

ARCHITEKTURA
ARCHITECTURE

JAN SŁYK

Prof. dr hab. inż. arch.

Warsaw University of Technology

Faculty of Architecture

email: jan.slyk@pw.edu.pl

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7022-9423>

METODYKA MODELOWA JAKO ŚRODEK ODPOWIEDZIALNEGO PROJEKTOWANIA W OBLICZU ZAGROŻEŃ CYWILIZACYJNYCH

MODEL METHODOLOGY AS RESPONSIBLE DESIGN MEASURE IN THE CONTEXT OF CIVILIZATIONAL THREATS

STRESZCZENIE

Architektura zmienia środowisko życia. Proces ten generuje trwale, oddalone w czasie skutki i wpływa na zagrożenia rozwoju. W artykule przedstawiono analizę wpływu metodyki modelowej na zdolność przewidywania konsekwencji związanych z projektami i realizacjami architektonicznymi. Uporządkowano kategorie zagrożeń i strategie symulacji modelowych. Na tle doświadczeń historycznych zarysowano znaczenie przełomu cyfrowego w modelowaniu oraz scharakteryzowano szanse, jakie ten przełom tworzy.

Słowa kluczowe: metodyka projektowania, model, symulacja, zrównoważony rozwój

ABSTRACT

Architecture changes the environment. This process generates permanent, long-term effects and limits future development. The paper presents the impact of model methodology on the ability to predict the consequences of architectural designs and realizations. The categories of threats and model simulation strategies were ordered. The significance of the digital breakthrough in modeling is outlined in historical perspective and opportunities the paradigm shift creates are characterized.

Keywords: design methodology, model, simulation, sustainable development

1. WPROWADZENIE

Zagrożenie związane z wyczerpywaniem się naturalnych zasobów wysuwa się dziś na pierwszy plan dyskusji o przyszłości środowiska zbudowanego. W ciągu ostatniego stulecia zmiany priorytetów w debacie teoretycznej były częste i dość gwałtowne. Śledziliśmy spory skoncentrowane na zagadnieniach formalno-stylowych, doświadczaliśmy eksperymentów tworzonych z pobudek społecznych i fascynacji radykalnymi stanowiskami filozoficznymi. Mogliśmy analizować pomysły awangardy konstruowane jako bunt i jako futurystyczna wizja. W ostatnich

dekadach dyskurs koncentrował się na fascynacji nowymi technologiami oraz możliwościach, jakie otwarła przed architekturą technologia cyfrowa.

Na tle palety różnorodnych, niekiedy skrajnych, myśli i koncepcji przestrzennych dwudziestego wieku nurt równoważenia procesów rozwojowych jawi się jako myśl pozytywistyczna, uniwersalna i trwała. Wyrasta ona z długiej tradycji poszukiwania w architekturze rozwiązań adekwatnych do potrzeb, użytecznych, nie przesadnych. Dziś zyskała narzędzia modelowe pozwalające lepiej realizować zamierzony cel, które zostaną scharakteryzowane w treści artykułu.

Zakres, cele, struktura wyводу

W artykule przedstawiona została typologia metod modelowania architektonicznego. Skonstruowano ją w celu uwypuklenia związku między zagrożeniami wynikającymi z zamiaru budowania a strategią projektową zdolną te zagrożenia minimalizować. Wywód przeprowadzono w ujęciu historycznym. Na podstawie analizy krytycznej uporządkowano przykłady modeli i zaproponowano opis ich funkcjonalności w kontekście zdolności symulacyjnej. Tematem wiodącym rozważań jest przełom metodyczny, który rozpoczął się jeszcze w erze przemysłowej, a w pełni zrealizował dzięki upowszechnieniu komputerów. Pozwolił on inżynierom i architektom tworzyć modele o znacząco większej reprezentatywności, a dzięki temu skuteczniej przewidywać i przewyżać zagrożenia.

Tło badań, literatura

Zagadnienie modelowania trzeba rozpatrywać, w pierwszej kolejności, na tle ogólnych rozważań metodologii nauk (Hesse, 1963; Frigg, Hartmann, dost. 2018). Dzięki nim zyskujemy wiedzę o sposobie reprezentacji rzeczywistości, kodach interpretacji oraz o zakresie miarodajności modelu. Ta ogólna informacja zderza się ze specyfiką modeli architektonicznych, które porządkowano pod kątem formy i funkcjonalności (Gajewski, 2001; Słyk, 2018). W zakresie badań nad reprezentatywnością wyników modelowych w architekturze istotny wkład wnieśli Cowan, Gero, Ding, Muncey (1968).

W świetle potrzeb niniejszego artykułu najistotniejszą referencją badawczą jest myśl, jaką profesor Wojciech Gasparski kształtuje w swych pracach prakseologicznych (Gasparski, 1984), a która została bardzo klarownie wyrażona w pracy zbiorowej poświęconej modelom inżynierskim (Gasparski, 2015, s. 13).

2. PROJEKTOWANIE W ZAGROŻONYM ŚRODOWISKU

Przewycięzanie zagrożeń i barier wiąże się z koniecznością rozwiązywania problemów praktycznych. Koncepcyjne przygotowanie (istotnej) zmiany jest w ujęciu Gasparskiego definicją projektowania. Od działania projektanta wymaga się przy tym, by spełniało normy etyczne, czyli dążyło ku korzystnym efektom, zgodnie z najlepszą wolą i wiedzą koncyplującego. Jak widać na podstawie przedstawionych tu warunków, projektowanie musi być jednocześnie efektywne inżyniersko, ukierunkowane na korzystną zmianę i ugruntowane etycznie. Nie da się projektować dążąc ku szczytnym ideom

bez wystarczającej wiedzy i umiejętności, podobnie jak nie da się nazwać projektowaniem działań efektywnie zmierzających ku powstawaniu zagrożeń.

Na tym podłożu definicyjnym Gasparski buduje koncepcję *społeczeństwa projektującego*, będącego jedyną szansą odwrócenia procesów degradacji środowiska. Szanse na dokonanie przełomu cywilizacyjnego rodzą się w wyniku upowszechniania wiedzy i dzięki cyfrowym aparatom zwiększającym zdolność jednostki do zrozumienia złożonych procesów. O szeroko rozpowszechnionych uniwersalnych kompetencjach pisał Toffler (1997), a dziś widzimy realne urzeczywistnienie społeczeństwa prosumenckiego, które świadomie uczestniczy w procesie przekształcania środowiska. Pomagają w tym cyfrowe narzędzia symulacyjne, budujące podłoże dla podejmowanych decyzji, stanowiące ważną przesłankę ewaluacji rozwiązań.

W domenie architektury podstawowym narzędziem pozwalającym projektować w myśl przedstawionych wyżej zasad jest model budynku. Metody przewycięzania zagrożeń obserwowane w konkretnej sytuacji budowlanej są referencją dla kolejnych projektów, jednak złożoność uwarunkowań nie pozwala przenieść ich bezpośrednio. Jakość projektów architektonicznych, mierzona ich zdolnością do pokonywania obecnych i przyszłych zagrożeń, zależy od reprezentatywności modeli. Co więcej, zdolność ta przekłada się na efektywność przekonywania członków *społeczeństwa projektującego* do rozwiązań zrównoważonych, trwałych, nieograniczających szans przyszłych pokoleń.

3. MODELE IZOLOWANE I OTWARTE — NARZĘDZIA POKONYWANIA PODSTAWOWYCH ZAGROŻEŃ EGZYSTENCJALNYCH

Jedną z metod uporządkowania modeli wykorzystywanych w architekturze jest odniesienie do zakresu reprezentowanych przez nie informacji (Słyk, 2018). Na wykorzystanie tej typologii zdecydowano się, gdyż pojemność informacyjna wiąże się wprost z reprezentatywnością, ta zaś wpływa na efektywność symulacyjną i czyni model bardziej użytecznym w przewidywaniu skutków realizacji projektu.

Najwcześniejsze doświadczenia projektowe wiązały się z opisem jednostkowych sytuacji. Brakowało podstaw dla opisu zjawisk wewnętrznych, należących do domeny fizyki budowli, statyki, wytrzymałości materiałów. Kierowano się doświadczeniem zdobywanym metodą prób i błędów. Przykłady zmagania z krytycznymi uwarunkowaniami

bezpieczeństwa użytkowania poprzez zastosowanie izolowanych modeli referencyjnych znajdujemy w książce Mario Salvadori (2001, s. 31, 217). Ostateczne formy architektoniczne piramidy łamanej w Dahszur i gotyckiej katedry w Beauvais wynikały z uwzględnienia zniszczeniowych prób dokonanych (nieświadomie) w kolejnych realizacjach analogicznego rozwiązania. Dla piramidy były nimi budowle w Meidum, zaś dla katedry — wcześniejsze wersje układu sklepiennego. W obu przypadkach motywacje zastosowania ambitnych rozwiązań wynikały z chęci przewyciężenia dotychczasowych ograniczeń (kąąt spadku, rozpiętość i wysokość sklepień) i w obu zakończyły się katastrofami. Modele izolowane, reprezentujące odosobnioną sytuację, oparte na jednostkowym doświadczeniu, kazały projektantom zastosować brutalną metodę walki z zagrożeniem konstrukcyjnym. W pierwszym przypadku — przełamać doskonałą formę ostrosłupa, w drugim — dodać podpory i zmienić schemat sklepień. Efekt zapewnienia bezpieczeństwa został osiągnięty. Kosztem okazały się utrata czystości formalnej i kompromisy w sferze estetyki.

Otwieranie modelu w dobie renesansu poszerzyło zakres możliwych symulacji i pozwoliło architektom doby nowożytnej lepiej kontrolować zagrożenia. Rozwój metodyki tego czasu jest opisany w traktatach teoretycznych. Tekst Albertiego (1960, s. 44) kojarzy się bezpośrednio z przywołaną wcześniej koncepcją Gasparskiego. Piętnastowieczny autor radzi, by modele: *badać bardzo uważnie samemu i razem z innymi (...), aby w twoim dziele nie było żadnej, najmniejszej nawet rzeczy, o której byś nie wiedział oraz że: (...) największego zastanowienia wymaga sposób doskonałego wykonania przekrycia, albowiem ono pierwsze spośród innych rzeczy wybudowanych przez śmiertelnych zapewniało im spokój.*

Praktyka projektowa renesansu podążała w myśl zaleceń Albertiego. Modele stały się głównym narzędziem przewidywania i przekonywania. Konkursy na największe projekty odbywały się poprzez analizę porównawczą makiet (Millon, 1994). Funkcje symulacyjne modelu Brunelleschiego dla kopuły florenckiej obejmowały nie tylko sprawdzenie efektywności statycznej nowatorskiej konstrukcji łupinowej. Architekt użył techniki prezentacji trójwymiarowej również po to, by przekonać mecenasa o skuteczności technologii wznoszenia kopuły i walki z rozporzem. Fizyczna makieta wykonana z drewna pozwalała efektywnie argumentować, że zmniejszono ryzyko zagrożeń konstrukcyjnych, realizacyjnych, a nawet ekonomicznych.

Skupiony na wizualnym postrzeganiu architektury renesans wyposażał swe modele w mecha-

nizmy ograniczające zagrożenie utraty walorów wizualnych po przeniesieniu projektu do naturalnej skali. Model Antonio Labacco dla projektu bazyliki św. Piotra autorstwa Antonio da Sangallo posiadał wersję standardową oraz dodatkową, pozwalającą „wejść do wnętrza”. Ta ostatnia wykonana była z uwzględnieniem niezbędnych korekt optycznych, aby widz doświadczał wrażeń bliskich realnej interakcji z budowlą.

4. OD MODELU EKSPERYMENTALNEGO DO MODELU INFORMACYJNEGO. NAUKOWE NARZĘDZIA SYMULACYJNE

Teoria empiryzmu dała początek nowej metodyce badań modelowych i nowej generacji modeli wykorzystywanych w architekturze. Wcześniejsze modele, nawet jeśli okazywały się efektywne w przewidywaniu skutków, nie pozwalały ocenić pewności wnioskowania. Dzięki pracom Johna Locke’a i Davida Hume’a ustabilizowała się koncepcja eksperymentu naukowego. Wiemy dziś, że dowody empiryczne wymagają postawienia hipotezy, zaplanowania prób, stworzenia sytuacji laboratoryjnej i uzyskania powtarzalnych wyników (Słyk, 2018, s. 36). Warunki te postawiły aplikacjom architektonicznym poważne wyzwanie. To dlatego wczesne modele eksperymentalne, takie jak dziewiętnastowieczny model Atwooda dla mostu nad Tamizą, są stosunkowo proste i dotyczą wybranych aspektów projektu.

Aby umożliwić studia modelowe w pełnowartościowym „laboratorium” empirycznym, należało stworzyć prototypy rozwiązań oraz opisać wewnętrzne cechy materiałów i elementów konstrukcyjnych językiem matematycznym. W tym ostatnim polu znaczący wkład wniosło dzieło Galileusza *Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze*. Zawiera ono propozycje schematów statycznych dla różnych typów elementów konstrukcyjnych, a także równania matematyczne pozwalające określać siły wewnętrzne. Choć w sposób nieprecyzyjny, traktat odnosi się także do modelowania cech rzeczywistych materiałów, co jest niezbędnym krokiem dla określenia ich wytrzymałości.

Trudne początki budowania teorii empirycznej oraz warsztatu jej wykorzystania w architekturze przyniosły spektakularny efekt w pierwszej części wieku dwudziestego. Antonio Gaudi realizując indywidualistyczną wizję formy sakralnej w barcelońskim kościele Świętej Rodziny zastosował aż trzy metody empirycznych studiów modelowych. Kształtując geometrię detali stosował maszyny formujące powierzchnie prostokreślne z gipsu. Odlewy elementów przecinano, by uzyskać matrycę dla linii

przenikania, którą następnie przenoszono do skali rzeczywistej. W poszukiwaniu optymalnych linii wpływu sił Gaudí stosował odwrócone modele sznurkowe. Dla sprawdzenia wytrzymałości kamieni naturalnych używał pras zginiatających. Eksperymenty Gaudiego skoncentrowane były na realizacji niezwykłego, wymykającego się tradycji pomysłu formalnego. Przeprowadzono je jednak w całkowicie nowatorski sposób. Nie ryzykowano, jak w Beauvais, katastrofy. Dokonano symulacji i prób modelowych, by ograniczyć zagrożenie do minimum.

Drugi krok ku współczesnemu warsztatowi empirycznemu wykonany został w Instytucie Lekkich Struktur w Stuttgarcie. Twórca tego laboratorium, Frei Otto, uczynił z modelowania eksperymentalnego i symulacji nową branżę inżynierską, uczestniczącą w realizacji ambitnych zamierzeń budowlanych do dziś. Zainteresowania Otto dotyczyły przede wszystkim membranowych przekryć i lekkich struktur dachowych. Nadał on tym konstrukcjom autorski wymiar realizując wraz z Günterem Behnischem kompleks budowli olimpijskich w Monachium. W pracach formotwórczych Otto wykorzystywał modele z piany mydlanej pozwalające określać powierzchnie minimalne dla różnorodnych obrysów i systemów podwieszeń. To jednak nie wystarczało, by odpowiedzialnie zaprojektować dachy stadionów, prawidłowo przewidując i eliminując zagrożenia dla użytkowników. Społeczność inżynierska była wyczulona na niebezpieczeństwo obciążenia lekkich struktur wiatrem po spektakularnej katastrofie mostu Tacoma w roku 1940. W Stuttgarcie zbudowano laboratorium do testów aerodynamicznych. Modele odzwierciedlające struktury zadaszeń umieszczano w tunelu i sprawdzano przemieszczenia oraz groźne zjawiska rezonansu. Dzięki zastosowaniu nowatorskiej metodyki badawczej zagrożeń uniknięto, obiekty stworzyły unikatową scenię światowego święta sportu i służą miastu do dziś.

W warstwie metodycznej prace Gaudiego i Otto zarysowały perspektywę wykorzystania modeli architektonicznych, która jest nadal aktualna. Została jednak wzmocniona technologicznie dzięki zastąpieniu fizycznych makiet modelami cyfrowymi. Funkcjonalność tych ostatnich wynika z mocy obliczeniowej komputerów i szerokiego dostępu do danych porównawczych, przede wszystkim jednak — z charakterystyki cyfrowego medium, które wykorzystano jako nośnik informacji. Czyni ona cyfrowe modele architektoniczne modularnymi, programowanymi, wariacyjnymi i zdolnymi do transkodowania (Manovich, 2006). Tradycyjny model fizyczny, raz wykonany, służyć mógł jako pojedynczy prototyp do prób. Model cyfrowy, zawiera-

jący wewnętrzny program, zdolny jest tworzyć całe rodziny pokrewnych rozwiązań, które następnie poddawane są testom, by zwrócić wyniki jako dane wyjściowe dla kolejnej generacji prototypów. Dzięki tym cechom laboratorium cyfrowe jest efektywniejsze i tańsze, zaś próby mogą dotyczyć weryfikacji wielu zagrożeń jednocześnie.

Początki modelowania cyfrowego kopiowały procedury testowe wypracowane w laboratoriach do prac z modelami fizycznymi. Przykładem takiego działania był projekt Muzeum Guggenheima w Bilbao projektu Franka Gehry'ego. Obiekt zdefiniowany w sposób „analogowy” przez architekta przekształcono do formy cyfrowej i umieszczono w laboratorium środowiska CATIA przeszczepionego na grunt architektury ze świata inżynierii lotniczej. Tu dokonano między innymi analizy gaussowskiej krzywizn, która pozwoliła uniknąć zagrożenia trudnymi wykonawczo, narażającymi budżet i czas realizacji, detalami elewacji. Wykorzystanie środowiska oprogramowania uwzględniającego interdyscyplinarność projektu usprawniło proces koordynacji, który jest jednym z podstawowych mechanizmów zapobiegania błędom projektowym.

Współczesne testy modelowe mają już zupełnie inny charakter. Pozwalają na dokonywanie analiz wielokryterialnych i podejmowanie decyzji korzystnych dla środowiska, ekonomicznych, racjonalnych z punktu widzenia kosztów budowy i eksploatacji. Proces taki przebiega najczęściej w cyklu przybliżeń po określeniu warunków brzegowych. W przypadku londyńskiego wieżowca 30 St Mary Axe projektu Foster & Partners były nimi ustalenia urbanistyczne, wymagana powierzchnia, obniżony w stosunku do standardu koszt fasady oraz wydajna naturalna wentylacja. Po ich wpisaniu do systemu rozpoczęła się praca cyfrowego laboratorium, które generowało możliwe rozwiązania i korygowało je zgodnie ze wskazaniem architekta. Efekt nie był więc arbitralną decyzją formalną, lecz kompromisem dokonany w świadomości przy uwzględnieniu możliwie kompletnej analizy modelu, na co już w XV wieku zwracał uwagę Alberti.

5. WNIOSKI

Odpowiedzialność architekta za skutki projektu wyraża się w trosce o eliminację zagrożeń, które dotknąć mogą użytkowników lub które niekorzystnie wpłyną na środowisko życia społeczności. Tak uformowane stanowisko etyczne cechowało uczciwych, świadomych architektów wszystkich epok. Nie zawsze jednak umieliśmy trafnie przewidywać konsekwencje realizacji projektów. Istotnymi

punktami na szlaku ku współczesnym technikom symulacyjnym były: otwarcie na kontekst w renesansie, wprowadzenie do warsztatu inżynierskiego metodyki empirycznej oraz wirtualizacja modelu dzięki wykorzystaniu zapisu cyfrowego. Ten ostatni proces, który śledzimy współcześnie, otwiera drogę perspektywie społeczeństwa projektującego. Jego

cechą będzie świadome dokonywanie decyzji oparte na szerokiej wiedzy i wysoce reprezentatywnych modelach. Można mieć nadzieję, że taka organizacja społeczna pozwoli przezwyciężyć najpoważniejsze zagrożenie współczesności, jakim jest zniszczenie środowiska i wyczerpanie zasobów w skali globalnej.

MODEL METHODOLOGY AS RESPONSIBLE DESIGN MEASURE IN THE CONTEXT OF CIVILIZATIONAL THREATS

1. INTRODUCTION

Today, the dangers of natural resources exhaustion come to the fore in discussions about the future of the built environment. Over the past century, shifts in priorities in theoretical debate have been frequent and quite rapid. We followed disputes focused on formal and style issues, we experienced experiments created for social reasons and out of a fascination with radical philosophical positions. We could analyze the ideas of the avant-garde constructed as a protest and as a futuristic vision. In recent decades, the discourse has focused on the fascination with new technologies and the possibilities that digital technology has offered to architecture.

Against the background of diverse, sometimes extreme thoughts and spatial concepts of the twentieth century, the trend of balancing civilization processes appears to be a positivistic, universal and firm thought. It stems from a long tradition developing architectural solutions that are adequate to the needs, useful and not exaggerated. Today, it has gained model apparatus to better complete the intended goals, which will be characterized in the content of the article.

Scope, objectives, structure

The article presents a typology of architectural modeling methods. It was intended to highlight the relationship between dangers of the construction and a design strategy capable of minimizing those risks. The argument was conducted in a historical perspective. Based on the critical analysis, the examples of models were categorized in the context of their simulation capability. The leading topic of the considerations is the methodological breakthrough that began in the industrial era and was fully realized thanks to the popularization of computers. It allowed

engineers and architects to create models with significantly greater representativeness, and thus more effectively predict and overcome threats.

Research background, literature

The issue of modeling should be considered, first, against the background of general methodology of sciences (Hesse, 1963; Frigg, Hartmann, accessed 2018). Thanks to them, we gain knowledge about methods of representing reality, the codes of interpretation and the scope of the model's reliability. This general information interacts with the specificity of architectural models, which were organized in terms of form and functionality (Gajewski, 2001; Słyk, 2018). In the field of research on the representativeness of model in architecture, significant contributions were made by Cowan, Gero, Ding, and Muncey (1968).

In the light of the needs of this article, the most important research reference is the thought that Professor Wojciech Gasparski shapes in his praxeological works (Gasparski, 1984), and which was expressed in a monograph about engineering models (Gasparski, 2015, p. 13).

2. DESIGNING AS A RISK FOR ENVIRONMENT

Overcoming threats and barriers is associated with the need to solve practical problems. The conceptual preparation of a (significant) change is, in Gasparski's theory, the essence of design. The designer's actions are required to meet ethical standards, i.e., to strive for beneficial effects in accordance with the best will and knowledge of the conceiver. Thus, the design must be both efficient in terms of engineering, focused on beneficial change and ethically grounded. It is impossible to design in pursuit of glorious ideas

without sufficient knowledge and skills, just as it cannot be called designing that effectively lead to the emergence of threats.

On this basis Gasparski builds the concept of a *design society*, which is the only chance to reverse the processes of environmental degradation. Opportunities for a civilization breakthrough arise because of disseminating knowledge and thanks to digital aids increasing the individual's ability to understand complex processes. Toffler (1997) wrote about the widespread universal competences, and today we see the real realization of a prosumer society that consciously participates in the process of transforming the environment. This is facilitated by digital simulation that reinforces grounds for the decisions making process and constitutes an important premise for the evaluation of solutions.

In the domain of architecture, building model is the basic tool that allows you to design in accordance with the principles outlined above. Successes in overcoming threats, observed in specific construction situations (cases), were previously the main reference for new projects, but the complexity of local conditions did not allow to transfer them directly. The quality of architectural designs, measured by their ability to withstand current and future threats, depends on the representativeness of the models. Moreover, this ability translates into the effectiveness of convincing members of the design society to apply sustainable, durable solutions, good for future generations.

3. ISOLATED AND OPEN MODELS — TOOLS TO MEET FUNDAMENTAL EXISTENTIAL THREATS

Taxonomy of models used in architecture could refer to the scope of information they represent (Słyk, 2018). It was decided to rely on such a typology, because the information capacity is directly related to representativeness, which in turn affects the simulation efficiency and makes the model more useful in predicting the effects of the project implementation.

The earliest design experience was related to the description of individual situations. There was no basis for understanding of internal phenomena belonging to the domain of building physics, statics, and material science. It was mainly driven by experience gained by trial and error. Examples of struggling with critical conditions of operational safety using isolated reference models can be found in the book by Mario Salvadori (2001, pp. 31, 217). The final architectural form of the bent pyramid in Dahshur and the gothic cathedral in Beauvais resulted from

the series of destructive attempts made (unconsciously) in subsequent implementations of a similar solution. For the pyramid — they were the buildings in Meidum, and for the cathedral — earlier versions of the vault arrangement. In both cases, the motivations for applying ambitious designs resulted from the willingness to overcome the existing limitations (angle of decline, span and height of vaults) and in both cases ended in catastrophes. Isolated models, representing an isolated situation, based on individual experience, forced the designers to use a brutal method of fighting the construction hazard. In the first case — to break the perfect form of the pyramid, in the second — to add supports and change the vault scheme. The safety effect has been achieved. It has costed the loss of formal purity and compromises in the sphere of aesthetics.

Opening the model in the Renaissance era widened the range of possible simulations and allowed modern architects to better control threats. The development of the methodology of that time is described in theoretical treatises. Alberti's text (1960, p. 44) is directly associated with the previously mentioned concept of Gasparski. The fifteenth-century author advises how to build models: *Examine very carefully yourself and together with others (...) so that there is nothing in your work, even the smallest thing, that you would not know about* and that: (...) *the most careful consideration is how to make the roofing perfectly, because it was the first of the other things built by mortals that gave them peace.*

The design practice of the Renaissance followed Alberti's recommendations. Models have become the main prediction and persuasion tools. Competitions for the largest projects were conducted through a comparative analysis of mock-ups (Millon, 1994). The simulation functions of the Brunelleschi model for the Florentine dome included more than just checking the static effectiveness of the novel shell structure. The architect used the technique of three-dimensional presentation also to convince the patron about the effectiveness of the technology of erecting the dome and fighting the horizontal force. A physical mock-up made of wood made it possible to effectively argue that the risk of construction, implementation and even economic hazards was reduced.

Focused on the visual perception of architecture, the Renaissance equipped its models with mechanisms limiting the risk of losing visual values after shifting the design to a natural scale. Antonio Labacco's model for the design of St. Peter's by Antonio da Sangallo had a standard version and an additional version that allowed "to go inside". The latter was

made considering the necessary optical corrections so that the viewer would experience the impressions of a real interaction with the building.

4. FROM THE EXPERIMENTAL MODEL TO THE INFORMATION MODEL. SCIENTIFIC SIMULATION TOOLS

The theory of empiricism gave impulse to a new methodology of model research and a new generation of models used in architecture. Earlier representations, even if they proved to be effective in predicting the result, did not allow to assess the certainty of inference. Thanks to the work of John Locke and David Hume, the concept of a scientific experiment has stabilized. We know today that empirical prove requires hypotheses, planning trials, creating a laboratory situation, and obtaining repeatable results (Styk, 2018, p. 36). These conditions set a serious challenge for architectural applications. Early experimental models, such as Atwood's nineteenth-century model for the Thames Bridge, were relatively simple and addressed selected aspects of the design.

To enable model studies in a fully-fledged empirical 'laboratory', it was necessary to (1) create prototypes of solutions, (2) describe the internal structure of materials and (3) express structural scheme in mathematical language. In the latter field, the work of Galileo *Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze* made a significant contribution. It included static diagrams of different types of structural elements, as well as mathematical equations to determine internal forces. Although imprecise, the treatise also referred to defining the properties of real materials, which is a necessary step in determining their strength.

The difficult beginnings of building empirical theory and its application in architecture brought a spectacular effect in the first part of the twentieth century. Antonio Gaudi, implementing his individualistic vision of sacred form in the Church of the Holy Family in Barcelona, applied three methods of empirical model studies. Shaping the geometry of details, he used machines forming ruled surfaces from plaster. The castings of the pieces were cut, to extrude crossing line, which was then transferred to true scale. In search of optimal flow of forces, Gaudi applied an inverted string model. To check the strength of natural stones, he trusted crushing presses. Gaudi's experiments were focused on the implementation of an unusual formal idea that eludes tradition. However, they were carried out in a completely innovative way. There was no risk of

a disaster like in Beauvais. Simulations and model tests were performed to minimize the risk.

The second step towards a contemporary empirical workshop was made at the Institute for Light Structures in Stuttgart. The creator of this laboratory, Frei Otto, turned experimental modeling and simulation into a new engineering branch that participates in the implementation of ambitious architectural concepts to this day. Otto's interests were mainly related to membrane covers and light roofs. He gave to these structures new, innovative dimension by building, together with Günter Behnisch, a complex of Olympic buildings in Munich. In the form-finding work, Otto used models made of soap foam, which allowed for the determination of minimum surfaces for various contours and suspension systems. However, this was not enough to responsibly design the roofs of stadiums, correctly anticipating and eliminating threats to users. The engineering community was alert to the dangers of wind load on lightweight structures after the spectacular Tacoma Bridge crash in 1940. An aerodynamic test laboratory was built in Stuttgart. Models representing the structures of the roofs were placed in the tunnel and displacements and dangerous resonance phenomena were checked. Thanks to the use of innovative research methodology, the threats were avoided, the design created a unique setting for the world festival of sports and is used by the city to this day.

In terms of methodology, the works of Gaudi and Otto outlined the perspective of architectural models, which is still valid today. However, it has been strengthened technologically by replacing physical mock-ups with digital models. The functionality of the latter results from the computing power and from the wide access to comparative data, but above all — from the characteristics of the digital medium that was used as an information carrier. It makes digital architectural models modular, programmable, variational, and transcoding (Manovich, 2006). Once made, the traditional physical mock-up could serve as a single test prototype. The digital model, containing an internal program, can create entire families of related solutions, which are then tested to return the results as input for the next generation of prototypes. Thanks to these features, the digital laboratory is more effective and cheaper, and the tests may involve the verification of many threats at the same time.

The beginnings of digital modeling copied test procedures developed in laboratories for working with physical models. An example of such an action was the project of the Guggenheim Museum in Bilbao designed by Frank Gehry. The object, defined in an 'analogue' way by the architect, was transformed

into a digital form and placed in the laboratory of the CATIA environment, transplanted into the field of architecture from the world of aviation engineering. Here, among other things, an analysis of the Gaussian curvatures was carried out, which allowed to avoid the risk of difficult-to-execution details, compromising the budget and implementation time. The use of a software environment that considers the interdisciplinary nature of the project improved the coordination process, which is one of the basic mechanisms for preventing design errors.

Modern model tests lead to completely different perspective. They allow to perform multi-criteria analyzes and make choices that are beneficial for the environment, economic, and rational from the point of view of construction and operation costs. Such a process usually takes place in the approximation cycle after determining the boundary conditions. In the case of the London skyscraper at 30 St Mary Ax by Foster & Partners, these were urban arrangements, required floor space, reduced cost of the facade compared to the standard and efficient natural ventilation. After they were entered into the system, the work of the digital laboratory began, generating possible solutions and correcting them according to the architect's instructions. Thus, the effect was not an arbitrary formal decision, but a consciously made compromise, considering the most complete analysis of the model, which Alberti drew attention to already in the fifteenth century.

5. CONCLUSIONS

The architect's responsibility for the effects of the project is expressed in the concern for the elimination of threats that may affect users or that will adversely disturb the living environment of the community. This ethical position characterized honest, conscious architects of all epochs. However, we were not always able to accurately predict the consequences of project implementation. Important points on the

path towards contemporary simulation techniques were opening to the context in the Renaissance, introducing empirical methodology to the engineering workshop and finally — virtualization of the model thanks to the use of digital medium. This latter process, which we follow today, paves the way from the perspective of the design society. Its feature will be conscious decision making based on extensive knowledge and highly representative models. It can be hoped that such a social organization will help to overcome the most serious threat of modern times, which is the destruction of the environment and the exhaustion of resources in a global scale.

REFERENCES

- Alberti, L.B. (1960), *Książ dziesięć o sztuce budowania*, Warszawa: PWN.
- Cowan, H.J. (ed.) (1968), *Models in Architecture*, Amsterdam: Elsevier.
- Frigg, R., Hartmann, S., 'Models in Science' [in:] The Stanford Encyclopedia of Philosophy, <https://plato.stanford.edu/archives/spr2017/entries/models-science/> (accessed:03.2018).
- Gajewski, P. (2001), *Zapisy myśli o przestrzeni*, Kraków: Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej.
- Gasparski, W. (1984), 'Społeczeństwo projektujące szansa czy utopia', *Prakseologia* 2(80), pp. 137–148.
- Gasparski, W. (2015), *Społeczeństwo projektujące i inne zagadnienia z dziedziny projektowania* [in:] Słyk, J. (red.) *Model informacji inżynierskich BIM*, Warszawa: Centrum Studiów Zaawansowanych PW.
- Hesse, M. (1963), *Models and analogies in science*, Notre Dame: University of Notre Dame.
- Manovich, L. (2006), *Język nowych mediów*, Warszawa: Wydawnictwa Akademickie i Profesjonalne.
- Millon, H.A. (ed.) (1994), *Italian Renaissance Architecture from Brunelleschi to Michelangelo*, London.
- Salvadori, M. (2001), *Dlaczego budynki stoją*, Warszawa: Wydawnictwo Murator.
- Słyk, J. (2018), *Modele architektoniczne*, Warszawa: Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej
- Toffler, A. (1997), *Trzecia fala*, Warszawa: PIW.