. Tworzą ją 1024 panele, których liczba symbolizuje kilobajt, wykonane z materiałów kompozytowych i wykończone stalą nierdzewną nadającą budowli srebrzysty kolor. Wszystkie panele są połączone ze sobą w sposób bezspoinowy. Fasadę zdobi wycięta w panelach arabska kaligrafia wypełniona szybą i przedstawiająca frazy myśli szejka Mohammeda Bin Rashida Al Maktouma [2]. Pismo wykonane kursywą pełni funkcję okien muzeum.

Trzy zdania napisane na fasadzie dotyczą kreatywności, innowacji i przyszłości [3].

Proces projektowania oraz zastosowane innowacje technologiczne

Niekonwencjonalny kształt budynku z siedmioma kondygnacjami bez wewnętrznych słupów oraz wkomponowana w specjalnie wycięte i dopasowane panele fasady kaligrafia arabska (ponad 700 słów) sprawiają, że jest to jeden z najbardziej złożonych projek-

tów budowlanych. Na uwagę zasługuje również wykończenie wnętrza za pomocą białych paneli kompozytowych z podświetlonymi oknami i stropami.

Podobnie jak w bryle zewnętrznej również we wnętrzu zastosowano motyw wyciętej, podświetlonej kaligrafii.

Do realizacji muzeum wykorzystano projektowanie parametryczne i modelowanie BIM (Tekla structure, Rhino 3D), [4]. Projektując za pomocą modeli 3D w programie Autodesk Revit, projektanci przeanalizowali wiele potencjalnych konfliktów w konstrukcji, fasadzie i systemach mechanicznych, inżynierskich oraz hydraulicznych [5]. Ponadto model 3D okazał się bardzo istotny w projektowaniu i wizualizacji wewnętrznych schodów w kształcie pojedynczej oraz podwójnej helisy.

Pierwszym zadaniem obliczeniowym było dopracowanie teoretycznego kształtu budynku w celu wyeliminowania jak największej liczby skomplikowanych krzywizn. Następnie konsultant do spraw konstrukcyjnych biuro Buro Happold przeanalizowało różne warianty projektu stalowej konstrukcji diagrid z wykorzystaniem programowania parametrycznego. W efekcie uzyskano zoptymalizowany układ pod względem liczby punktów połączeń, średnicy rur stalowych oraz całkowitego ciężaru. Wykonawca Bam Higgs & Hill



Rys. 3. Kompozytowy wielowarstwowy panel wykończony stalą nierdzewną z wycięciem na tekst arabski; źródło: zdjęcia wykonane przez autorów



Rys. 4. Fragment podświetlanej ściany we wnętrzu holu; źródło: zdjęcie wykonane przez autorów

oraz producent stali konstrukcyjnej Eversendai Engineering przeprowadzili jeszcze w fazie projektowej analizę kolejności etapów budowy i projektu połączeń dla konstrukcji, biorąc pod uwagę zmieniające się naprężenia i obciążenia podczas procesu wznoszenia. W całym procesie budowy wykorzystano skanowanie laserowe, korzystając ze skanera Leica ScanStation P40, do porównania pozycji powykonawczych z modelem 3D [6]. Na każdym etapie budowy i produkcji było ono kluczowym czynnikiem pomyślnej realizacji projektu. Ponieważ każdy aspekt projektu budynku był zintegrowany, w trakcie analizy parametrycznej próbowano rozwiązać kilka równań równocześnie, co wiązało się z ciągłą ewolucją wszystkich części składowych.

Ze względu na geometrię budynku i kaligraficzne wycięcia nie ma dwóch identycznych paneli kompozytowych. Dubajska firma Affan Innovative Structures zrealizowała projekt kompozytowych paneli, a także produkcję i wsparcie podczas montażu. Każdy z 1024 ognioodpornych paneli (FR) musiał być indywidualnie formowany i wytwarzany przed dodaniem wykończenia ze stali nierdzewnej i przeszklenia. Programowanie parametryczne zostało wykorzystane do określenia ostatecznego położenia i rozmiaru napisu, aby znaleźć optymalną równowagę między ilością naturalnego światła wpadającego do muzeum, zyskiem ciepła słonecznego, obciążeniem klimatyzacji i estetyką. Każdy złożony, zakrzywiony panel elewacyjny został zaprojektowany w programie CATIA tak, aby zawierał wycięcia dla pisma arabskiego i różne wgłębienia na płaskie szklane okna, a także wzmocnione krawędzie ze względu na podnoszenie podczas instalacji i mocowanie do stalowej konstrukcji budynku. Zostały one następnie przełożone na projekty form

obrabianych w technologii CNC (*computer numerical control machines*) z pianki poliuretanowej. Projektowane panele musiały wytrzymać różnorodne obciążenia konstrukcyjne oraz obciążenie wiatrem do 450 kg/m². Na to drugie obciążenie duży wpływ miał toroidalny kształt budynku, którego środek stworzył efekt tunelu aerodynamicznego. Badania sztywności oraz ugięcia paneli zostały przeprowadzone przez firmę Composite Technology Center współpracującą z przemysłem lotniczym (Airbus). Panele zostały wykonane z prepregu epoksydowego FR, który został utwardzony w temperaturze 120°C ze względu na możliwość nagrzewania się powierzchni stalowej w lecie do temperatury 80°C. Gotowe panele zostały wykończone zewnętrzną powłoką ze stali nierdzewnej w formie sześciokątnej siatki, która zmieniała się w zależności od stopnia krzywizny. Aby każdy panel oparł się na konstrukcji stalowej, a jednocześnie utworzył gładką powierzchnię, potrzebna była możliwość regulacji głębokości, orientacji i krzywizny panelu w 3D. W celu rozwiązania tego problemu zastosowano na całej powierzchni fasady szczeliny między panelami, które wypełniono specjalną uszczelką, która oprócz uszczelnienia zapewniła estetyczny wygląd budynku. Zaprojektowane panele mają zintegrowany system mocowania, przypominający kasetę, która łączy się z budynkiem.

Innowacyjne rozwiązania zostały wdrożone również w zielonym kopcu, który stanowi integralną część projektu. Poza aspektem symbolicznym związanym z trwałością i zakorzenieniem zielony kopiec miał na celu wyniesienie budynku ponad linię metra. Dla utworzenia zielonego systemu pokrycia wzgórze zastosowano zaawansowane rozwiązania przeciwoerozyjne ułatwiające wzrost roślinności

na konstrukcji (Green Terramesh, Mac Web, MacMat, BioMac) oraz system drenażu powierzchniowego (MacDrain).

Wnioski

Określane przez wielu jako najbardziej interesujący budynek na świecie, Muzeum Przyszłości jest nie tylko wizualnym i artystycznym wzorcem, ale także wyznacza nowe innowacyjne kierunki. Futurystyczny kształt obiektu wpisuje się w długą historię architektów przesuwających granice inżynierii. Muzeum Przyszłości jest niskoemisyjnym budynkiem dzięki zastosowaniu wielu innowacji projektowych, które obejmują projektowanie parametryczne, pasywną architekturę słoneczną, rozwiązania inżynierskie niskoenergetyczne i niskowodne, strategie odzyskiwania energii i wody oraz zintegrowane źródła odnawialne. Ponadto charakteryzuje się zoptymalizowaną strategią ewakuacji przeciwpożarowej, systemem oddymiania oraz systemem czyszczenia powierzchni zewnętrznej. Muzeum jest wyposażone w zaawansowane rozwiązania sterowania HVAC, systemy recyklingu wody i windy z napędem regeneracyjnym, a jego zapotrzebowanie na energię jest zaspokajane przez fotowoltaiczne panele słoneczne wytwarzające 4000 megawatogodzin rocznie. W nocy budynek jest oświetlony przez 14000 metrów linii świetlnych LED, akcentując arabską kaligrafię.

Do uzyskania certyfikatu LEED Platinum w dużym stopniu przyczyniło się projektowanie w środowisku BIM. Stworzony został model energetyczny 3D, w którym wszystkie dyscypliny mogły współdziałać w czasie rzeczywistym. Zaowocowało to szeregiem wymiernych korzyści, w tym 45% zmniejszeniem zużycia wody i całkowitą oszczędnością energii o 25% [6]. W 2022 roku bu-



Rys. 5. Wewnętrzne schody w muzeum: a) w kształcie podwójnej helisy, prowadzące z tunelu komunikacyjnego metra do muzeum i na pierwszą kondygnację; b) w kształcie helisy prowadzące od pierwszej do siódmej kondygnacji; źródło: zdjęcia wykonane przez autorów

dynek Muzeum Przyszłości uzyskał nagrodę Award of Excellence w kategorii najlepszy budynek wysoki poniżej 100 m przyznawaną przez CTBUCH (Council on Tall Buildings and Urban Habitat).

Bibliografia

- [1] H. Golasz-Szłomicka, J. Szłomicki, 2020, Selected Modern Public Culture and Educational Buildings in Countries of the Persian Gulf, IOP Conference Series – Materials Science and Engineering, 960 (022052), doi:10.1088/1757-899X/960/2/022052.
 [2] <https://www.killadesign.com/portfolio/museum-of-the-future/>, dostęp: 15.03.2022.
 [3] <https://www.dezeen.com/2022/02/22/museum-of-the-future-killadesign-dubai/>, dostęp: 25.03.2022.
 [4] <https://www.tekla.com/ae/bim-awards/museum-future>, dostęp: 30.03.2022.
 [5] <https://redshift.autodesk.com/museum-of-the-future/>, dostęp: 25.03.2022.
 [6] <https://www.burohappold.com/projects/museum-of-the-future/#>, dostęp: 30.03.2022.

DOI: 10.5604/01.3001.0015.9474

PRAWIDŁOWY SPOSÓB CYTOWANIA

Szłomicki Jerzy, Golasz-Szłomicka Hanna, 2022, Innowacyjne rozwiązania technologiczne w zrównoważonym budynku Muzeum Przyszłości w Dubaju, „Builder” 9 (302). DOI: 10.5604/01.3001.0015.9474

Streszczenie: W artykule przedstawiono elementy analizy konstrukcyjnej i architektonicznej zrównoważonego awangardowego Muzeum Przyszłości w Dubaju w Zjednoczonych Emiratach Arabskich, którego realizacja związana

była z organizacją wystawy World Expo 2020. Celem muzeum było stworzenie centrum inspiracji, innowacji i opracowywania rozwiązań z wykorzystaniem najnowszych technologii. Biorąc pod uwagę zastosowane technologie, muzeum stanowi nie tylko propozycję szerokiego spojrzenia na najnowsze wynalazki ludzkości poprzez swoje wystawy, ale samo jest przykładem innowacji projektowej, konstrukcyjnej i materiałowej. Niekonwencjonalny kształt budynku w formie torusa oraz wkomponowana w specjalnie wycięte i dopasowane kompozytowe panele fasady kaligrafia arabska sprawia, że jest to jeden z najbardziej złożonych projektów budowlanych. Muzeum Przyszłości jest niskoemisyjnym budynkiem dzięki zastosowaniu wielu innowacji projektowych, które obejmują projektowanie parametryczne, pasywną architekturę słoneczną, rozwiązania inżynierskie niskoenergetyczne i niskowodne, strategie odzyskiwania energii i wody oraz zintegrowane źródła odnawialne.

Słowa kluczowe: muzeum, innowacje technologiczne, budynek zrównoważony

Abstract: INNOVATIVE TECHNOLOGY SOLUTIONS IN THE SUSTAINABLE BUILDING OF FUTURE MUSEUM IN DUBAI.

The article presents elements of the structural and architectural analysis of the sustainable avant-garde Museum of the Future in Dubai in the United Arab Emirates, which was developed in conjunction with the World Expo 2020 exhibition. The aim of the museum was to create a center for inspiration, innovation, and the development of solutions using the latest technologies.

Taking into account the technologies used, the museum not only offers a broad look at the latest inventions of mankind through its exhibitions, but is itself an example of design, structure, and material innovation. The unconventional torus shape of the building and the Arabic calligraphy incorporated into the specially cut and matched composite façade panels make it one of the most complex construction designs. The Museum of the Future is a low-carbon building through the use of a range of design innovations that include parametric design, passive solar architecture, low-energy and low-water engineering solutions, energy and water recovery strategies, and integrated renewable sources.

Keywords: museum, technological innovation, sustainable building