

# MODELOWANIE INFORMACJI BUDOWLANYCH W TECHNOLOGII BIM – ROLA MODELU PARAMETRYCZNEGO

Krystyna Januszkiewicz, Karol G. Kowalski

Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Wydział Architektury, ul. Żołnierska 50, 70-311 Szczecin

E-mail: krystyna\_januszkiewicz@wp.pl, ORCID: 0000-0001-6880-0862

E-mail: karol.g.kowalski@gmail.com, ORCID: 0000-0003-4061-7606

DOI: 10.24427/aea-2020-vol12-no4-02

## BUILDING INFORMATION MODELING IN BIM TECHNOLOGY – THE ROLE OF THE PARAMETRIC MODEL

### Abstract

BIM (Building Information Modeling) technology is presented against the background of the history of development of digital building information modeling systems, paying attention to industry integration and the role of the parametric model. Using the example of two completed objects such as the Dongdaemun Design Plaza (DDP) in Seoul (2007–2014) by Zaha Hadid Architects and the King Abdulaziz Centre for World Culture (ITHRA) in Dhahran (2006–2017) by Snøhetta, it is explained how the CAD/CAE/CAM implementation design strategy has an impact on parametric object-based modeling coupled with building information modeling. The data flow and the non-conflicting nature of the process of introducing changes to the working models are important here. Today, BIM technology is one of the most promising digital technologies and is still being improved based on the experience of designers and contractors.

### Streszczenie

W artykule przedstawiono technologię BIM (ang. *Building Information Modeling*) na tle historii rozwoju cyfrowych systemów modelowania informacji o budynku, zwracając uwagę na integrację branżową i rolę modelu parametrycznego. Na przykładzie dwóch zrealizowanych obiektów, takich jak Dongdaemun Design Plaza (DDP) w Seulu (2007–2014) projektu Zaha Hadid Architects oraz King Abdulaziz Centre for World Culture (ITHRA) w Dhahranie (2006–2017) projektu Snøhetta, objaśniono, jaki wpływ ma strategia opracowywania projektu realizacyjnego w systemach CAD/CAE/CAM na obiektowe modelowanie parametryczne sprzęgnięte z modelowaniem informacji o budynku. Istotne znaczenie mają tu przepływ danych i bezkonfliktowość w procesie wprowadzania zmian w modelach roboczych. Obecnie technologia BIM jest jedną z bardziej obiecujących technologii cyfrowych i wciąż jest udoskonalana na podstawie doświadczeń projektantów i wykonawców.

## WPROWADZENIE

Modelowanie informacji o budynku, BIM (ang. *Building Information Modeling*), jest obecnie jedną z bardziej obiecujących technologii cyfrowych powstałych z myślą o podwyższeniu efektywności w projektowaniu i wznoszeniu obiektów budowlanych. Technologia BIM pozwala dziś sporządzić wirtualny model budowy dokładnie tak, jak zostanie ona wybudowana. Model taki pomaga architektom, inżynierom i konstruktorom wizualizować to, co ma zostać zbudowane, w środowisku symulowanym, aby zidentyfik-

kować potencjalne problemy związane z projektowaniem, konstrukcją lub użytkowaniem. BIM zachęca do integracji wszystkie strony zaangażowane w projekcie. Modelowanie informacji o budynku nie może się jednak obejść bez modelowania parametrycznego. Model parametryczny projektowanego obiektu stanowi bowiem integralny element procesu BIM, gdyż zawiera opisy zadań inżynierskich i budowlanych, określa jego użytkowanie, ustalając relacje ze środowiskiem zbudowanym bądź naturalnym. Od informacji zawartych

w modelu parametrycznym inicjującym proces modelowania informacji o budynku zależą jakość opracowania kolejnych etapów obejmujących działania inżynierskie i budowlane, a także zarządzanie informacją o budynku.

## 1. INTEGRACJA BRANŻOWA

Definicja BIM (ang. *Building Information Modeling* – modelowanie informacji o budynku), jaką można się posłużyć, powstała w 2016 roku i odnoszona jest do całości procesu modelowania obiektu budowlanego oraz zarządzania informacją budowlaną w czasie przygotowania budowli do realizacji, a także podczas jej trwania (ryc. 1). Zgodnie ze standardami NBIMS (ang. *The National Building Information Modeling Standard*) z 2006 roku BIM może zawierać osiem zestawów danych: „(1) dane projektanta, (2) dane prawne, (3) dane geoprzestrzenne, (4) dane finansowe, (5) dane sporządzającego specyfikację, (6) dane o środowisku, (7) dane wspierające oraz (8) dane właściciela”.

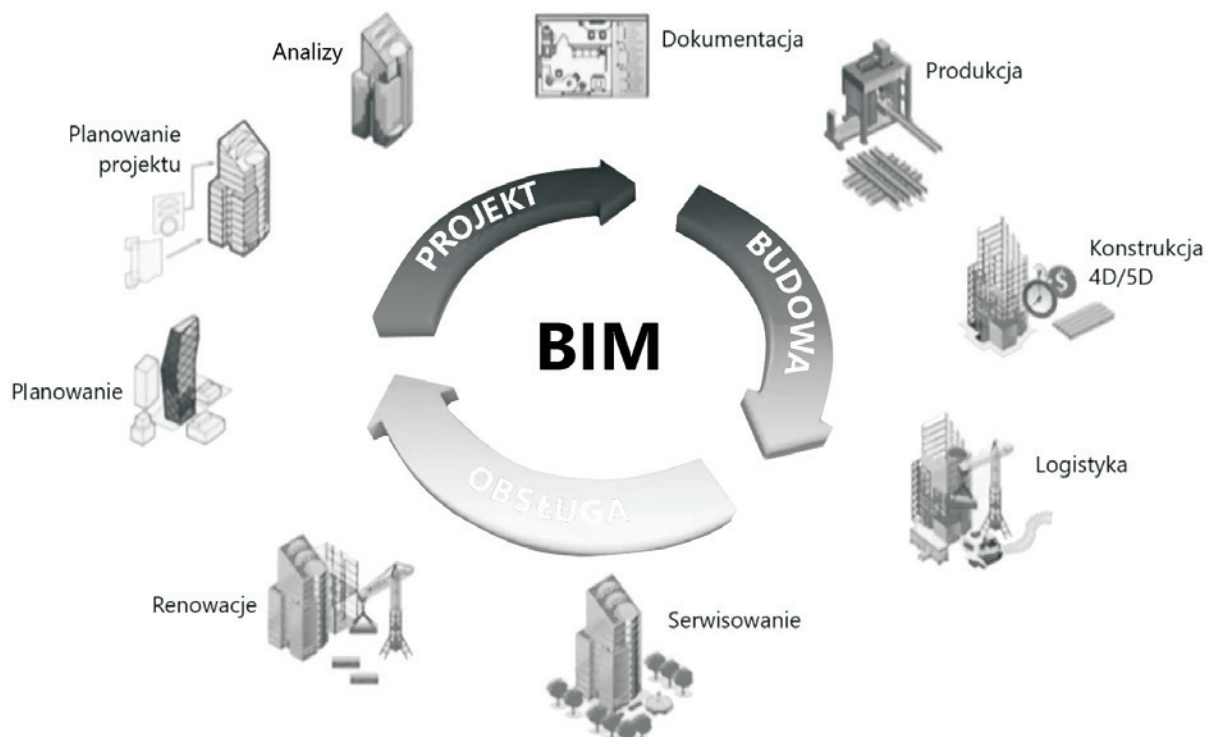
W 2008 roku na podstawie tych standardów amerykański Narodowy Instytut Nauk Budowlanych (NIBS) określił BIM jako „(...) wyłaniające się z technologii oraz nowych struktur biznesowych wykorzystywanie pojęć i koncepcji oraz praktyk w zakresie otwartej interoperacyjnej wymiany informacji. To nowe podejście do

współpracy ma także wpływ na inżynierię procesów, które w znaczny sposób mogą zmniejszyć ilość odpadów w przemyśle budowlanym”.

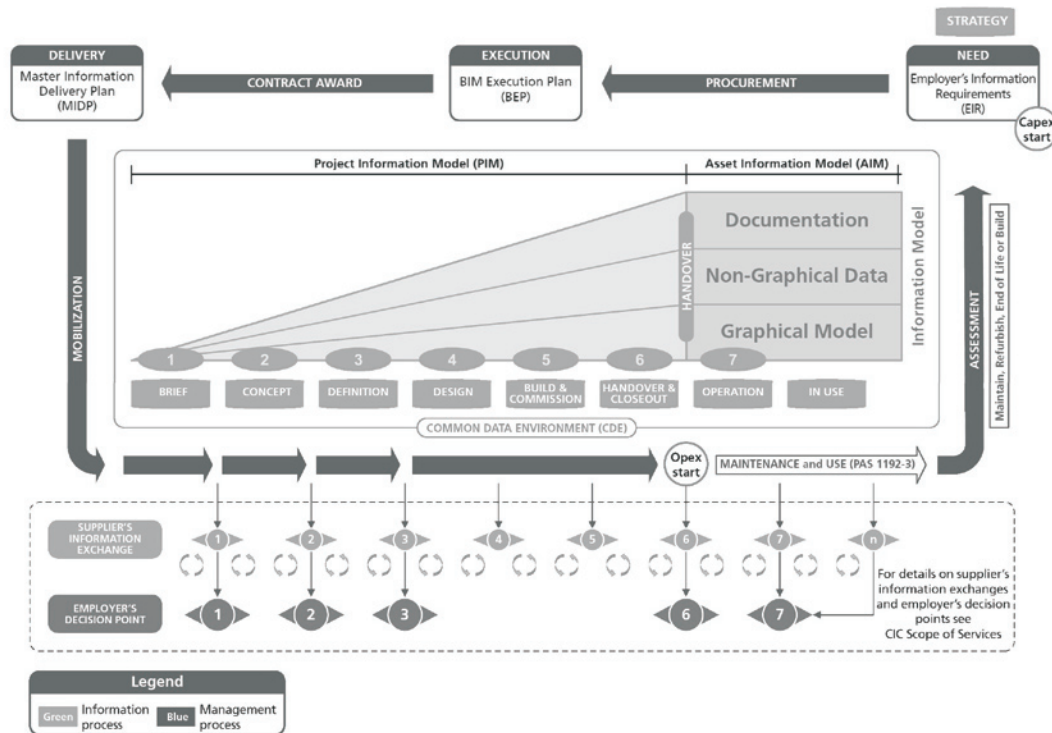
### 1.1. Historia rozwoju technologii BIM

Pomysł, aby dane o fizycznych i funkcjonalnych właściwościach budowli zamienić na operacyjny format cyfrowy, nie jest nowy. Pierwsza implementacja takiego formatu, pod nazwą *Virtual Building*, nastąpiła w 1987 roku z inicjatywy Graphisoft ArchiCAD. Niedługo potem ten sam pomysł został zrealizowany przez Phila Bernsteina, architekta i stratega branży budowlanej, który wprowadził i spopularyzował nazwę BIM [G. Lee, R. Sacks, Ch.M. Eastman 2006, s. 758–776]. Wcześniej format ten funkcjonował pod nazwą BPM (*Building Product Models*) i pozwalał stworzyć w przestrzeni wirtualnej inwestycję budowlaną, od koncepcji począwszy, na oddaniu jej do użytku skończywszy. Współczesny BIM jest rozszerzeniem tamtej wersji, daje szerszy dostęp do informacji budowlanych i pozwala określać zachowania obiektu oraz koszty eksploatacji przez czas życia budowli.

BIM to proces łączenia informacji i technologii w celu stworzenia cyfrowej reprezentacji projektu. Umożliwia integrację danych z wielu źródeł i rozwija je równolegle podczas trwania procesu projektowego, obejmując projektowanie, budowę i użycie informacji



Ryc. 1. Schemat integracji i przepływu informacji o budynku w procesie ich modelowania w systemie BIM; źródło/source: BIMVentor - Polska



**Ryc. 2.** Diagram korelacji procesów dostarczania informacji i zarządzania informacją BIM 2 PAS 1192-2; źródło/source: Ch. Eastman et.al., (2011), BIM Handbook [8]

operacyjnych [S. Mordue, P. Swaddle, D. Philp 2016, s. 8]. W ciągu ostatnich 30 lat technologia BIM przeszła duże przeobrażenia, a wraz z jej rozwojem zmieniała się również terminologia.

Pierwsze udokumentowane definicje dotyczyły cyfrowego modelowania budynku, BM (ang. *building modeling*), i powstały w 1986 roku za sprawą Simona Ruffle'a [S. Ruffle 1986, s. 385–389] oraz Roberta Aisha [R. Aish 1986]. Ten ostatni odnosił modelowanie budynku do wszystkich jego cech, jakie dziś znamy, tj. modelowania 3D, techniki automatycznego uzyskiwania rysunków, inteligentnych komponentów parametrycznych, relacyjności baz danych, oraz czasowego etapowania procesów budowlanych. W obecnym rozumieniu koncepcja modelowania informacji o budynku BIM po raz pierwszy została użyta w 1991 roku w artykule Gilesa A. (Sander) van Nederveena i Fritsa P. Tolmana, w którym tak nazwano techniki wieloaspektowego przedstawiania budynku przy użyciu widoków jego modelu [G.A. van Nederveen, F.P. Tolman 1992, s. 215–224].

Stworzona przez van Nederveena i Tolmana koncepcja została wykorzystana dopiero po upływie dekad, przez firmę Autodesk, która w 2002 roku wydała białą księgę pt. *Building Information Modeling*. Modelowanie informacji o budynku scharakteryzowano w niej jako takie, które „tworzy i działa na cyfrowych bazach danych poprzez współpracę oraz zarządzanie zmianami

w tych bazach danych. Dzięki temu każda zmiana jest skoordynowana i widoczna we wszystkich jej częściach. Ponadto zbiory danych oraz informacje są przechowywane i dostępne do ponownego wykorzystania, także przez aplikacje dedykowane do określonych branż”.

Jerry Laiserin w serii artykułów (2002, 2003, 2005, 2007) spopularyzował koncepcję BIM, zaznaczając w 2007 roku, że definicja, jaką stworzył w 2002 roku, znacznie już ewoluowała. Jego zdaniem „BIM jest procesem reprezentacji, który tworzy i zapewnia, pod każdym względem, wielowymiarowe spojrzenie w dane o budynku przez cały cykl życia obiektu” [J. Laiserin 2007, s. 46]. Zaznaczyć należy, że przez dostęp do informacji zwrotnych ulepszony został proces projektowania, tworzenia dokumentacji i jej dostarczania. Komunikacja między zaangażowanymi stronami, poprzez udostępnianie danych ułatwiła m.in. sporządzanie symulacji przyszłych zachowań budynku i zachodzących w nim procesów. W pierwszej dekadzie XXI wieku niektórzy producenci systemów CAD promowali swoje rozwiązania dla BIM, można tu wymienić: ArchiCAD od firmy Graphisoft; Revit Architecture, Structure oraz MEP od Autodesku; Digital Project firmy Gehry Technologies; Bentley Architecture, Structural, Building Electrical oraz Building Mechanical od firmy Bentley Systems. Do rozwoju BIM znacznie przyczyniło się wdrożenie opracowanej w latach 90. koncepcji SBM (ang. *Single Building Model* – model jednego budynku).

## 2. ZESTAWY DANYCH I POZIOMY BIM

W 2008 roku Mark Bew i Mervyn Richards przedstawili na diagramie brytyjski model zwany *dojrzałością BIM*, bez którego trudno byłoby zrozumieć rozwój modelowania informacji budowlanych (ryc. 2). Model ten, rozpowszechniony przez British Standards Institution (BSI), obejmował wówczas cztery poziomy BIM, które były nośnikami informacji związanych m.in. z dokumentacją papierową, dwuwymiarową oraz zaawansowanym modelem cyfrowym 3D. Te cztery poziomy BIM (od 0 do 3) zostały później rozszerzone przez branżę przemysłową (do 4D, 5D, 6D, 7D oraz XD) i można je opisać następująco:

- BIM Poziom 0 – nie obejmuje współpracy zespołu, a jedynie tworzenie rysunków CAD w 2D, gdzie praca odbywa się za pomocą jednostronnie zintegrowanego systemu zarządzania. Na tym poziomie wymagana jest stała komunikacja z każdą zainteresowaną stroną, ponieważ trudno śledzić wszystkie zmiany, co powoduje większe prawdopodobieństwo błędu, tym bardziej że podstawą do komunikowania się jest papierowa dokumentacja.
- Poziom BIM 1 – charakteryzuje się już większą współpracą zespołu, gdzie kooperacja oparta jest na plikach w niektórych środowiskach CAD 3D, co pozwala lepiej zarządzać pracami nad projektem. Poziom ten wykorzystuje standard BS 1192:2007, który zapewnia lepszą metodę opracowywania, organizowania i zarządzania informacjami dla branży budowlanej, przy ściśle określonej polityce związanej z nazewnictwem.
- Poziom BIM 2 – wyznacza standard, w którym każdy pracuje na własnym modelu w środowisku 3D i korzysta z możliwości współpracy z innymi członkami zespołu oraz branżami. W 2016 roku rząd brytyjski opublikował oficjalną implementację do poziomu BIM 2, skierowaną do liderów branżowych, projektantów i producentów. Jest to PAS 1192-2, który określa wymagania dotyczące tworzenia informacji architektonicznych, inżynierskich i konstrukcyjnych. Wprowadzono także podział zintegrowanego procesu inwestycyjnego IPD (ang. *integrated project delivery*) na PIM (ang. *project information model*), IE (ang. *Information Exchange*) oraz AIM (ang. *Asset Information Model*).
- Poziom BIM 3 – pozwala na otwartą integrację danych, co umożliwia scentralizowaną współpracę i zarządzanie projektami nie tylko w kooperacji z innymi branżami, lecz także zarządzania finansami oraz cyklem życia budynku. Stałe powiadomienia o zmianach są możliwe dzięki formatom IFC/IFD.

- BIM 4D – pozwala już na wyodrębnianie i wizualizowanie postępów działalności projektanta. Zapewnia aktualne informacje związane ze złożonością każdej dokonywanej zmiany, umożliwia większą kontrolę nad wykrywaniem konfliktów i zapewnia wizualizowanie obiektu w dowolnym momencie zaawansowania prac [P. Kogut, A. Tomana 2013].
- BIM 5D – zawiera informacje związane z kosztorysami szczegółowymi, które są generowane w czasie rzeczywistym przez okres trwania procesu budowlanego.
- BIM 6D – obejmuje aspekty związane ze zrównoważonym rozwojem budynku, skutkami zmiany klimatu, jak np. analizy środowiskowe i energetyczne.
- BIM 7D – dostarcza pełne spektrum informacji o cyklu życia obiektu i zarządzaniu procesem budowlanym. Zawiera niezbędne dla właściciela budowli dane związane z użytkowaniem i konserwacją obiektu [L. Ustinovičius, R. Rasiulis, L. Nazarko, T. Vilutienė, M. Reizgevičius 2015, s. 167–168].
- BIM XD – zawiera wszystkie dodatkowe dane, które można by nadal dodawać do innych wymiarów.

Zintegrowanie różnych informacji i procedur w jednym formacie cyfrowym, wymiany danych to koncepcja BIM, która obecnie ewoluuje w stronę technologii wykorzystujących wirtualne centra danych, zaliczane do BIM 2.0.

Praca projektanta polega zatem na modelowaniu informacji o budynku, czyli na budowaniu w przestrzeni wirtualnej modelu obiektu budowlanego, który jest odzwierciedleniem zapisanych cyfrowo danych. Model ten składa się z cyfrowych elementów budowlanych, którym przypisywane są odpowiednie parametry. Każda zmiana, nawet w jednym elemencie tworzącym model, jest odzwierciedlana w jego trójwymiarowej reprezentacji, jak też w arkuszach danych zbiorczych. Stosując takie narzędzia projektowania, można nie tylko śledzić informacje o fizycznych oraz funkcjonalnych właściwościach budowli i czerpać z tego korzyści, lecz także stworzyć nowatorską konstrukcję, modelowaną za pomocą narzędzi parametrycznych udostępnianych przez BIM. Poszukiwania nowych pomysłów, eksperymentowanie i tworzenie koncepcji polemicznych są niejako wpisane w misję i zawód architekta. Technologie BIM nie ograniczają takich poszukiwań i otwierają nowe obszary eksploracji w projektowaniu architektonicznym i urbanistycznym. W 2006 roku technologia BIM po raz pierwszy wykorzystana została w kształtowaniu formy architektonicznej.



### 2.1. Aplikacje sieciowe – BIM 2.0

W ostatnich latach postęp w technologiach informacyjnych doprowadził do zmian w interpretacji tego, czym jest BIM. Inny sposób projektowania, zarządzania i budowy jest konsekwencją rozwoju infotechnologii w zakresie usług związanych z przesyłem danych (sieci sensorowe, sieci semantyczne czy technologie „chmury”). Powoduje to przedefiniowanie roli modeli informacyjnych, zwłaszcza w aspekcie dostępu do informacji pozwalających na wykonanie coraz bardziej skomplikowanych projektów, co pociąga za sobą wprowadzanie nowych metod zarządzania. Podczas gdy BIM 1.0 był strategią zarządzania informacją (o projekcie i budowie), to BIM 2.0 jest już strategią zarządzania informacją za pomocą wirtualnego centrum danych. Jest to dostępna przez Internet metoda zarządzania projektami, procesami i budową, w której atutem jest interoperacyjność, czyli „*zdolność dwóch lub więcej systemów informatycznych albo ich komponentów do wymiany informacji i do jej użycia*” [IEEE 1990, s. 42].

Phil Bernstein (2012) zdefiniował BIM 2.0 jako system wykorzystujący potencjał modelowania cyfrowego do opracowywania wysoce zintegrowanej dokumentacji projektów architektonicznych oraz zrealizowania procesu produkcji i zarządzania informacjami w zintegrowanych cyfrowych przepływach pracy branży AEC [P. Bernstein 2012, s. 72–73]. Wojciech Kopka (2016) uważa że „*BIM 2.0 można określić jako parametryczny BIM uzupełniony o zautomatyzowane analizy, ewaluację i optymalizację. Parametryczny BIM ułatwia projektowanie, analizy i dokumentację budynków o skomplikowanym kształcie zwanym «free-form»*” [W. Kopka 2016, s. 434].

Kamieniem milowym w rozwoju BIM 2.0 było wprowadzenie aplikacji sieciowych. Przyczyniła się do tego usługa CloudBIM definiowana przez Interfejsy Programowania Aplikacji (ang. *Application Programming Interface – API*). API to „*zestaw procedur używanych przez oprogramowanie aplikacyjne skierowane na wykonanie procedur przez system operacyjny komputera*” [Microsoft Corporation 2002, 33]. W CloudBIM wykorzystuje się technologię „chmury”, która pozwala na interoperacyjność pomiędzy różnymi platformami i aplikacjami oraz usprawnia proces przepływu danych.

Płynna integracja aplikacji w środowisku CloudBIM jest istotna dla modelowania parametrycznego opartego na obiektach, gdyż usprawnia proces optymalizacji, wykonywania analiz, symulacji i dokumentacji obiektów o złożonych formach. Modelowanie parametryczne w BIM 2.0 wykorzystuje odpowiednie otwarte formaty szeregowania danych zarówno w sieci, jak i urządzeniach przenośnych. Zaliczamy do nich m.in. różne aplikacje sieci Web do transmisji danych, a tak-

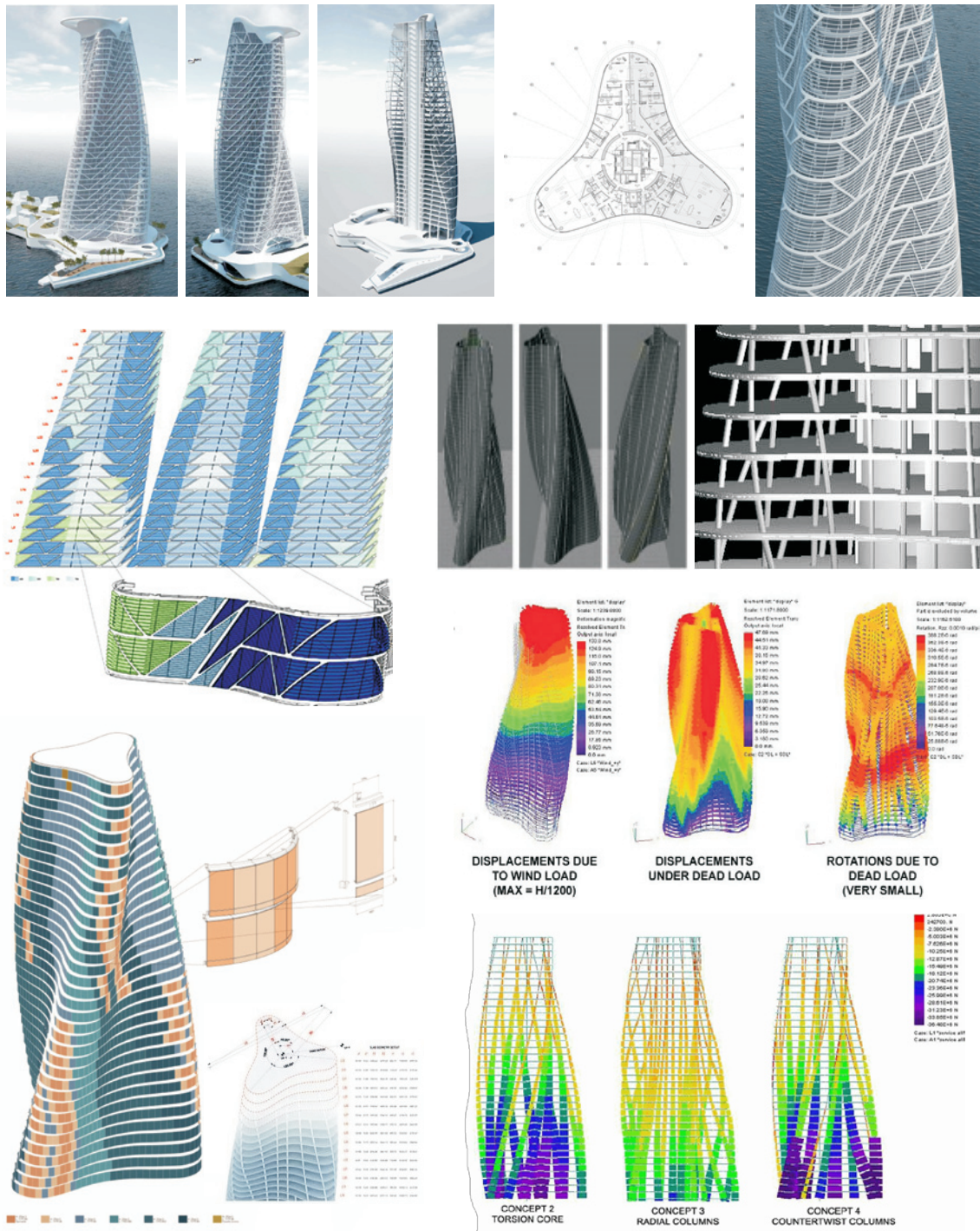
że JavaScript Object Notation [K. Afsari, D.R. Sheldon, Ch.M. Eastman 2016, s. 907–909]. Komunikacja wieloplatformowa jest oparta na prostym mechanizmie żądań i odpowiedzi i jest ona wykonalna dzięki uwzględnieniu wszystkich parametrów, cech oraz zasad, które są wymagane i zrozumiałe dla interdyscyplinarnego zespołu branży AEC.

Technologia BIM jest już powszechnie stosowana w budownictwie i jednoczy w nowy sposób architektów, inżynierów i budowniczych. Te trzy różne, lecz powiązane z sobą branże tworzą w krajach rozwiniętych jedną gałąź nazwaną AEC (ang. *Architecture Engineering Construction*) [E. Kornbau 2008]. Branża ta, korzystając z najnowszych wersji cyfrowego modelowania informacji o budynku, wykorzystuje modele trój- i czterowymiarowe, podnosząc znacznie wydajność środowiskową, materiałową i energetyczną środowiska zbudowanego.

### 3. BIM W PROJEKTOWANIU OBIEKTÓW ARCHITEKTONICZNYCH

W architekturze technologia BIM po raz pierwszy wykorzystana została w 2006 roku. Wtedy biuro Asymptote Architecture z Nowego Jorku otrzymało zlecenie od Aldar Properties na zaprojektowanie wysokiego budynku mieszkalnego przy Al Raha Beach w Abu Zabi. Oczekiwano, że dzięki wyjątkowej formie Strata Tower stanie się znakiem przestrzennym nowo powstałej dzielnicy nad brzegiem Zatoki Perskiej. Do współpracy zaproszono firmy ARUP (inżynieria strukturalna) i Gehry Technologies (BIM), których specjaliści wraz z architektami pracowali wspólnie nad projektem już od etapu formułowania koncepcji.

Wyobrażano sobie wybudowanie podwójnie skręconej dwukrzywiznowej wieży o wysokości ponad 160 metrów. Przedstawiony trójwymiarowy model parametryczny zawierał podstawowe informacje o ukształtowaniu strukturalno-przestrzennym i funkcjonalnym obiektu. Model ten był podstawą do dalszych prac nad projektem, był wirtualną bazą podstawowych danych. Umożliwiał wszelkie modyfikacje przeprowadzane manualnie albo numerycznie, co pozwalało projektantom na manipulowanie wieżą i obserwację skutków ich decyzji w czasie rzeczywistym, na ekranie komputera. Każda zmiana była rejestrowana w arkuszach bazy danych, w kolumnach odnoszących się zarówno do całości kształtu obiektu, jak i jego elementów składowych, jak np. ściany zewnętrznej, poszczególnych pięter czy elementów strukturalnych. Aby zapobiec odkształceniom wynikającym z momentu obrotowego działającego na konstrukcję rdzenia budynku, przeprowadzono na tym modelu analizy i sy-



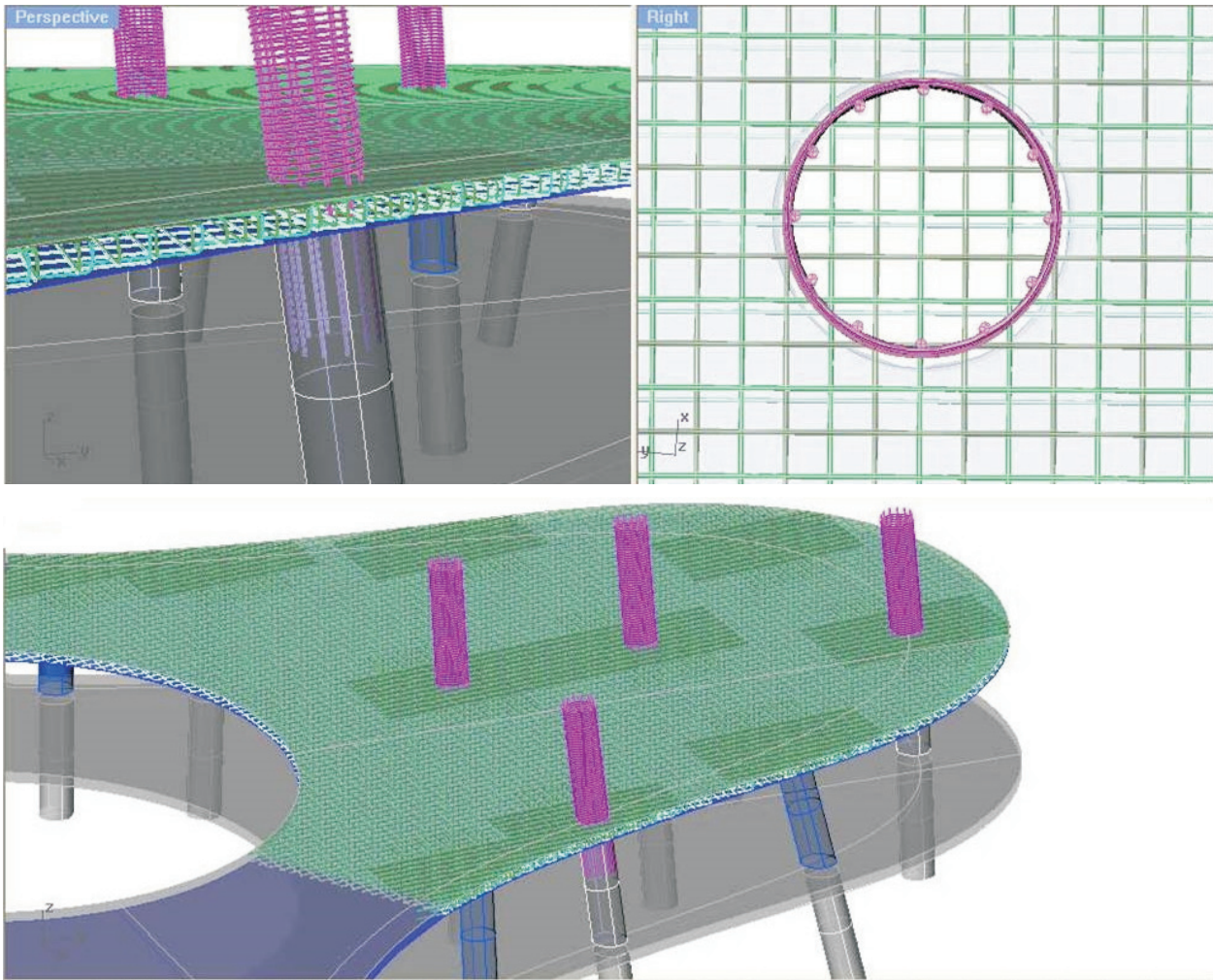
**Ryc. 3.** Asymptote Architecture, Strata Tower, Abu Zabi, ZEA, 2006–2008. Pierwsze zastosowanie technologii BIM w architekturze **a)** projekt koncepcyjny architektoniczno-strukturalny oparty na NURBS, **b)** projektowanie fasady, **c)** bazowy model parametryczny, **d)** koncepcyjny model strukturalny, **e)** analizy strukturalne fasady, **f)** przykładowy arkusz zapisu danych, **g)** stopy i słupy; źródło: dzięki uprzejmości Asymptote Architecture/ source: courtesy Asymptote Architecture

mulacje, by wykluczyć niepożądane naprężenia i poprawić stabilność obiektu.

Sprzężenie narzędzi symulacyjnych, parametrycznych i modelowania informacji o budynku formułuje nowy proces projektowy. Architekt odgrywa w nim rolę eksperymentatora kierującego polemiką

dotyczącą kierunku, w jakim będzie rozwijany projekt. Podkreślić należy, że od początku procesu projektowania model wirtualny był trójwymiarową bazą danych umożliwiającą automatyczny dobór i obliczanie kosztów materiałów oraz samej budowy czy też wydatków związanych z użytkowaniem obiektu po jej zakońc-





**Ryc. 4 a-b.** Asymptote Architecture, Strata Tower, Abu Zabi, ZEA, 2006–2008, BIM stropy i słupy żelbetowe; źródło: dzięki uprzejmości Asymptote Architecture/ source: courtesy Asymptote Architecture

niu. Strategie projektowe uwzględniające modelowanie parametryczne i modelowanie informacji o budynku są obecnie podejmowane przez większość biur projektowych na świecie.

### 3.1. Dongdaemun Design Plaza w Seulu

Oddany do użytku w 2014 roku Dongdaemun Design Plaza (DDP) w Seulu (Korea Południowa), projektu Zaha Hadid Architects (ZHA) [Ryc. 5], był pierwszym projektem w Korei Południowej wykorzystującym technologię BIM. Pracowano wówczas na rozszerzonym poziomie BIM 4, oferowanym przez oprogramowanie Digital Project GT. Koreański DDP jest największym na świecie budynkiem o formie swobodnej, jego powierzchnia użytkowa wynosi 86 574 m<sup>2</sup>. Można w nim organizować międzynarodowe konferencje, festiwale, prezentacje nowych produktów, pokazy mody i różne inne wydarzenia, służy również jako miejsce spotkań biznesowych, zakupów i wypoczynku. Skła-

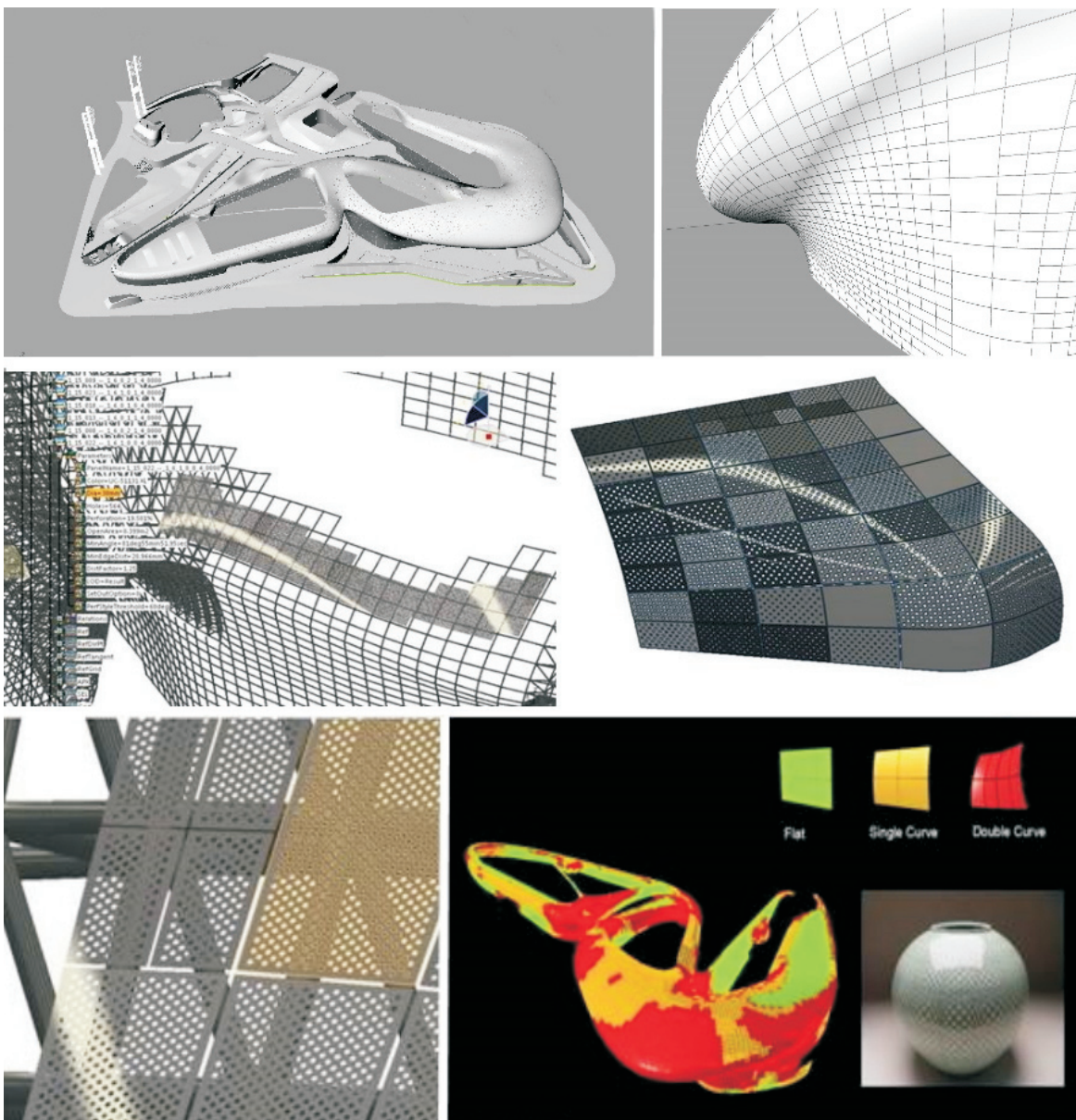
da się z pięciu elementów przestrzennych: Sali Sztuki, Muzeum, Laboratorium Projektowego, Rynku Dizajnu oraz Parku Historyczno-Kulturowego Dongdaemun. Obiekt ma siedem kondygnacji, z czego cztery znajdują się poniżej poziomu terenu.

Obiekty architektoniczne o złożonej nieregularnej geometrii nie mogą być tworzone na podstawie technologii 2D i wymagają nowych technik projektowych i wytwórczych. Projekt koncepcyjny DDP wykonany został w programie Rhinoceros, który pozwala budować modele parametryczne 3D. Za pomocą zestawu narzędzi przekształcania oraz manipulowania punktami kontrolnymi w Rhinoceros określono amorficzne modele parametryczne. Cyfrowe narzędzia projektowania oparte na B-spline i NURBS ułatwiają bowiem przekształcanie przestrzenne formy, nie wymagając jeszcze rozwiązań strukturalnych, co prowadzi często do odkrywania nowych relacji i zależności na wczesnym etapie krystalizowania się koncepcji.





**Ryc. 5.** Zaha Hadid Architects, Dongdaemun Design Plaza, Seul, Korea Południowa, 2007–2014 **a)** projekt koncepcyjny – wizualizacja, **b)** widok zrealizowanego obiektu; źródło: dzięki uprzejmości Zaha Hadid Architects /source: courtesy Zaha Hadid Architects



**Ryc. 6.** Zaha Hadid Architects, Dongdaemun Design Plaza, panelizacja parametrycznej powierzchni swobodnej przy użyciu aplikacji Evolute dla Rhinoceros; źródło: dzięki uprzejmości Zaha Hadid Architects/source: courtesy Zaha Hadid Architects



Cyfrowa powierzchnia parametryczna odgrywa kluczową rolę w modelowaniu parametrycznym form swobodnych. Daje podstawę do rozwiązań funkcjonalnych i inżynierskich budowli. Stąd ważne są jej ciągłość i gładkość geometryczna potrzebne do realizacji w przestrzeni rzeczywistej. Decyzje odnośnie do tego, jaka będzie struktura nośna tej powierzchni i co będzie jej substratem, zapadają zazwyczaj na etapie ustalania rozwiązań geometrycznych. W zależności od przyjętych rozwiązań strukturalnych i materiałowych oraz możliwości fabrykacji dokonuje się korekt geometrii modelu parametrycznego powierzchni obiektu. Wykonuje się to ze względu na przenoszenie obciążeń, optymalne zużycie materiału, możliwości wytwórcze środków produkcji. Są to tzw. działania optymalizacyjne. Jest wiele metod optymalizowania geometrii powierzchni.

W przypadku DDP na przygotowanej parametrycznej powierzchni ciągłej dokonano optymalizacji jej geometrii – skorzystano z aplikacji Evolute i wsparcia konsultantów z firmy Evolute GmbH. Aplikacja ta pozwala dzielić parametryczne powierzchnie ciągłe na panele elewacyjne bez utraty jakości geometrycznej powierzchni projektowanej. Opierając się na zasadach algorytmicznej panelizacji w połączeniu z dyskretną optymalizacją globalnej ciągłości zapisu geometrycznego powierzchni, aplikacja ta dąży do uzyskania jak największej ilości płaskich i pojedynczo zakrzywionych paneli.

Zazwyczaj przy podziale krzywoliniowej powierzchni swobodnej uzyskuje się mniej niż 50% niestandardowych dwukrzywiznowych elementów, co przyczynia się do uproszczenia produkcji i znacznego obniżenia jej kosztów [M. Eigensatz, M. Kilian, A. Schiffner, N.J. Mitra, H. Pottmann, M. Pauly 2010, s. 7] (ryc. 6). Dzieliąc na panele powierzchnię swobodną DDP za pomocą aplikacji Evolute, otrzymano 45 133 paneli zewnętrznych o zróżnicowanej wielkości (których przeciętny rozmiar wynosił 1,6 m × 1,2 m): 13 851 paneli płaskich, 9544 paneli jednokrzywiznowych o łącznej powierzchni 9492m<sup>2</sup> oraz 21 738 paneli dwukrzywiznowych o łącznej powierzchni 16 281 m<sup>2</sup>.

Wzór powierzchni architektonicznej odwołuje się wprost do koreańskich motywów widocznych w tradycyjnych ceramice i sztuce ogrodowej. Ponadto niektóre z metalowych paneli wymagały fakturowania, a inne perforacji w celu doprowadzenia światła dziennego do wnętrza budowli. Wymagało to szczególnej precyzji na każdym z etapów – od projektu i produkcji do montażu. Aby temu sprostać, opracowano formy do gięcia blach o łatwej zmianie ich geometrii. Sterowane numerycznie (CNC) urządzenia mogły podążać za zadanymi parametrami geometrycznymi każdego elementu. Formy te należą do zaawansowanego tech-

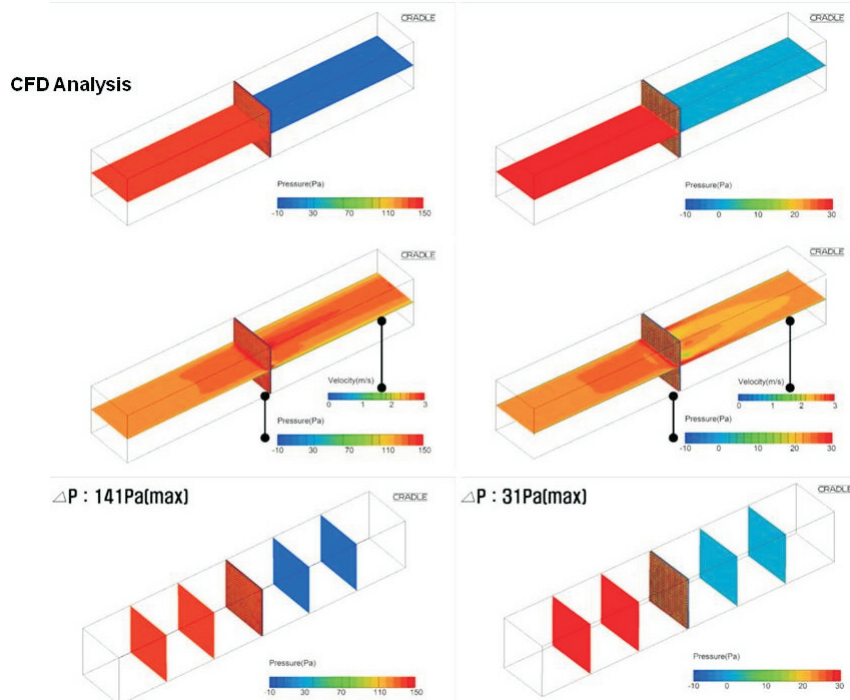
nologicznego systemu dla budownictwa, pozwalającego na personalizację produktu (*mass-customization*) [P. Schumacher 2014, s. 51].

Tesselacja elewacji wykonana w Evolute jest zgodna z regułą przekształcania płynnych powierzchni na zróżnicowanych stopniach krzywizny na niewielkie czworokątne panele o różnych krzywiznach. Celem tego podziału jest skalibrowanie wstępnej formy z systemem konstrukcyjnym, w którym określa się wielkość paneli w relacji do geometrii, właściwości materiału, jak i ograniczeń wynikających z metod fabrykacji oraz montażu. Aby uzyskać pożądaną ciągłość geometryczną w miejscach wysokiego rozkładu zakrzywienia, konieczne było zastosowanie mniejszych paneli ze względu na ograniczenia produkcyjne. Istotny był proces optymalizacji w nowatorskiej sześciowymiarowej przestrzeni metrycznej, gdzie można było kontrolować położenie tysięcy paneli w złożonym układzie, ze szczeliną pomiędzy nimi oraz odchyleniami od powierzchni projektowej. Proces modelowania parametrycznego powierzchni obiektu powiązано bezpośrednio z analizami CFD (ang. *Computational Fluid Dynamics*) zawartymi w oprogramowaniu Digital Project GT (ryc. 7). Wyniki tych analiz pozwoliły na optymalizację kształtu formy ze względu na obciążenia wiatrem (ryc. 7a). Wykonano także testy w tunelu aerodynamicznym na modelu w skali 1 : 64. Przed fabrykacją paneli testowano również segment prototypowy, badając zachowania paneli przy obciążeniu wiatrem (ryc. 7b).

Pliki z danymi cyfrowymi zostały następnie wyeksportowane do Tekla Structures, gdzie sporządzono ostateczny model do produkcji elementów okładzinowych i strukturalnych. Po negocjacjach z chińskim zespołem badawczym nad transferem technologii budowy nowoczesnej maszyny do wytwarzania okładzin aluminiowych rozpoczęto ich produkcję z użyciem reprogramowalnej formy negatywowej o podwójnej i pojedynczej krzywiznie, na której odciskano panele (ryc. 8). Efektem ubocznym zbudowania takiej maszyny było opracowanie i zgłoszenie sześciu patentów na informacje technologiczne związane z produkcją paneli.

Opracowano również metodę wtórnego cięcia paneli wieloosiową wycinarką laserową. Cały proces produkcji paneli zajął rok i osiem miesięcy, co – jak twierdzą przedstawiciele firmy Samsung C&T – przy użyciu tradycyjnych maszyn i narzędzi zajęłoby około 20 lat.

Modelowanie parametryczne struktury nośnej powierzchni wykonane zostało za pomocą oprogramowania Digital Project Gehry Technologies (ryc. 7). Program ten powstał w 2004 roku i przeznaczony jest do projektowania obiektów krzywoliniowych o złożonej geometrii. Oparty został na CATIA V5 – oprogramowa-



**Ryc. 7.** Zaha Hadid Architects, Dongdaemun Design Plaza, testy obciążenia wiatrem w tunelu aerodynamicznym oraz analizy CFD; źródło: dzięki uprzejmości Zaha Hadid Architects/source: courtesy Zaha Hadid Architects

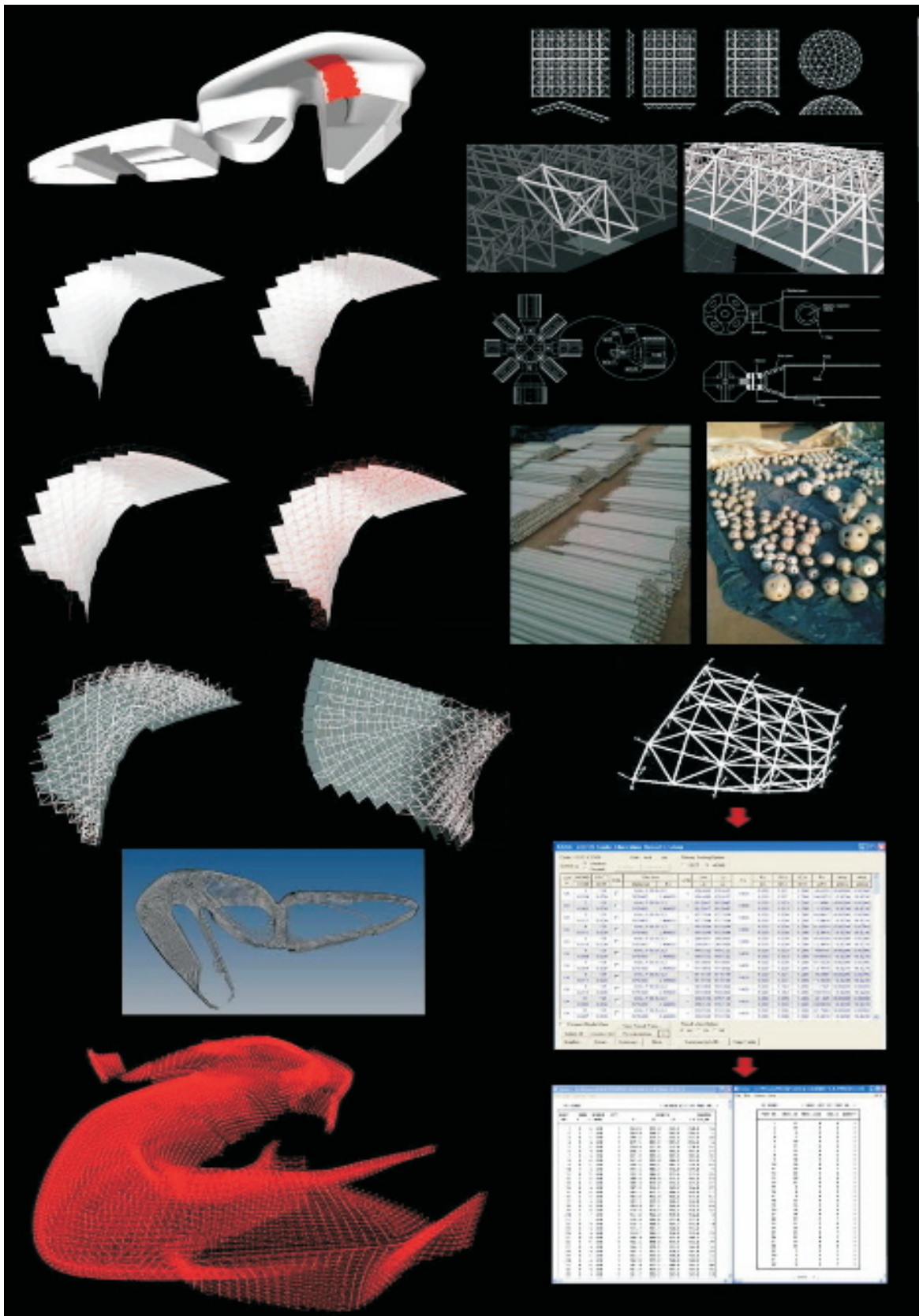




**Ryc. 8.** Reprogramowalna forma negatywowa o podwójnej i pojedynczej krzywiznie, na której odciskano panele dla DDP; źródło: dzięki uprzejmości Zaha Hadid Architects/source: courtesy Zaha Hadid Architects

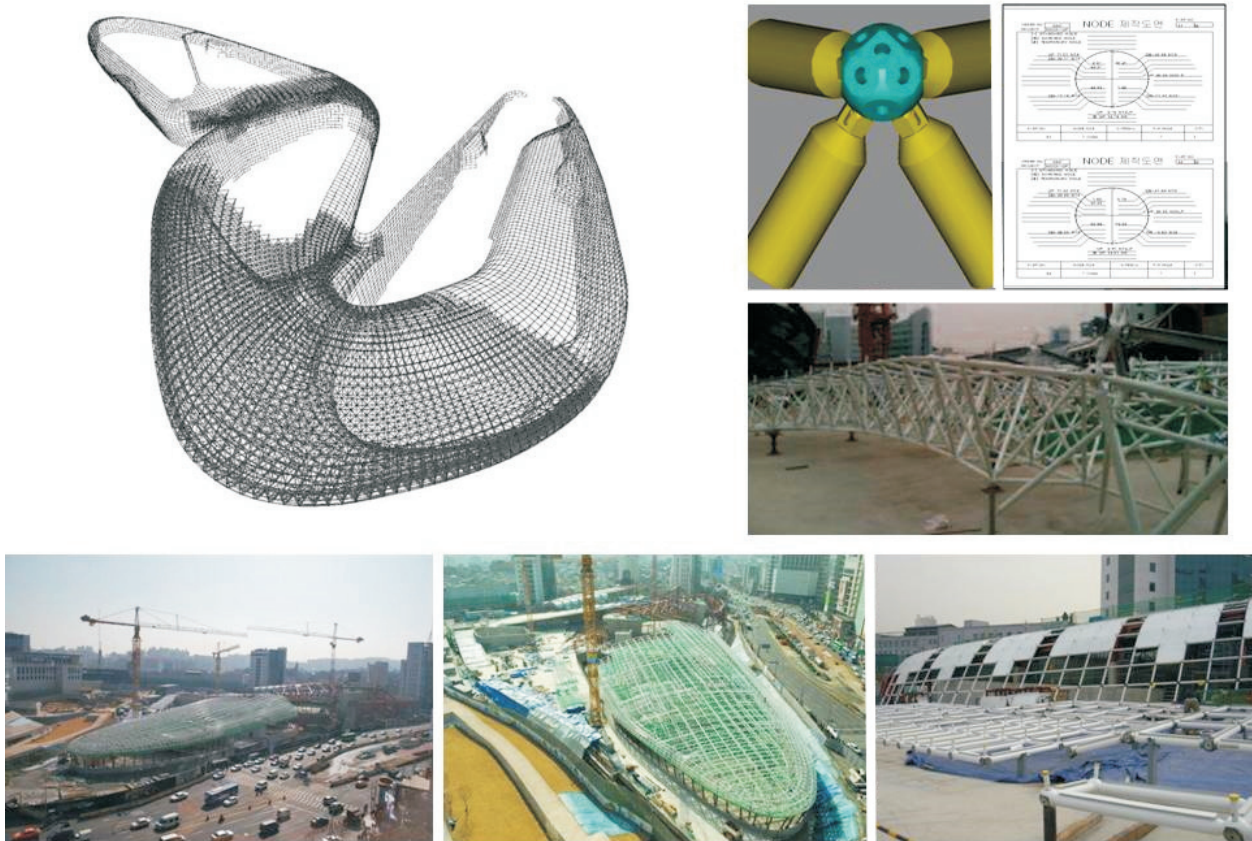
niu, które zrewolucjonizowało przemysł motoryzacyjny w ubiegłym wieku. Digital Project pozwala na modelowanie obiektów w BIM i CAD dzięki modelerowi 3D, który umożliwia zaawansowane modelowanie struktur niezależnie od ich złożoności geometrycznej. Wykonanie w Rhinoceros podziału na panele zewnętrzne nieco skorygowało kształt przyjętej powierzchni obiektu. Tak zoptymalizowana powierzchnia parametryczna DDP została wyeksportowana do modelera Digital Project GT w celu zaprojektowania jej struktury nośnej. Sięgnięto po rozwiązania prętowe, które zostały wypracowane i sprawdzone przez Buckminstera Fullera (1895–1983) w drugiej połowie minionego stulecia. Topologiczna geometria Fullera oparta na czworościanie rewolucjoni-

zowała wówczas myślenie inżynierskie. Dowiódł on, że każda struktura powinna być rozumiana jako przejaw właściwych jej procesów tworzących sieć relacji, które są z natury dynamiczne. Zaprojektowany przez Fullera tzw. *octet truss* jest jednorodną strukturą, silniejszą od innego układu prętowego [A.L. Loeb 1976]. *Octet truss* okazał się niezwykle przydatny w strukturalnym ukształtowaniu krzywoliniowej powierzchni swobodnej DDP, stanowiącej integralny element obiektu. Pręty stalowe połączone zostały w węzłach kulowych, w których wcześniej nawiercono otwory montażowe, zgodnie z cyfrową specyfikacją. Z kolei aluminiowe panele zainstalowano poprzez łącza śrubowe w dystansach co 25 mm do stalowej konstrukcji wsporczej, której



**Ryc. 9.** Zaha Hadid Architects, Dongdaemun Design Plaza, parametryczne modelowanie obiektowe prętowej struktury nośnej powierzchni obiektu i obliczenia statyczne, specyfikacja elementów (Digital Project GT); źródło: dzięki uprzejmości Zaha Hadid Architects/source: courtesy Zaha Hadid Architects





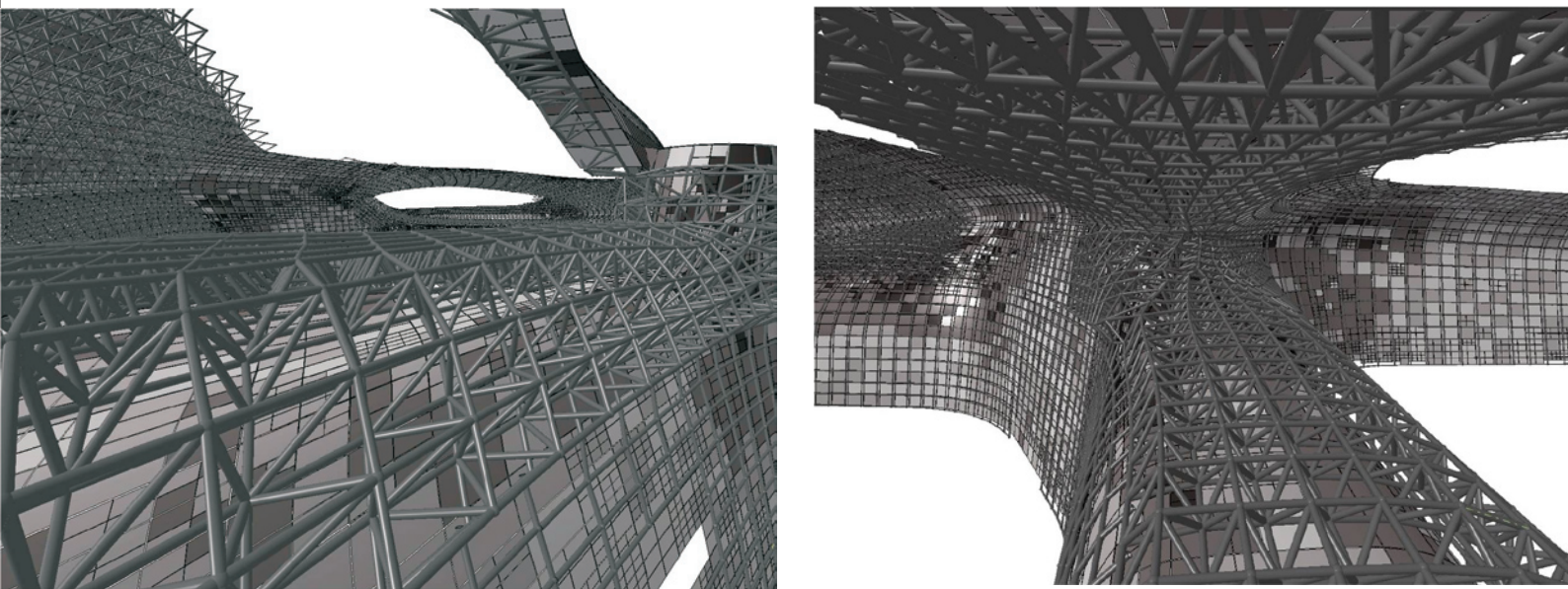
**Ryc. 10.** Zaha Hadid Architects, Dongdaemun Design Plaza, model parametryczny struktury nośnej powierzchni obiektu i przygotowanie do fabrykacji prętów i węzłów (Digital Project GT); źródło: dzięki uprzejmości Zaha Hadid Architects/source: courtesy Zaha Hadid Architects

pręty miały 30 mm średnicy. Pod okładziną aluminiową znajdują się 16-centymetrowa warstwa izolacji termicznej, chroniona na wewnętrznym i zewnętrznym odcinku poprzez powłokę zapobiegającą przenikaniu wody, oraz 11-centymetrowa warstwa akustyczna pochłaniająca dźwięk. Niezawodność ścian żelbetowych była zweryfikowana poprzez testy wykonane na prototypach w tunelach aerodynamicznych.

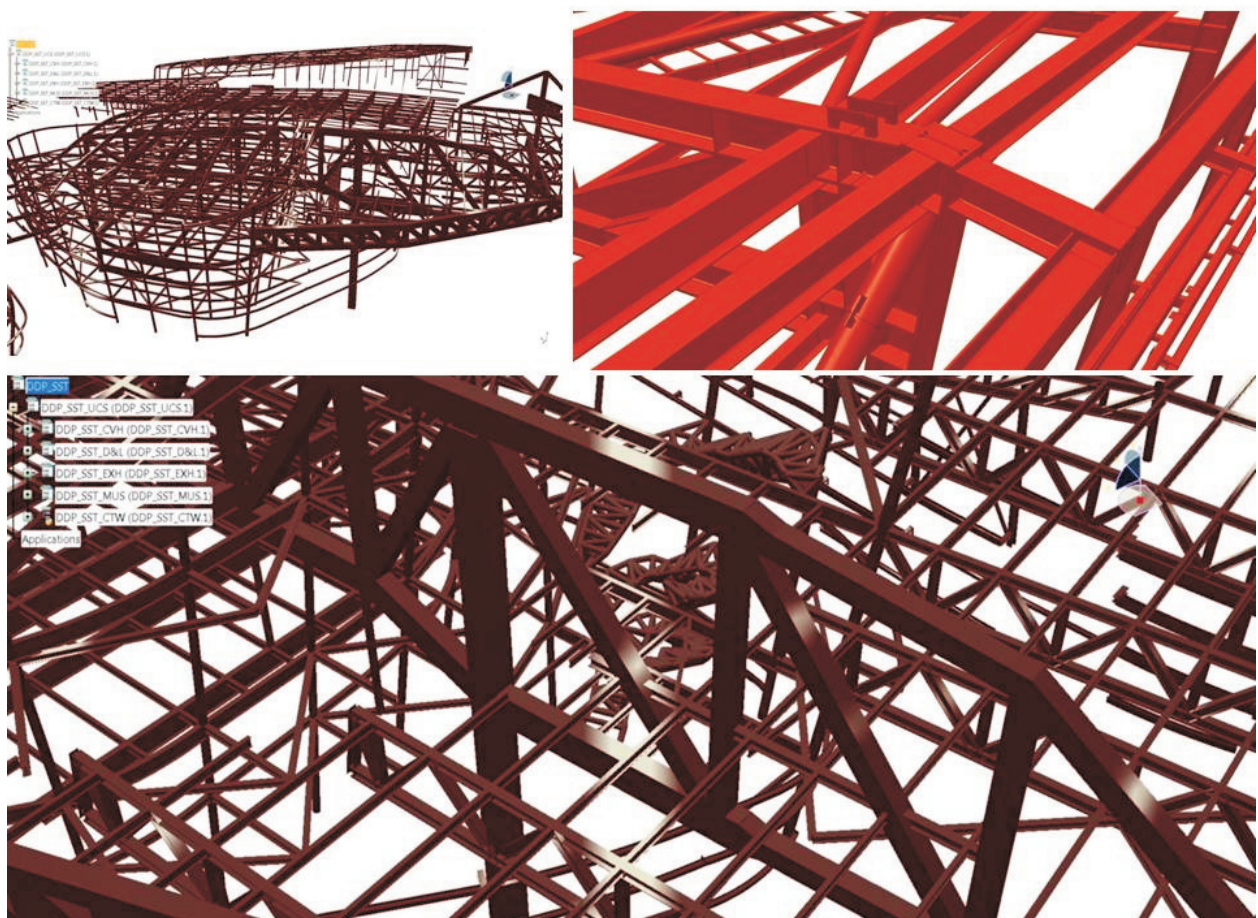
Dongdaemun Design Plaza jest budowlą, w której zastosowano kilka systemów konstrukcyjnych współpracujących ze sobą nawzajem. Wymagało to skoordynowania działań oraz szybkiej i bieżącej wymiany danych projektowych, co bez technologii BIM byłoby niemal niemożliwe. Samonośne przekrycie strukturalne, (ryc. 9, 10) wsparte zostało na stalowych dźwigarach kratowych (ryc. 12). Z nimi także skorelowano systemy wykończenia wewnątrz oraz instalacje oświetlenia i klimatyzacji. Stropy, schody i pomosty zaprojektowano jako niezależne autonomiczne ustroje żelbetowe (ryc. 13). Projekt wykonawczy podzielono na 10 sektorów i 221 podstref, dla których opracowano wszystkie detale konstrukcyjne i montażowe.

W pełni wykorzystano potencjał narzędzi modelowania parametrycznego zawartych w programie Digital Project GT, który „wyróżnia się modelerem obiektowym opartym na historii, podczas gdy inne oprogramowania do modelowania parametrycznego CAD sklasyfikowane są jako bezpośrednie modelery. Wszystkie modele uzyskały wzajemne odniesienia w otwartej i nieograniczonej sieci modeli i podmodeli, do których dostęp mieli nie tylko projektanci Zaha Hadid Architects, lecz także lokalni architekci z Samoo Architects & Engineers, inżynierowie z Ove Arup & Partners i wielu innych przedstawicieli branż projektowych oraz konsultantów, jak też wykonawca Samsung C&T. W modelerze opartym na historii graficzny interfejs użytkownika (GUI) zawiera drzewo danych zapisujące każdy krok procesu modelowania w kolejności chronologicznej poprzez wykaz wszystkich wykonanych poleceń i powiązanych relacji modelu” [D.K. Andersen 2015, s. 10]. Dzięki temu zespół projektowy miał pełną kontrolę nad projektem, który mógł być stale testowany i dostosowywany do wymagań klienta i różnych branż projektowych w efektywnym przepływie pracy.



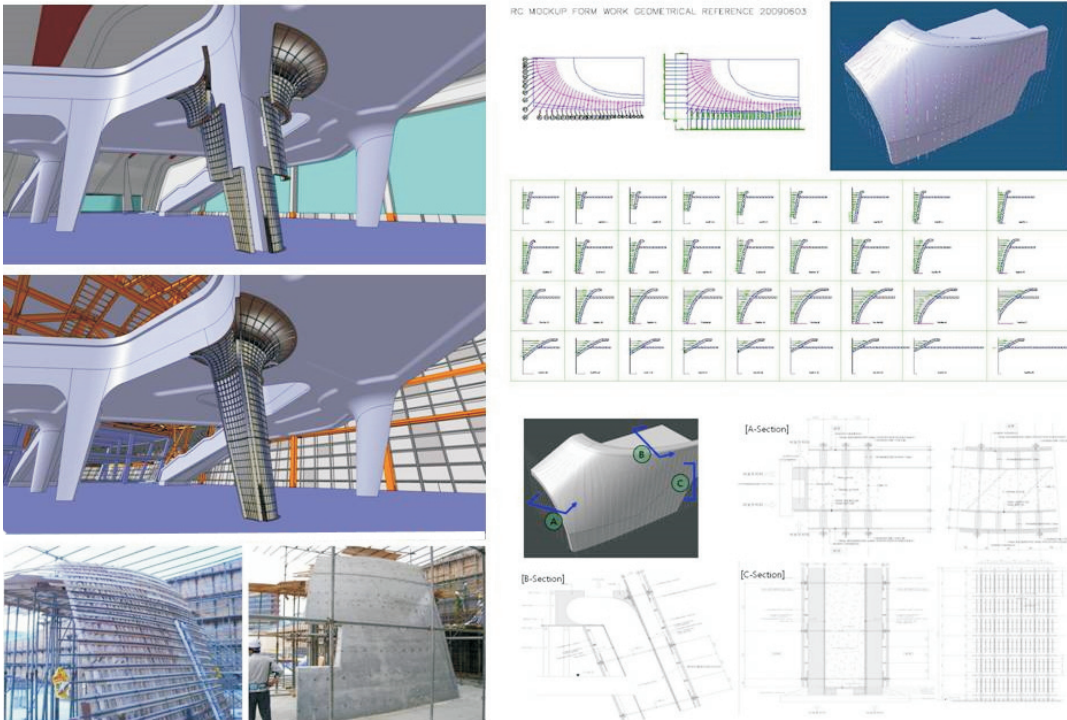


**Ryc. 11 a-b.** Zaha Hadid Architects, Dongdaemun Design Plaza, parametryczny model obiektowy (BIM) struktury prętowej powierzchni z panelami zewnętrznymi (Digital Project GT); źródło: dzięki uprzejmości Zaha Hadid Architects/source: courtesy Zaha Hadid Architects

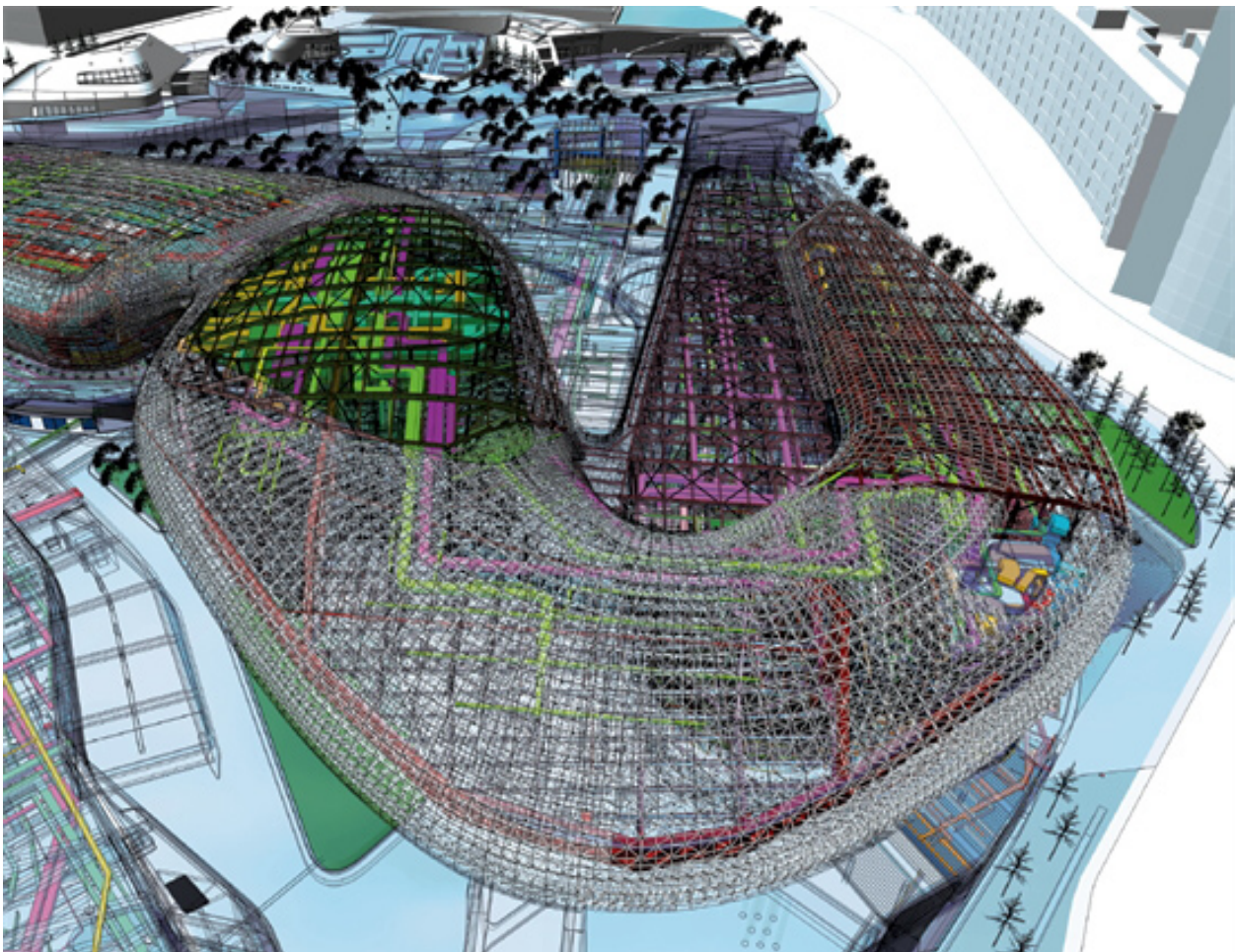


**Ryc. 12.** Zaha Hadid Architects, Dongdaemun Design Plaza, parametryczne modele BIM stalowej konstrukcji nośnej (Digital Project GT); źródło: dzięki uprzejmości Zaha Hadid Architects/source: courtesy Zaha Hadid Architects





**Ryc. 13.** Zaha Hadid Architects, Dongdaemun Design Plaza, parametryczne modelowanie BIM struktury i elementów żelbetowych (Digital Project GT); źródło: dzięki uprzejmości Zaha Hadid Architects/source: courtesy Zaha Hadid Architects



**Ryc. 14.** Zaha Hadid Architects, Dongdaemun Design Plaza, kompleksowy model BIM (Gehry Technologies); źródło: dzięki uprzejmości Zaha Hadid Architects/source: courtesy Zaha Hadid Architects



### 3.2. King Abdulaziz Centre for World Culture w Dhahranie

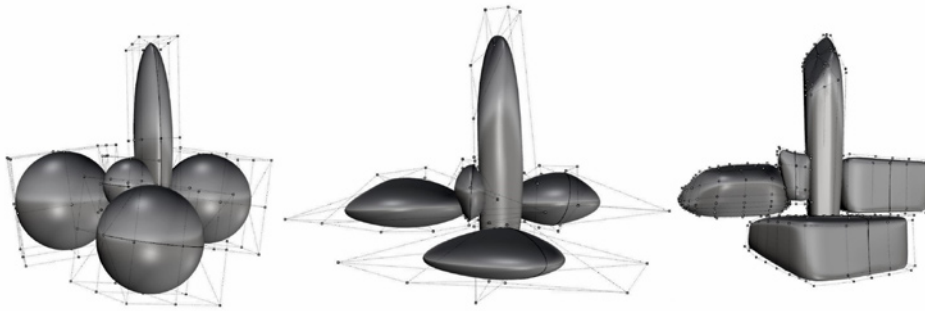
Oddane do użytku w 2017 roku King Abdulaziz Centre for World Culture ITHRA (Centrum Kultury Światowej Króla Abdulaziza) w Dhahranie, projektu biura Snøhetta z Norwegii, to jeden z prestiżowych obiektów w Arabii Saudyjskiej. Służy głównie do organizowania imprez i wydarzeń kulturalnych. Centrum to zostało zainicjowane w 2006 roku przez koncern paliwowo-chemiczny Saudi Aramco, który aktyw-

nie promuje kulturę w Królestwie Arabii Saudyjskiej. Obiekt ten, w pięciu niezależnych bryłach, oferuje 100 000 m<sup>2</sup> powierzchni użytkowej na różnego rodzaju wydarzenia kulturalne. Są tu także ekspozycje stałe, muzea, archiwa, kino, sale koncertowe, restauracje, kluby etc. Zlokalizowany na skraju pól naftowych i kamienistej pustyni budynek miał nawiązywać do naturalnych form charakterystycznych dla tego obszaru i stanowić jednocześnie rodzaj oazy dla kultury światowej.

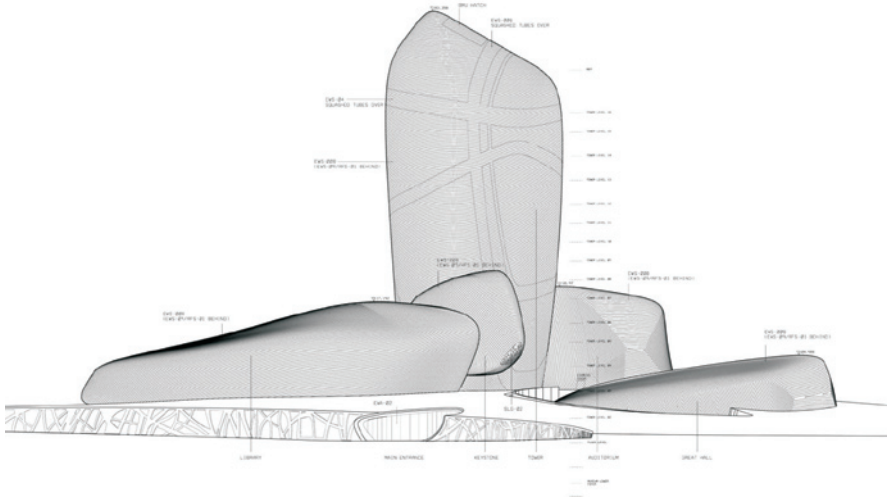


**Ryc. 15 a-b.** Snøhetta, King Abdulaziz Centre for World Culture, Dhahran, Arabia Saudyjska, 2006–2017, **a)** wizualizacja obiektu wraz z zagospodarowaniem otoczenia, **b)** widok zrealizowanego obiektu od strony wjazdu na górny poziom; źródło: dzięki uprzejmości Snøhetta/source: courtesy Snøhetta





**Ryc. 16a.** Snøhetta, King Abdulaziz Centre for World Culture, modelowanie parametryczne jednopowłokowych brył obrotowych (Rhinceros); źródło: opr. Karol G, Kowalski



**Ryc. 16b.** Snøhetta, King Abdulaziz Centre for World Culture, finalny model powierzchniowy w skali i z wymiarowaniem (Rhinceros); źródło: dzięki uprzejmości Snøhetta/source: courtesy Snøhetta



**Ryc. 16c.** Snøhetta, King Abdulaziz Centre for World Culture, sytuacja w skali (Rhinceros); źródło: dzięki uprzejmości Snøhetta/source: courtesy Snøhetta

Architektura Centrum Kultury Światowej Abdula-  
ziza to metafora kamieni zebranych na pustyni i ułoż-  
nych tak, aby powstała z nich oryginalna kompozycja,  
która ma jednocześnie manifestować nową erę w pro-  
jektowaniu i wznoszeniu budowli (ryc. 15). Realizacja  
obiektu wymagała szybkiego przepływu danych pro-  
jektowych pomiędzy architektami, konstruktorami, pro-

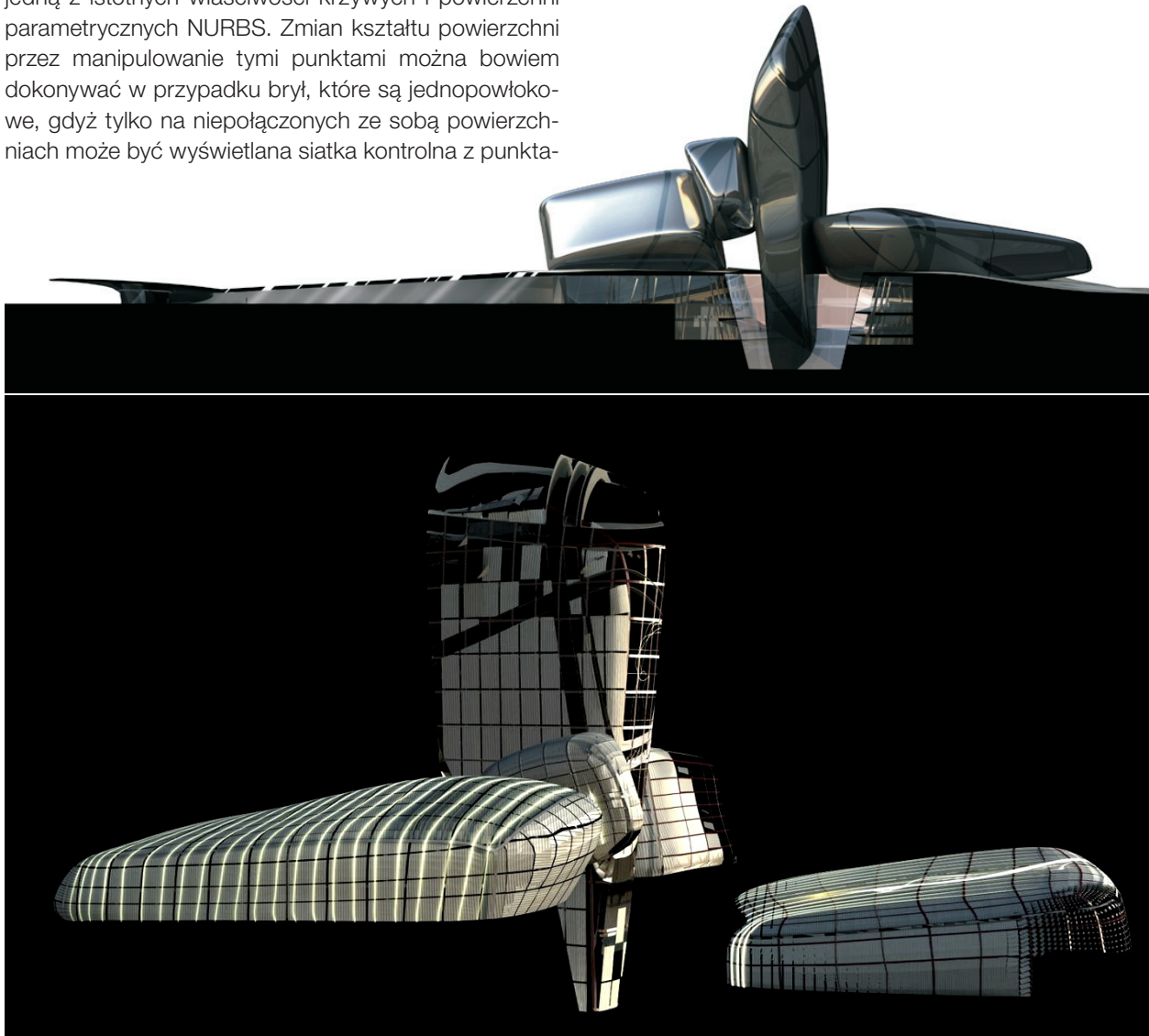
jektantami elewacji i firmami zajmującymi się fabrykacją  
elementów budowlanych oraz ich montażem na placu  
budowy. Skorzystano wówczas z poziomego BIM 4 w wer-  
sji oferowanej przez firmę Revit Autodesk, która nie jest  
przeznaczona do pracy na formach swobodnych, tak  
jak Digital Project GT. Do opracowania projektu wyko-  
rzystano zatem narzędzia cyfrowe CAD/CAE/CAM za-  
warte w programach Rhinceros 3D, Grasshopper, Py-  
thon (który jest językiem skryptowym stosowanym m.in.  
w Rhinceros 3D/Grasshopper) oraz CATIA. Użyto tak-  
że programu Tekla Structures, który w środowisku BIM  
jest zdolny do modelowania trójwymiarowych elemen-  
tów strukturalnych oraz wspomaganie produkcji i monta-  
żu. Program ten dobrze współpracuje z programem  
Revit Autodesk. Dlatego też zaangażowane do wykona-  
nia projektu realizacyjnego Buro Happold Engineering  
zleciło firmie Revit opracowanie aplikacji usprawniającej  
automatyczne tworzenie modeli cyfrowych w integracji  
z narzędziami zarządzania danymi BIM (tak jak w opro-  
gramowaniu Digital Project GT). Usprawniono zatem  
procesy związane z projektowaniem narzędziami Tekla  
Structures oraz koordynacją produkcji, a poszczególne  
pliki mogły być bezproblemowo eksportowane i odczy-  
tywane przy zastosowaniu formatów DWG/DXF. Aplikacja  
ta była również wykorzystywana w złożonych procesach  
oceny niezawodności konstrukcji, usprawnieniu

zliczania i rozmieszczenia elementów konstrukcyjnych oraz odporności struktury na siłę wiatru.

Modelowanie parametryczne Centrum Kultury Światowej Króla Abdulaziza odbywało się w kilku etapach. Firmy Inoclad GmbH oraz Imagine Computation GmbH użyły kombinacji ręcznego modelowania w Rhinoceros 3D, definicji tworzonych w nakładce Grasshopper i języka skryptowego Python. Za rozwiązania strukturalne powłoki budynku odpowiedzialny był architekt Mohamed Naeim A. Ibrahim, ekspert w dziedzinie modelowania parametrycznego i generatywnego z MNA Design Technologies.

W pierwszym etapie powstał model w programie Rhinoceros 3D/Grasshopper opartym na krzywych i powierzchniach NURBS. Manipulując punktami kontrolnymi podstawowych brył geometrycznych (sfera i elipsoida), modelowano wcześniej przyjętą ideę formy złożonej z pięciu „kamieni” – segmentów budowli o zróżnicowanej funkcji (ryc. 16a). Punkty kontrolne są jedną z istotnych właściwości krzywych i powierzchni parametrycznych NURBS. Zmian kształtu powierzchni przez manipulowanie tymi punktami można bowiem dokonywać w przypadku brył, które są jednopowłokowe, gdyż tylko na niepołączonych ze sobą powierzchniach może być wyświetlana siatka kontrolna z punkta-

mi w celu ich edycji. Warunek ten doskonale spełniają takie bryły, jak np. sfera, torus czy elipsoida. Przy modelowaniu parametrycznym brył obiektu (ITHRA) zastosowano następujące narzędzia: przebudowywanie liczby punktów kontrolnych (co wiąże się ze zwiększeniem ilości izoparm przebiegających w kierunku U i V), narzędzie usuwania i dodawania punktów kontrolnych oraz „edycji wagi punktu kontrolnego”. Podstawowe przekształcenia i operacje na punktach kontrolnych nie przyczyniły się do zmiany ciągłości krzywizny form geometrycznych obiektu, ale za to dzięki tym działaniom uzyskano charakterystyczne zaokrąglenia (o zmiennym promieniu), które zaczęły przypominać wyoblone krawędzie znajdujące się na każdej z pięciu wymodelowanych form. Kolejnym krokiem było interpolowanie krzywych (zamkniętych) na powierzchniach swobodnych, dzięki którym wykonano charakterystyczne pasma przeszkleń, szczególnie widoczne na dominującej 98-metrowej wieży (ryc. 16b).



**Ryc. 17 a-b.** Snøhetta, King Abdulaziz Centre for World Culture, geometryzacja powierzchni swobodnych przez podział na elementy do fabrykacji; źródło: dzięki uprzejmości Snøhetta/source: courtesy Snøhetta

W drugim etapie, po analizach krzywizny i testach CFD, dokonano korekt geometrii brył i rozwiązano przyjęty program użytkowy obiektu, co spowodowało pewne zmiany kształtu brył. Po uwzględnieniu tych korekt i wymiarowania można już było wygenerować w skali finalny powierzchniowy model parametryczny 3D całości ITHRA (ryc. 17b-c) i opracować otoczenie obiektu (ryc. 14a).

Etap trzeci obejmował opracowanie strategii dotyczącej sposobu nadania struktury powierzchniom każdej z pięciu form swobodnych (składowych obiektu), jak też określenie, co będzie ich konstrukcją nośną, a co substratem. Na tym etapie projektu realizacyjnego na podejmowanie decyzji wpływają możliwości fabrykacji CNC, jakimi dysponuje wykonawca projektu, oraz koszty. Przyjmowane są różne strategie geometryzowania powierzchni form swobodnych do wytwarzania. Dwuwymiarowa fabrykacja często obejmuje konturowanie triangulacyjne lub tessellacje poligonalne. Stosuje się także powierzchnie o podziałach równoległych, rozwijalne albo rozkładalne. Architektom, wytwórcom i wykonawcom chodzi o to, żeby z powierzchni złożonej geometrycznie wyprowadzić jak największą liczbę dwuwymiarowych płaskich komponentów. W przypadku form swobodnych ITHRA wybrano dwie strategie. Pierwsza z nich dotyczyła podziału powierzchni na panele zewnętrzne, a druga konstrukcji nośnej. Najpierw podzielono powierzchnie brył na czworokątne segmenty (panelizacja) odpowiedniej wielkości (podział ten wyznaczał także strukturę mocującą), a następnie wykonano konturowanie powierzchni (tam, gdzie to było możliwe), aby wyznaczyć geometrycznie konstrukcję nośną (ryc. 17b). Konturowanie jest konceptualnie takim samym procesem jak *lofting* w budowie okrętów, podczas którego określany jest kształt kadłuba przez sekwencje płaskobocznych przekrojów poprzecznych. Konturowanie sekwencji sekcji planarnych, często do siebie równoległych i rozmieszczonych w równych odstępach, jest wykonywane automatycznie na parametrycznym modelu geometrycznym przez narzędzia modelujące. Dane te służą do bezpośredniej artykulacji komponentów strukturalnych budowli. Tak wyprowadzone linie przekrojowe kreują rodzaj siatki konturowej, którą można dalej manipulować w przestrzeni cyfrowej, żeby stworzyć abstrakcyjny szkielet strukturalny powierzchni lub budowli. Może on być poddawany analizom konstrukcyjnym wykonywanym przez narzędzia cyfrowe, aby precyzyjnie określić wszystkie elementy tej struktury [K. Januszkiewicz 2010, s. 72]. W wyniku przeprowadzonych operacji geometrycznych otrzymano ponad 3000 modułów, a każdy z nich zawierał po kilkaset różnych

elementów z dokładnym wskazaniem ich umiejscowienia w obiekcie (ryc. 16b). Każdemu z tych elementów przypisano metadane, tworząc gotowe pliki IFC, najpierw w celach projektowych, które następnie zaimportowano do Tekla Structures, by przygotować elementy do fabrykacji, np. konstrukcji stalowej (ryc. 18). Pliki IFC to otwarty opis danych BIM. Ich stworzenie było koniecznością, najlepszym rozwiązaniem dla sprawnej współpracy z wytwórczą Inoclad Engineering GmbH.

Dla pracujących w oprogramowaniu Tekla Structures wyzwaniem była praca na modelach, które *de facto* już zostały ukończone i zamknięte, a w których trzeba było dokonać zmian w wymiarach i geometrii poszczególnych elementów budowli. Takich problemów nie dostarcza Digital Project GT. Pożądanym sposobem pracy nad projektem byłaby automatyczna wymiana danych i przekształcanie modelu z Rhinoceros 3D w model, nad którym można by było pracować w Tekla Structures. Taka wymiana danych jest możliwa, gdy do komponentu Geometry Gym w Grasshopper zaimplementuje się technikę inżynierii odwrotnej. Wtedy praca nad elementami składowymi obiektu polega na szukaniu krawędzi ich powierzchni (zaczynając od najdłuższych) i określaniu, czy przypisane przekroje poprzeczne obiektów dopasowane są do wymiarów danych profili. Aplikacja Geometry Gym została opracowana dla Grasshoppera, aby umożliwić generowanie elementów do Tekla z niezbędnymi cechami i relacjami występującymi w obiektach z Rhinoceros 3D. Było to spore ułatwienie dla firmy Inoclad Engineering GmbH, która później wykorzystywała możliwość przetwarzania obiektów w procesie tworzenia definicji w Grasshopper za pomocą komponentów Geometry Gym (ryc. 19a-b). Dzięki temu uzyskano również bazę danych, w której użytkownik może przeprowadzać operacje wymiany obiektów generowanych w modelu z Tekla za pomocą metod dostępnych w Tekla API. Dla drugiego wykonawcy (firma SPT) zdecydowano się na podobny krok. Zamiast plików Rhino (.3dm) wykonano pliki (.ifc) odczytywane w openBIM [J. Mirtschin 2016, s. 1–18].

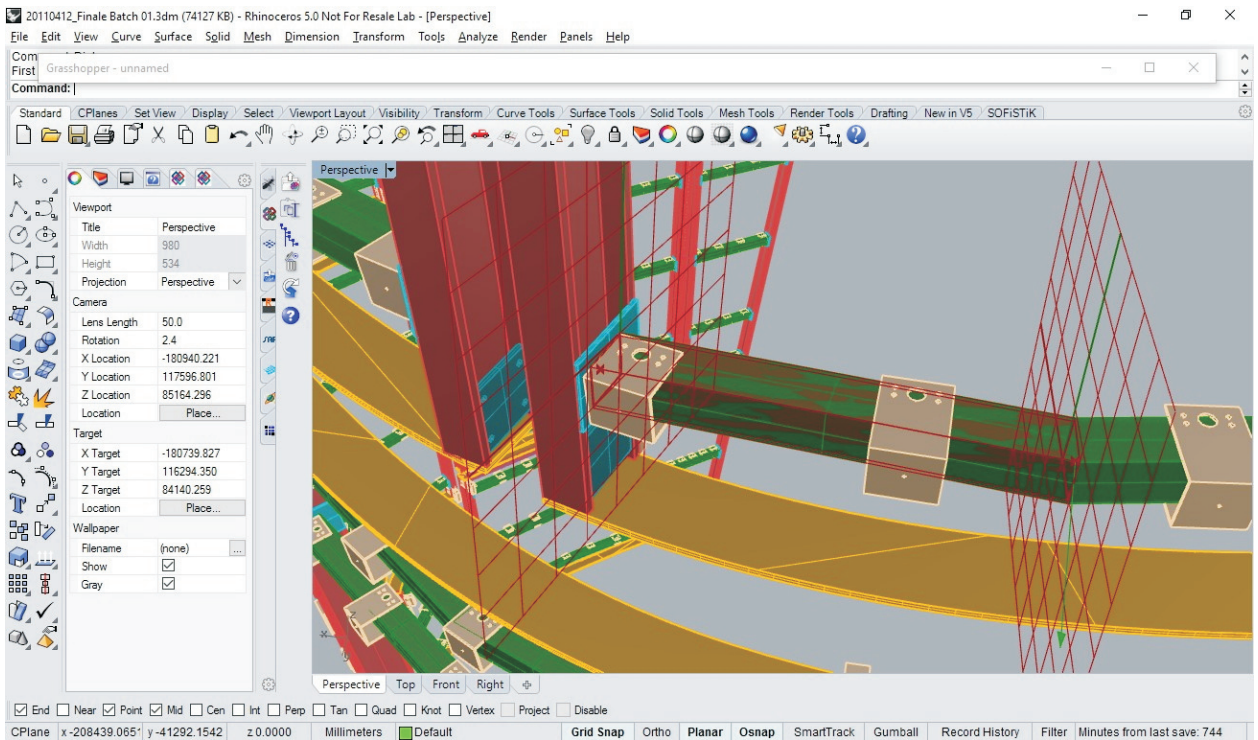
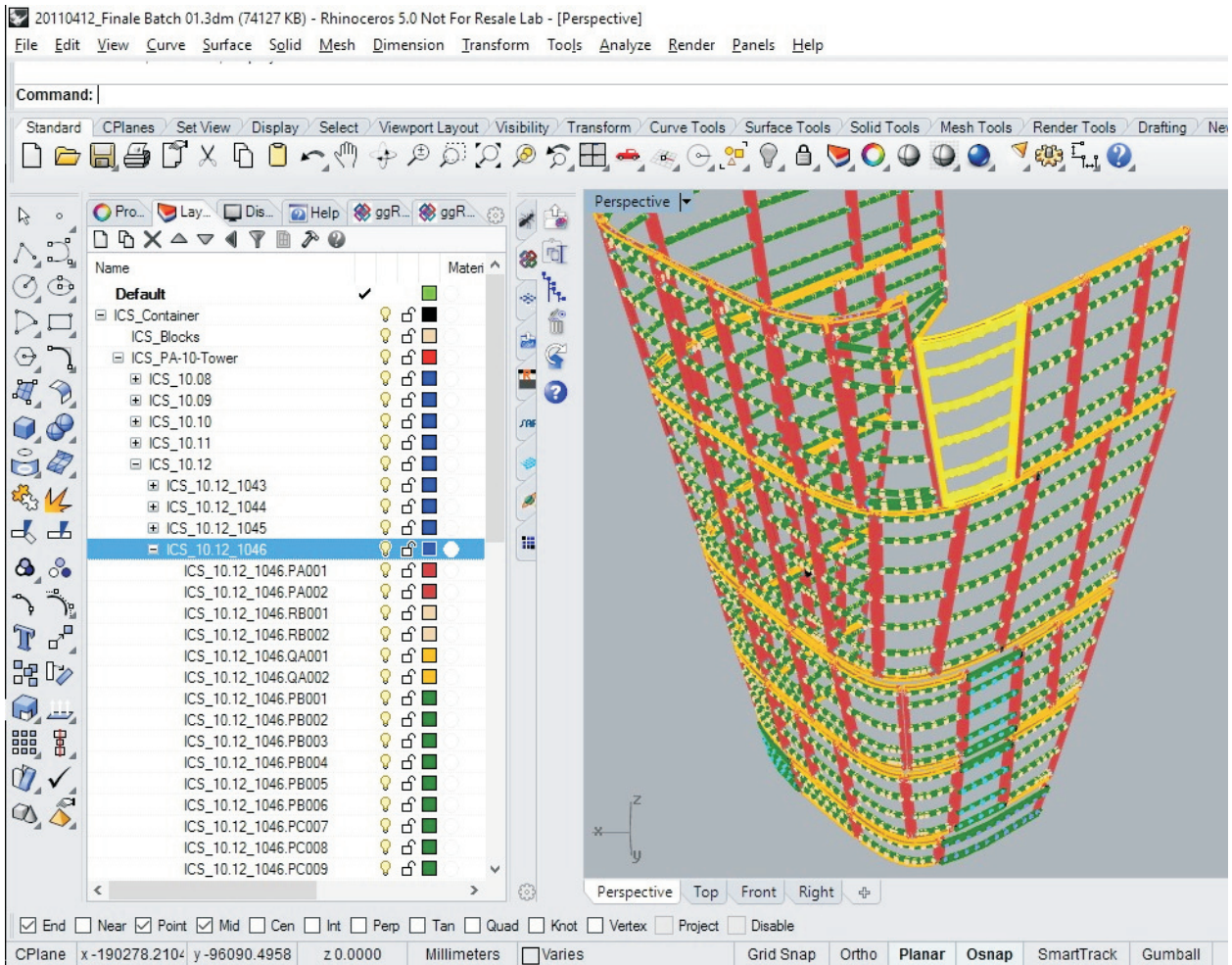
Należy podkreślić, że na każdym etapie projektu modele parametryczne były nieustannie testowane zarówno w oprogramowaniu opracowanym przez Revit, jak i Tekla Structures, a konstruktorzy i architekci mieli możliwość powrotu do ich pierwotnych wersji, co było korzystne ze względu na konieczność uniknięcia błędów skutkujących katastrofą budowlaną w przypadku nieodwracalności dokonanych zmian w projekcie przy kolejnych jego zapisach i edycjach.





**Ryc. 18 a i b.** Snøhetta, King Abdulaziz Centre for World Culture, montaż na placu budowy; źródło: dzięki uprzejmości Snøhetta/source: courtesy Snøhetta





Ryc. 19 a-b. Snøhetta, King Abdulaziz Centre for World Culture, modelowanie komponentów fasady za pomocą aplikacji Geometry Gym; źródło: dzięki uprzejmości Snøhetta/source: courtesy Snøhetta

#### 4. ROLA MODELOWANIA PARAMETRYCZNEGO W TECHNOLOGII BIM

Aby określić rolę modelowania parametrycznego w cyfrowym opracowaniu zintegrowanej dokumentacji projektu, należy przypomnieć, czym jest projektowanie i modelowanie parametryczne. Chodzi tu bowiem o proces pozwalający na wyrażanie parametrów i zasad, przez które są definiowane, kodowane i wyjaśniane relacje pomiędzy zamierzeniem a odpowiedzią projektową [M. Erlhoff, T. Marshall (red.) 2008, s. 128]. Modelowanie parametryczne zaś, odwołując się bezpośrednio do równań parametrycznych, jest graficznym opisem tych relacji w odniesieniu do problemu projektowego [E.W. Weisstein 2002, s. 2150]. Technologia BIM natomiast opisuje obiekty budowlane i ich relacje, które mogą być wykorzystane do wyrażania intencji projektowych, z kolei modelowanie parametryczne pozwala na tworzenie i zarządzanie tymi relacjami. Szczególną uwagę zwracają na to Karen Kensek i Douglas Noble (2014), określając nie tylko związki, lecz także wskazując różnice występujące między BIM a modelowaniem parametrycznym [K.M. Kensek, D.E. Noble 2014, s. 6061].

Większość aplikacji BIM bazuje na parametrycznym modelowaniu obiektowym mającym zdolność definiowania poszczególnych obiektów, których kształt i inne właściwości można kontrolować parametrycznie. Ma to również zastosowanie do zespołów obiektów, co pozwala na kontrolę zbiorów danych przez parametry [Ch. Eastman, P. Teicholz, R. Sacks, K. Liston 2011, s. 589].

Parametryczne modelowanie obiektowe nie dotyczy jednak struktur o zmiennej geometrii a stałych właściwościach [Ch. Eastman, P. Teicholz, R. Sacks, K. Liston 2011, s. 589].

W systemie BIM każdy obiekt może być tworzony lub edytowany poprzez jego parametry, reguły, dane zewnętrzne, które decydują o konstrukcji i cechach geometrycznych. Parametry i dane w wymiarowo sterowanej strukturze parametrycznej są otrzymywane za pośrednictwem baz danych lub są implementowane do graficznych interfejsów użytkownika (GUI). Podkreślić należy, że komunikacja pomiędzy bazami danych obejmującymi wszystkie aspekty projektu (od danych środowiskowych i wymagań programowych aż po materiały i kosztorysy) oraz pomiędzy wszystkimi osobami zaangażowanymi w proces projektowania (od architektów i inżynierów po inwestorów i budowniczych) jest umożliwiona w BIM przez zbiór protokołów [S. Vergopoulos, D. Gourdoukis 2012, s. 145]. Następnie dane wejściowe w postaci parametrów są przetwarzane za pomocą instrukcji, formuł matematycznych czy algorytmów obliczeniowych, których logika działania odpowiada za pośrednictwo twórczych zamierzeń projektanta z komputerem.

Podstawową rolą modelowania parametrycznego w BIM jest identyfikacja konfliktów przestrzennych, które są od siebie współzależne. Modelery parametryczne mogą uwzględniać takie kolizje w relacjach i automatycznie aktualizować układ, aby ich uniknąć. Inne modelery tego nie robią, gdyż nie zawierają wbudowanych w nie reguł [Ch. Eastman, P. Teicholz, R. Sacks, K. Liston 2011, s. 45]. Parametryczne modelery budynków w BIM powinny zapewniać nieograniczone możliwości prezentacji projektu, efektywność i niezawodność procesu oraz lepsze skoordynowanie informacji o budynku, co sprawia, że takie rozwiązanie jest spójniejsze wewnętrznie niż oprogramowanie CAD dedykowane dla BIM. Dennis Shelden (2009) zauważa, że modelowanie parametryczne w BIM pozwala na szczegółową logikę organizacji systemu komponentów, która może być zakodowana w generatywnych podejściach, tak aby ten poziom zrozumienia projektu mógł być stosowany jako część technik w formalnych technikach generatywnych [D. Shelden 2009, s. 82].

Ponadto rolą modelowania parametrycznego w technologii BIM jest także usprawnienie procesu zarządzania na różnych poziomach projektu i budowy, co w szczególności (oprócz sprawdzania wspomnianych konfliktów przestrzennych) dotyczy takich możliwości, jak: generowanie wizualizacji w dowolnym momencie projektu, automatyzacja części i produkcji montażowej (CAM), sekwencyjność konstrukcji oraz przeprowadzanie badań i testów materiałowych [R. Garber 2009].

Zazwyczaj projektanci są zmuszeni modelować przez proces złożony z parametrów i reguł. Wtedy zwiększa się zarówno złożoność zadań projektanta, jak i kontaktu na linii człowiek–komputer, co oznacza większą świadomość podejmowanych decyzji i znaczne wyzwanie dla osób zarządzających procesem modelowania parametrycznego oraz procesem powstawania obiektu w BIM. Modelowanie parametryczne przekształca bowiem modelowanie z narzędzia do projektowania geometrii w narzędzie, w którym zawiera się wiedza projektanta. Ponadto użytkownik w procesie projektowania ma odpowiedni zakres kontroli nad tworzeniem i automatycznym aktualizowaniem obiektów, co wymaga technicznej i fachowej wiedzy [N.A. Megahed 2015, s. 174–183]. Jak zauważają Lee, Sacks i Eastman (2006), zdolność tej kontroli wynika z tego, że w modelowaniu parametrycznym w BIM są mechanizmy do tłumaczenia i wstawiania wiedzy specjalistycznej w domenę w postaci wyrażen geometrycznych, które mogą automatyzować generowane informacje o budynku (zwłaszcza geometryczne) oraz pozwalają na szybką i interaktywną zmianę projektu w czasie rzeczywistym [G. Lee, R. Sacks, Ch.M. Eastman 2006, s. 758–776].



## PODSUMOWANIE

Przedstawione przykłady ukazują dwa różne podejścia do wykonywania projektu realizacyjnego z zastosowaniem technologii BIM. Złożona geometria DDP form swobodnych wymagała od zespołu pracy w środowisku BIM Digital Project GT w celu zidentyfikowania kolizji między poszczególnymi modelami koncepcyjnymi (Rhinoceros). Środowisko to także okazało się szczególnie skuteczne w ustaleniu relacji pomiędzy konstrukcją a systemami mechanicznymi, elektrycznymi i hydraulicznymi (MEP). Bez technologii BIM również nie udało się skoordynować złożonych mediów podziemnych dwóch pobliskich linii metra. Jednakże głównymi celami jej zastosowania w projekcie Dongdaemun były koordynacja przestrzenna i dostarczenie dokładnych danych produkcyjnych.

Budynek Abdul-Aziz Centre for World Culture jest przykładem tego, jak wybór komputerowych narzędzi projektowania zdeterminował sposób opracowania do realizacji projektu architektonicznego obiektu o formach swobodnych. W rezultacie oryginalny model parametryczny został przekształcony w zintegrowany model Tekla BIM, który posłużył do opracowania struktury obiektu. Projektanci, wykorzystując aplikację Grasshopper wraz z innymi niestandardowymi skryptami Pythona, musieli sami stworzyć nowe aplikacje, aby zautomatyzować koordynację, odniesienia i kodowanie (według numeru i koloru) dla każdej części fasady. Można było uniknąć tych problemów, pracując od początku z programem Digital Project GT. Realizacja projektu ITHRA uświadamia, jak ważna jest strategia sporządzenia projektu wykonawczego, wybór oprogramowania, które zapewnia sprawne nanoszenie zmian w obiektowych modelach parametrycznych BIM. Projektant bowiem opracowuje w przestrzeni wirtualnej model budowlany, który jest odzwierciedleniem różnorodnych danych o obiekcie zapisanych cyfrowo. Chociaż pomysł, aby dane o fizycznych i funkcjonalnych właściwościach budowli zamienić na operacyjny format cyfrowy nie jest taki nowy, to wciąż wymaga udoskonaleń wprowadzanych na podstawie doświadczeń projektantów i wykonawców.

## LITERATURA

1. **Afsari K., Shelden D.R., Eastman Ch.M. (2016)**, *Data Transmission Opportunities for Collaborative Cloud-Based Building Information Modeling*, SIGraDi, XX Congress of the Iberoamerican Society of Digital Graphics, Buenos Aires, s. 907–913.
2. **Aish R. (1986)**, *Building Modelling: The Key to Integrated Construction CAD*, CIB 5th International Symposium on the Use of Computers for Environmental Engineering related to Building.
3. **Al-Saudi A. (2017)**, *BIM 5D Tools Redefine Construction*, <https://thebimhub.com/2014/09/16/bim-5d-tools-define-construction/#.WZoki1FJaiM> (dostęp 21.08.2017).
4. **Andersen D.K. (2015)**, *Parametric Modelling for Point Support Optimisation of Plate and Shell Structures*, Technical University of Denmark Department of Civil Engineering, Lyngby.
5. **Arthur W.B. (2009)**, *The Nature of Technology*, Free Press, New York.
6. **Bernstein P. (2012)**, *Intention to Artifact*, w: Scott Marble (red.), *Digital Workflows in Architecture: Design – Assembly – Industry*, Birkhäuser, Basel, s. 72–73.
7. **Bazjanac V. (2007)**, *Impact of the U.S. National Building Information Model Standard (NBIMS) on Building Energy Performance Simulation*, Building Simulation, IBPSA, Beijing, s. 1377–1382.
8. **Eastman Ch., Teicholz P., Sacks R., Liston K. (2011)**, *BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Managers, Designers, Engineers, and Contractors*, 2<sup>nd</sup> Edition, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken.
9. **Eigensatz M., Kilian M., Schiffner A., Mitra N.J., Pottmann H., Pauly M. (2010)**, *Paneling Architectural Freeform Surfaces*, „SIGGRAPH, ACM Transactions on Graphics”, Vol. 29, No. 4, s. 1–10.
10. **Erlhoff M., Marshall T. (red.), (2008)**, *Design Dictionary: Perspectives on Design Terminology*, Birkhäuser, s. 128.
11. **Garber R. (2009)**, *Optimisation Stories: The Impact of Building Information Modelling on Contemporary Design Practice*, „Architectural Design”, Vol. 79, No. 2, s. 6–13.
12. **Institute of Electrical and Electronics Engineers (1990)**, *IEEE Standard Glossary of Software Engineering Terminology*, New York, s. 42.
13. **Januszkiewicz K. (2010)**, *O projektowaniu architektury w dobie narzędzi cyfrowych. Stan aktualny i perspektywy rozwoju*, Oficyna Wydawnicza PWr., Wrocław.
14. **Kensek K.M., Noble D.E. (2014)**, *Building Information Modeling: BIM in Current and Future Practice*, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken.
15. **Khedr A.M.S., Hegazy M.A. (2018)**, *Digital design in contemporary architecture as a tool not as an aim. Towards A Design framework for an identity-conscious Arab architecture*, International Journal of Application or Innovation in Engineering & Management (IJAEM) vol. 7, issue 7, July, s. 7–17.
16. **Kogut P., Tomana A. (2013)**, *Aplikacje 4D i 5D w środowisku BIM*, 20<sup>th</sup> International Conference on

- Computer Methods in Mechanics, Short Papers, Institute of Structural Engineering, Poznań.
17. **Kopka W. (2016)**, *Zintegrowane modelowanie i analizy w BIM z wykorzystaniem Dynamo*, „Mechanik” nr 7, s. 434.
  18. **Kornbau E. (2008)**, *The ABCs of the AEC Industry*, Zweig White Information Services, LLC, Fayetteville.
  19. **Laiserin J. (2007)**, *To BIMfinity and Beyond!*, „Cada-lyst” vol. 24, no. 11, s. 46–48.
  20. **Lee G., Sacks R., Eastman Ch.M. (2006)**, *Specifying Parametric Building Object Behavior (BOB) for a Building Information Modeling System*, „Automation in Construction”, No. 15, s. 758–776.
  21. **Loeb A.L. (1976)**, *Space Structures*, Reading, MA, Addison-Wesley.
  22. **Megahed N.A. (2015)**, *Digital Realm: Parametric-enabled Paradigm in Architectural Design Process*, „International Journal of Architecture, Engineering and Construction” vol. 4, no. 3, s. 174–183.
  23. **Microsoft Corporation (2002)**, *Microsoft Computer Dictionary*, 5<sup>th</sup> ed., Prentice Hall India Learning Private Ltd, Washington, s. 33.
  24. **Mirtschin J. (2016)**, *Iconic BIM: Realisation of a Form*, RTC Australasia 2016, Lovedale.
  25. **Mordue S., Swaddle P., Philp D. (2016)**, *Building Information Modeling For Dummies*, John Wiley & Sons, Ltd., Chichester.
  26. **Naeim M. (2015)**, *Computation as a tool for Architectural design development. A Case study of Building the ITHRA project*, In Design Computing, March.
  27. **van Nederveen G.A., Tolman F.P. (1992)**, *Modelling multiple views on buildings*, „Automation in Construction” vol. 1, no. 3, s. 215–224.
  28. **Ruffle S. (1986)**, *Architectural design exposed: from computer-aided drawing to computer-aided design*, „Environment and Planning B: Planning and Design” vol. 13, s. 385–389.
  29. **Schumacher P. (2014)**, *Tectonic Articulation: Making Engineering Logics Speak*, „Architectural Design” vol. 84, no. 4, s. 44–51.
  30. **Shelden D. (2009)**, *Information Modeling as a Paradigm Shift. Closing the Gap: Information Models in Contemporary Design Practice*, „Architectural Design” vol. 79, no. 2, s. 80–83.
  31. **Tedeschi A. (2014)**, *AAD Algorithms-Aided Design. Parametric strategies using grasshopper*, Le Pensur Publisher, Brienza.
  32. **Ustinovičius L., Rasiulis R., Nazarko Ł., Vilutienė T., Reizgevičius M. (2015)**, *Innovative research projects in the field of Building Lifecycle Management*, „Procedia Engineering” vol. 122, s. 166–171.
  33. **Vergopoulos S., Gourdoukis D. (2012)**, *Network Protocols / Architectural Protocols: Encoded Design Processes in the Age of Control*, International Conference, Rethinking the Human in Technology Driven Architecture, ENHSA-EAAE, No. 55, Thessaloniki, s. 135–148.
  34. **Weisstein E.W. (2002)**, *CRC Concise Encyclopedia of Mathematics*, 2<sup>nd</sup> edition, Chapman & Hall/CRC, London–New York–Washington, s. 2150.