

dr hab. inż. arch. Krzysztof Koszewski^{1*)}

ORCID: 0000-0002-7907-746X

dr inż. arch. Marcin Strzala¹⁾

ORCID: 0000-0003-4102-4730

Formalne i technologiczne aspekty architektury wytwarzanej addytywnie w świetle parametrów geometrycznych wybranych obiektów

Formal and technological aspects of additively manufactured architecture in the light of geometric parameters of selected objects

DOI: 10.15199/33.2024.04.04

Streszczenie. Artykuł prezentuje wyniki analiz niezbadanej dotychczas relacji między artefaktem a narzędziem jego wytwarzania w obszarze architektury i metod addytywnych (AM). Celem pracy była identyfikacja i interpretacja tych zależności. Dokonano tego, badając charakterystyki wybranych 82 realizacji powstałych w latach 2004 – 2021. W tym celu wprowadzono dwa autorskie wskaźniki: skali (WS) oraz detalu (WD). Przeprowadzone analizy wskazują na ścisłe powiązanie metod projektowych z technologią wytwarzania.

Słowa kluczowe: projektowanie architektoniczne; wytwarzanie addytywne; relacja narzędzie-artefakt; geometryczne parametry projektowe i technologiczne.

Abstract. The article presents the results of analyses of the hitherto unexplored relationship between an artifact and its manufacturing tool in architecture and additive methods (AM). The purpose of the study was to identify and interpret these relationships. For this purpose, the authors examined the characteristics of selected 82 realizations created between 2004 and 2021. In the research, two author's indicators were introduced: scale (WS) and detail (WD). The analyses conducted indicate a close relationship between design methods and manufacturing technology.

Keywords: architectural design; additive manufacturing; tool-artefact relationship; geometrical parameters of design and technology.

Celem badania było usystematyzowanie wiedzy na temat relacji charakterystyki obiektów architektonicznych i metod ich wytwarzania w przypadku zastosowania addytywnych metod fabrykacji (AM). Analizy dokonano przez pryzmat mierzalnych technologicznych oraz architektonicznych parametrów opisujących obiekty wytworzone z wykorzystaniem AM. Dodatkowo, celem było rozpoznanie i interpretacja zależności występujących pomiędzy tymi parametrami na tle relacji projektowanie – narzędzie wytwarzania w architekturze.

Idea architektoniczna i jej realizacja w aspekcie mierzalnych parametrów obiektu

Architektura jest sztuką nierozdzielnie związaną z materialnością. Owa materialność może być rozumiana na wielu poziomach i w wielu aspektach, poczynając od postrzegania dzieła architektury jako fizycznie istniejącego artefaktu, przez rolę materiału jako fizycznego budulca, po kwestie związane z narzędziami służącymi do kształtowania tego materiału i wzniesienia budynku.

Złożona natura dzieł architektonicznych skutkuje koniecznością podejmowania badań wnoszonych budynków w kontekście zarówno jakościowym, jak i ilościowym. Architektu-

rę można postrzegać jako manifestację funkcji, wyraz idei, atrybut władzy, czy wręcz sprowadzić ją do obiektu estetycznego. Interpretacje tego rodzaju dokonywane są w ramach podejścia jakościowego, dominującego w analizie twórczych aspektów architektury. W przeciwieństwie do tego proces wznoszenia budowli koncentruje się wokół podejścia ilościowego, skupiając się na tym, co mierzalne. Podejście to było obecne zawsze, choćby ze względu na kosztowność procesu inwestycyjnego, którego racjonalizacja wymaga kwantyfikacji w celu określenia nakładu materiałów, robocizny i narzędzi. Czy jednak dominujące w historycznych i krytycznych analizach architektury podejście jakościowe można uzupełnić o koncepcję kwantyfikacji działań architektonicznych, szczególnie w aspektach związanych ze wznoszeniem obiektu, czyli materiałowych i narzędziowych? Czy i w jakim zakresie mierzalne aspekty dzieła architektonicznego, rozumianego jako artefakt, mogą dostarczyć istotnych informacji o procesie jego budowy i – co więcej – projektowania? W artykule postaramy się odpowiedzieć na te pytania.

Jakościowa analiza budynków, jako dzieła architektury, koncentruje się często na ich fenomenologicznych interpretacjach estetycznych – jak w przypadku Romana Ingardena [1], rzadko odnosząc się do mierzalnych właściwości o charakterze genetycznym, a zwłaszcza do tego, w jaki sposób powstały i jaki wpływ na ich formę miały użyte materiały, techniki

¹⁾ Politechnika Warszawska, Wydział Architektury

^{*)} Adres do korespondencji: krzysztof.koszewski@pw.edu.pl

i narzędzia. Materialność w podejściu jakościowym jest istotna tylko o tyle, o ile bezpośrednio manifestuje się w formie budynku. Znaczenie materiału tworzącego tę formę sprowadza się zatem do jego zmysłowego odbioru, wrażenia, jakie wywołuje, stanowiąc tym samym egzystencjalną podstawę dzieła. Takie podejście, traktujące architekturę jako „czyste dzieło sztuki” i uzasadnione na gruncie estetyki, skutkowało i skutkuje nadal czysto formalnymi uogólnieniami, będącymi np. podstawą do periodyzacji historii architektury na podstawie cech stylowych. **W artykule prezentowane jest odmienne podejście, polegające na powiązaniu cech artefaktu (budynku lub jego części) z zastosowanym narzędziem, a więc procesem fizycznego powstawania obiektu.**

Należy podkreślić, że najdawniejsze zachowane rysunki architektoniczne, odnoszące się na pierwszy rzut oka do zapisu idei, umożliwiającego jej wcielenie w postaci budynku, są tak naprawdę ilustracjami kontraktu, wskazującymi na cechy ilościowe architektury skojarzone z procesem budowania [2]. Rysunki architektoniczne – niejako w zastępstwie budowli – są często także podstawą analiz ilościowych, ale głównie w kontekście geometrii budynku, niejako w oderwaniu od procesu wytwarzania i materiału. Przedmiotem tej analizy są proporcje, a także matematyczne zależności pomiędzy elementami, jak to się dzieje w przypadku średniowiecznych maswerków [3], czy budowli barokowych [4]. Aspekty materiału i narzędzia są tu zdecydowanie marginalne. Przedmiotem zainteresowania jest forma oraz jej ideowe konotacje [5]. Na tym tle ciekawym przypadkiem powiązania zapisu formalnego – rysunkowej analizy geometrycznej – z warsztatem wytwarzania jest **stereotomia**. Rozpowszechniony w kręgu francuskim w XVI i XVII wieku sposób wykonywania rysunków ukazujących skomplikowane geometrycznie fragmenty budynku, takich jak wysklepki czy spiralne schody, umożliwiał ich wycięcie w materiale przez fachowca – kamieniarza. Pozwalały one na precyzyjne przeniesienie kształtu i wymiarów na materiał, a następnie obrobienie go tak, by fragmenty, których wielkość była ograniczona wymiarami brył kamienia, pasowały do siebie w trakcie wznoszenia budynku [6]. Analiza tych rysunków stanowi ciekawe źródło informacji zarówno o ówczesnej wiedzy z zakresu geometrii, jak i – co szczególnie cenne – o warsztacie budowlanym okresu manieryzmu i baroku. Jest to także przykład wpływu materialności procesu wznoszenia budynku na projektowanie, manifestujący się we wspomnianych rysunkach architektonicznych.

Poszerzenia pola interpretacji obiektu w oparciu o ilościowe cechy stricte architektoniczne można dokonać na gruncie tektoniki, podkreślającej związek cech architektury z materiałami i ich właściwościami oraz potencjałem strukturalnym elementów z nich wytworzonych. Nadal jednak jest to relacja dość jednostronna. W ujęciu Gottfrieda Sempera chodzi bowiem o użycie właściwego materiału tak, by spełnić oczekiwania formalno-funkcjonalne, czy tchnąć życie w czysto materialną formę [7]. Współcześnie Kenneth Frampton, dostrzegając interpretację architektury jako dzieła sztuki, odchodzi jednak od analizy budynku na gruncie teorii reprezentacji [8], zmierzając ku postrzeganiu fizycznego obiektu jako będącego wynikiem trzech podstawowych czynników kształtują-

cych: topos; typos i tektonika. Tak rozumiana tektonika uwzględnia wiele czynników konstytuujących architekturę, jednak nadal pomija aspekt procesu budowania, związanego choćby ze wspomnianymi na wstępie narzędziami. Materialność architektury w przytoczonych koncepcjach jest istotna, ale zawsze pojawia się definiujący ją czynnik transcendentny – z natury niemierzalny: czy to boski, czy praw natury, czy wreszcie nadrzędnej idei kształtującej zamysł projektowy. Innymi słowy, aspekty formalne i konceptualne idą w parze, ale zawsze te drugie pełnią główną rolę.

Do pewnego stopnia lukę tę uzupełnia współczesne zainteresowanie procesem tworzenia, odchodzące od koncentrowania się wyłącznie na jego efekcie. Jeden z nurtów wspomnianego zainteresowania wskazuje na antropologiczne konotacje wytwarzania – materialnego kształtowania artefaktu ze wszystkimi jego kontekstami, w tym także narzędziowym. Dotyczy to także architektury w ujęciu historycznym, dotychczas niemal w tym aspekcie nieobecny. W swojej książce *Making: Anthropology, Archaeology, Art and Architecture* Tim Ingold w sposób sugestywny ukazuje tę zmianę podejścia: *Building is an activity; it is what builders do. Add the article, however, and the activity is brought to a close. Movement is stilled, and where people had once laboured with tools and materials, there now stands a structure – a building – that shows every sign of permanence and solidity* [9]. Cytat pozostawiono w oryginale, gdyż przetłumaczony traci sens polegający na swoistej grze słów właściwej dla języka angielskiego, w której „building” to budowanie, zaś „a building” to budynek. Dosłowne tłumaczenie: *Budowanie jest czynnością; jest tym, co robią budowniczowie. Dodajmy jednak przedimek, a czynność ta zostanie zakończona. Ruch zostaje zatrzymany, a tam, gdzie kiedyś ludzie pracowali z narzędziami i materiałami, stoi teraz struktura – budynek, który wykazuje wszelkie oznaki trwałości i solidności* (tłum. aut.). Ów budynek, wskazany przez Ingolda, był dotychczas podstawowym, statycznym przedmiotem analiz, rzadko prowadzących jednak do refleksji na temat procesu i narzędzi. Sposób ujęcia przedstawiony w artykule, odnoszący się do wytwarzania addytywnego, zmusza do rewizji statycznego postrzegania obiektu architektonicznego, ukazując powiązania mierzalnych jego aspektów z dynamicznym procesem wytwarzania.

Wykorzystanie procesów wytwarzania addytywnego w architekturze stwarza dogodnie możliwości prześledzenia relacji mierzalnych cech obiektu i aspektów narzędziowych procesu budowania. Analizy tego typu relacji w ujęciu historycznym były utrudnione, ponieważ język zapisu idei architektonicznej stosowany w procesie projektowania, czyli rysunek, musiał być odpowiednio przełożony na język wykonawczy – ze swoistego abstraktu na konkretny, by móc zaowocować wzniesieniem budynku. Skutkowało to powstaniem swego rodzaju luki konceptualnej. Była ona wielokrotnie przedmiotem rozważań badaczy, co lapidarnie podsumował Robin Evans: *Architects do not make buildings, they make drawings of buildings* [10]. Jeśli jednak uznamy, że współcześnie w miejsce rysunków architekci tworzą cyfrowe modele, to zawartość informacyjna, ale przede wszystkim możliwości transkodowania (także do kodu interpretowalnego przez wy-

tworzącą maszynę) takiego modelu powodują, że pojawia się bezpośrednia relacja między nośnikiem idei (modelem) i procesem wytwarzania (fizyczną realizacją w procesie AM). Jak zauważa William Mitchell: *Integracja pomiędzy cyfrowo wspomaganym projektowaniem i wytwarzaniem cyfrowym (...) niweluje lukę pomiędzy projektowaniem i produkcją, która pojawiła się, gdy architekci zaczęli tworzyć rysunki* [11].

W procesie wytwarzania addytywnego ta luka jest jeszcze mniejsza, gdyż transkodowanie cyfrowych danych na fizyczne artefakty jest zautomatyzowane. Model i jego realizację dzieli jedynie wciśnięcie przycisku „start”. Jest to krótsza droga niż w przypadku innych metod cyfrowego wytwarzania [12]. Doskonałym przykładem tej relacji jest projekt Digital Grotesque II autorstwa Michaela Hansmeyera i Benjamina Billenburgera, zrealizowanego na zamówienie paryskiego Centr Pompidou w 2017 r. Model cyfrowy opisujący ten pawilon o kubaturze ok. 300 x 200 x 345 cm, składał się z 260 mln powierzchni tworzących siatkę wielokątów, która na etapie wytwarzania reprezentowana była przez 42 mld vokseli o długości krawędzi poniżej 0,5 mm [13]. Tak niewyobrażalna precyzja projektu podyktowana była technologią wytwarzania, której rozdzielczość, czy też wysokość warstwy, wynosiła 0,28 mm.

Cechy addytywnej fabrykacji i charakterystyka jej wykorzystania w architekturze pozwalają na unaocznienie i prześledzenie relacji pomiędzy architektonicznymi artefaktami i narzędziami wykorzystywanymi do ich wytworzenia. Zbadaliśmy tę relację przez pryzmat stricte policzalnych, geometrycznych, odpowiadających sobie parametrów opisujących oba te elementy. Dalsze rozdziały omawiają kolejno metodę przeprowadzonych badań, prezentację opatrzoną komentarzem wyników oraz płynące z badań wnioski i dyskusję.

Metoda badań

Badanie przeprowadzono w trzech etapach. Pierwszym z nich było stworzenie katalogu adekwatnych przypadków. W tym celu stworzono zestawienie obiektów architektonicznych wytworzonych za pomocą AM w latach 2004 – 2021. Źródłami informacji o potencjalnych obiektach były dwa zasoby: witryny internetowe monitorowane synchronicznie za pomocą wyszukiwarki google i funkcjonalności google alerts oraz bazy danych Web of Science i Scopus, na podstawie których w sposób asynchroniczny dokonywany był przegląd literatury w dwuletnich interwałach.

W obu przypadkach wyszukiwane były hasła: 3d printing/additive manufacturing z operatorem AND architecture/construction/design. W drugim ze źródeł rekordy ograniczone były do dziedzin Building and Construction oraz Architecture. Zidentyfikowano ponad sto przypadków obiektów architektonicznych wytwarzanych metodą addytywną i prawie tysiąc artykułów naukowych na ten temat. Dla wszystkich rozpoznanych przypadków stosowany był zestaw kryteriów doboru obejmujący kryterium:

- **czasowe** – realizacja obiektu w latach 2004-2021;
- **merytoryczne** – obiekty architektoniczne będące całymi budowlami bądź ich modułami lub elementami;

- **realizacyjne** – obiekty musiały być wytworzone w całości, częściowo lub co najmniej w formie fizycznego prototypu;

- **skali** – w odniesieniu do poprzedniego – realizacja lub prototyp musiały być wytworzone w skali 1 : 1;

- **wytwarzania bezpośredniego** – wytworzony addytywnie obiekt jest produktem końcowym, wykonanym z docelowego materiału.

Z zastosowaniem wymienionych kryteriów wyselekcjonowane zostały 82 adekwatne przypadki obiektów architektonicznych wytworzonych z wykorzystaniem metod addytywnych. W każdym przypadku zebrano, w postaci bazy danych, informacje ogólne, cechy architektoniczne i technologiczne oraz dokumentację rysunkową i zdjęciową.

Podczas analizy wzięto pod uwagę istotne wielkości geometryczne, dotyczące obiektu, a przede wszystkim:

- **wymiaru obiektu** – maksymalna długość, głębokość i wysokość;

- **maksymalne wymiary modułu** – długość; głębokość i wysokość poszczególnych modułów, tworzących całość obiektu, o ile składa się on z takich dyskretnych części składowych;

- **rozdzielczość detalu** – minimalna odległość pomiędzy punktami kontrolnymi krzywej lub powierzchni NURBS, pozwalająca na opis danej geometrii bez strat w celu odwzorowania detalu. Interpretacji podlegała tylko ta część geometrii badanych przypadków, która wynikała z decyzji projektanta, np. kształt obiektu. Pomijane były natomiast te aspekty, które wynikały z technologii, jak kształt/przebieg wypełnienia.

Analizowane były także parametry związane z technologią:

- **obszar roboczy** – maksymalne wymiary: długość, głębokość i wysokość obiektów możliwych do wytworzenia przy użyciu danej technologii lub urządzenia;

- **rozdzielczość technologii** – maksymalna rozdzielczość, z jaką dane urządzenie może wytwarzać obiekty. W przypadku, gdy w danej technologii występowały rozbieżności pomiędzy rozdzielczością w poziomie (na płaszczyźnie) i w pionie (grubość warstw), przyjmowano większą z nich (mniejszy wymiar).

Wszystkie wymienione parametry zostały wyrażone w centymetrach. Wyjątkowo, ze względu na skale prezentowanych przypadków, objętość wyrażono w metrach sześciennych. Następnie zebrane parametry architektoniczne poddano analizom ilościowym. Obejmowały one śledzenie rozkładu w czasie wartości indywidualnych i średnich, charakterystycznych dla zebranych przypadków, a także obliczenie globalnej mediany i szacowanie pojawiającego się trendu liniowego. Ze względu na duży rozrzut wartości, w tym ostatnim typie analizy zastosowano metodę średniej trymowanej – w latach, w których wystąpiły cztery lub więcej przypadków, pominięto przypadki skrajne (wartości minimalne i maksymalne).

W trzecim etapie, dwa wybrane, tożsame zestawy danych dotyczących obiektu oraz technologii zostały zestawione ze sobą, tworząc proporcje, których wartości przeanalizowano w sposób analogiczny jak w drugim etapie badań. W obu przypadkach proporcje te zostały wyrażone w postaci wartości procentowej, która może być interpretowana jako stopień wykorzystania potencjału narzędzia. Te dwie proporcje to:

■ Wskaźnik Skali (WS), w którym porównana jest objętość zrealizowanego modułu do maksymalnej objętości oferowanej przez narzędzie;

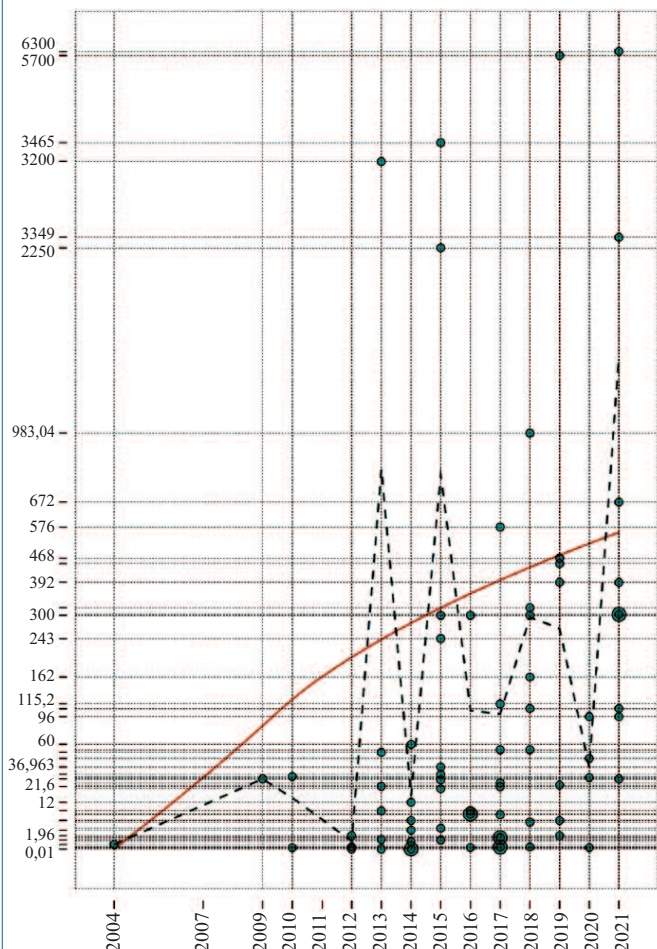
■ Wskaźnik Detalu (WD), w którym porównana została rozdzielczość detalu do rozdzielczości narzędzia.

Analiza ilościowa

Pierwsza z omawianych grup danych – **wielkość obiektu**, w najbardziej bezpośredni sposób obrazuje, jak szerokie jest spektrum realizacji architektonicznych wytwarzanych addytywnie (rysunek 1). Ich objętość wynosi 0,004 – 6300 m³. Dolną granicę wyznaczają niektóre wczesne rozwiązania eksperymentalne, w których wytwarzano poszczególne elementy architektoniczne, np. Planter Brick firmy Emerging Objects, Building Bytes autorstwa Briana Petersa czy PolyBrick 1.0 zaprojektowany przez Jenny Sabin Lab. Żaden z tych obiektów nie przekracza kubatury 0,01 m³. Górną granicę wyznaczają z kolei całe budynki, takie jak ukończona w 2021 r. brama parku rozrywki Nanjing Happy Valley, której kubatura to 6300 m³, ale 23% wszystkich przypadków mieści się w obrębie 1 m³,

podczas gdy tylko 10% przedstawia rozwiązania wielkoskalowe powyżej 1000 m³. Mediana wynosi 27 m³. Jednocześnie linia trendu wyznaczona w przypadku zebranych danych wykazuje silną tendencję wzrostową. Sugeruje ona ok. 300% wzrost objętości obiektów co dekadę do poziomu prawie 550 m³ w 2021 r.

Podobną, wzrostową tendencję wykazuje **estymacja linii trendu, dotyczącej wielkości modułów** (rysunek 2). W tym przypadku przewidywany wzrost wielkości wynosi nieco ponad 200% na dekadę, osiągając blisko 30 m³ pod koniec badanego przedziału czasowego. Dolna wartość tego parametru – 0,001 m³ wyznaczona jest ponownie przez przywołane już projekty z Emerging Objects i Jenny Sabin Lab, Star Lounge i PolyBrick 2.0, natomiast górna wartość osiąga 812,9 m³. Tak duże moduły mogą być wytwarzane na platformach Apis Cor i WinSun dedykowanych do wielkoformatowego druku z betonu. Należy jednak zaznaczyć, że o ile dokumentacja wdrożenia narzędzia Apis Cor podczas budowy Urzędu Miasta Dubaju w 2019 r. nie budzi wątpliwości co do maksymalnej przestrzeni roboczej, o tyle dokumentacja fotograficzna przypad-

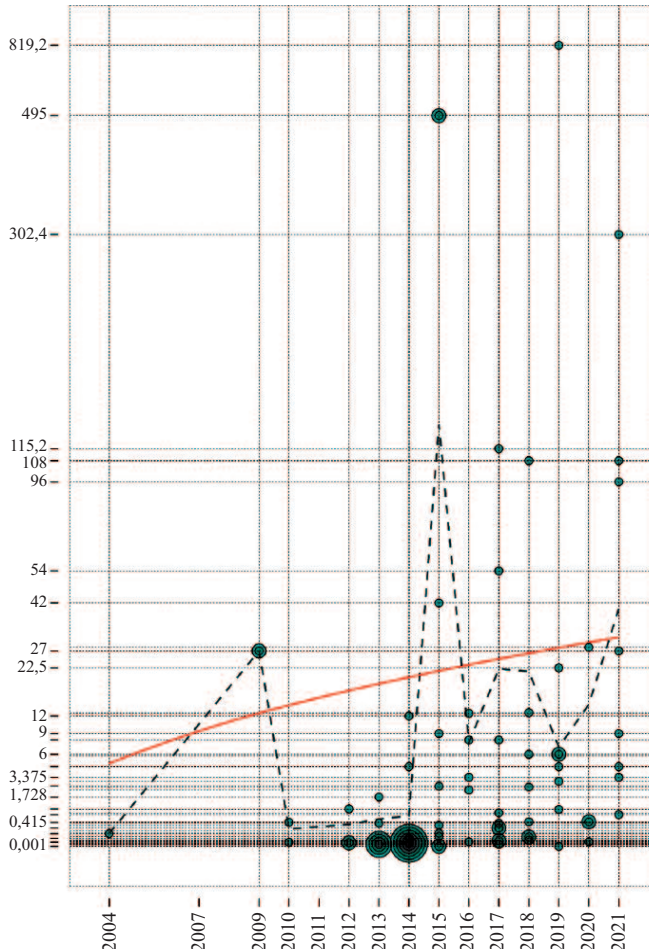


Rys. 1. Kubatura [m³] badanych przypadków. Każdy okrąg odpowiada jednemu przypadkowi. Linia niebieska przerywana – przebieg średnich. Linia pomarańczowa – funkcja trendu. Uwaga: skala pionowa logarytmiczna

Rys. autorzy

Fig. 1. The volume of the examined cases [m³]. Each circle corresponds to one case. Dashed blue line – averages. Orange line – trend function. Note: logarithmic vertical scale

Fig. author's



Rys. 2. Kubatura [m³] modułów przypadków. Każdy okrąg odpowiada jednemu przypadkowi. Linia niebieska przerywana – przebieg średnich. Linia pomarańczowa – funkcja trendu. Uwaga: skala pionowa logarytmiczna

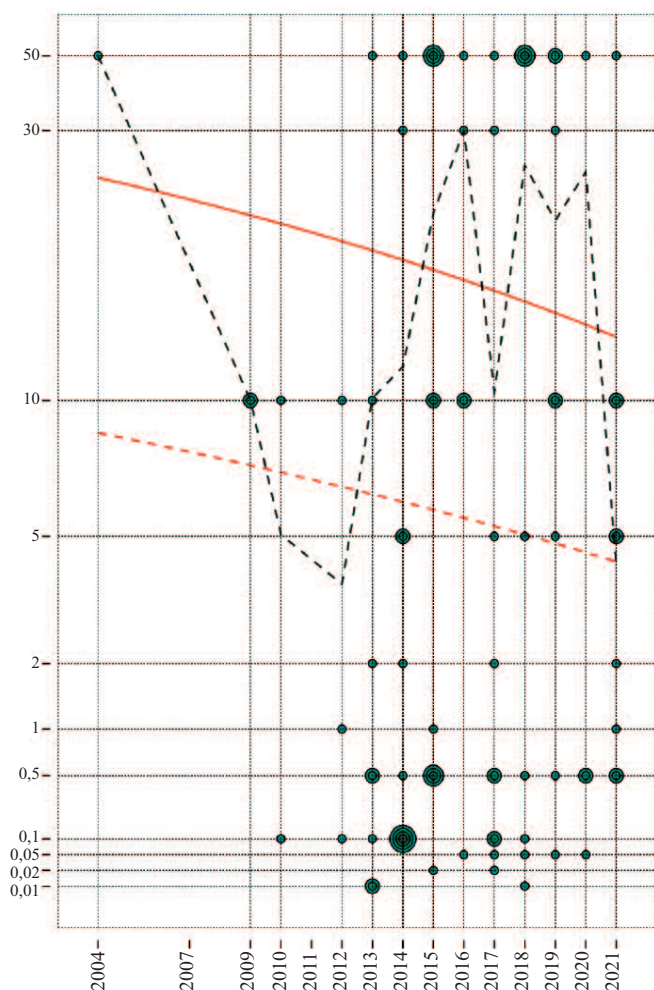
Rys. autorzy

Fig. 2. The volume of case modules [m³]. Each circle corresponds to one case. Blue dashed line – averages. Orange line – trend function. Note: logarithmic vertical scale

Fig. author's

ków, w których wykorzystano narzędzie WinSun, wydaje się przeczyć deklarowanym wartościom. Biorąc pod uwagę, że skrajne przypadki o kubaturze modułów ponad 100 m³ stanowią zaledwie 5% wszystkich analizowanych obiektów, przypuszczać można, że zarówno rzeczywista domena i linia trendu wynikająca ze średnich są mniejsze. W 50% przypadków wielkość modułu nie przekracza 1 m³, a mediana wynosi dokładnie 0,97 m³. Kolejne 30% przypadków ma kubaturę modułu 27 m³, co z kolei odpowiada przytoczonej medianie wartości całkowitej wielkości obiektów.

Ostatnią prześledzoną daną architektoniczną była **wielkość detalu** (rysunek 3). Ta domena waha się od 100 μm do 50 cm, z medianą wynoszącą 2 cm. Małą wartość domeny wyznaczają projekty Nematox System Holgera Straussa, Digital Grotesque Benjamin Dillenburgera i Michaela Hansmeyera oraz Trabeculae Pavilion laboratorium CREATE kierowanego przez Roberto Naboniego. Warto zauważyć, że 14% wszystkich przypadków, to detale wielkości 0,5 cm, a kolejne 25%



Rys. 3. Rozmiar detalu omawianych przypadków [cm]. Każdy okrąg odpowiada jednemu przypadkowi. Linia niebieska przerywana – przebieg średnich. Linia pomarańczowa – funkcja trendu. Czerwona linia przerywana – funkcja trendu dla wykluczonych przypadków

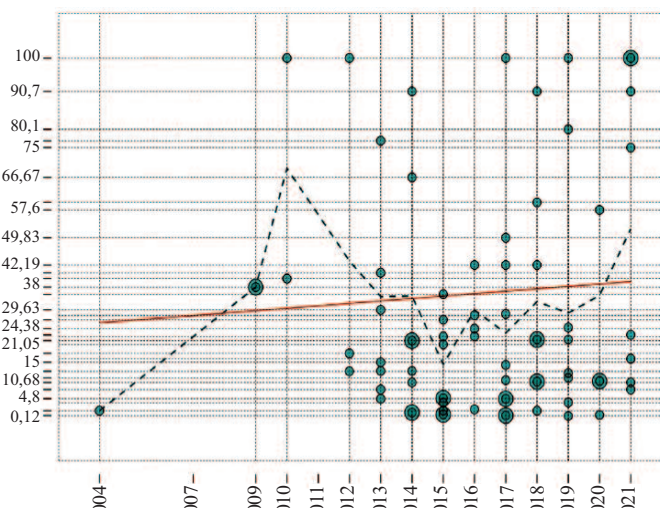
Rys. autorzy
 Fig. 3. The detail size of the discussed cases [cm]. Each circle corresponds to one case. Dashed blue line – averages. Orange line – trend function. Red dashed line – trend function for excluded cases
Fig. author's

nawet mniejsze. Z drugiej strony w piętnastu przypadkach niemożliwe było rozpoznanie jakiegokolwiek szczegółu innego niż wynikający bezpośrednio z materiału lub technologii wytwarzania. Były to proste ściany z ewentualnymi otworami okiennymi lub drzwiowymi, którym przypisano górną wartość domeny 50 cm i była to maksymalna grubość tych ścian. Linia trendu tego parametru jest spadkowa; stopniowo zmniejsza się rozmiar detalu, a tym samym zwiększa jego rozdzielczość w czasie. W przypadku danych zebranych w omawianym okresie wartość wyznaczona przez linię trendu zmniejszyła się o połowę do ok. 12 cm. Przeprowadzono uzupełniającą analizę linii trendu, w której wykluczono przywołane piętnaście przypadków pozbawionych świadomie zaprojektowanego detalu. W tej analizie uzyskano linię trendu o tym samym przebiegu, ale o ostatecznym rozmiarze detalu nieprzekraczającym 5 cm.

Analiza porównawcza

Geometryczne dane architektoniczne, omówione w poprzednim rozdziale, porównano z analogicznymi danymi dotyczącymi technologii wytwarzania. Tego typu analiza wynika z naszego założenia, że adekwatne użycie narzędzia, jego skali i detalu, odpowiadać powinno oczekiwanym cechom wytwarzanego obiektu. Jak opisano wcześniej, analiza porównawcza polegała na obliczeniu i zbadaniu dwóch wskaźników: wskaźnika skali (WS), w którym objętość modułu została porównana z maksymalną przestrzenią roboczą narzędzia AM, na którym został wyprodukowany, oraz wskaźnika detalu (WD), ukazującego związek między rozmiarem detalu obiektu a natywną rozdzielczością technologii.

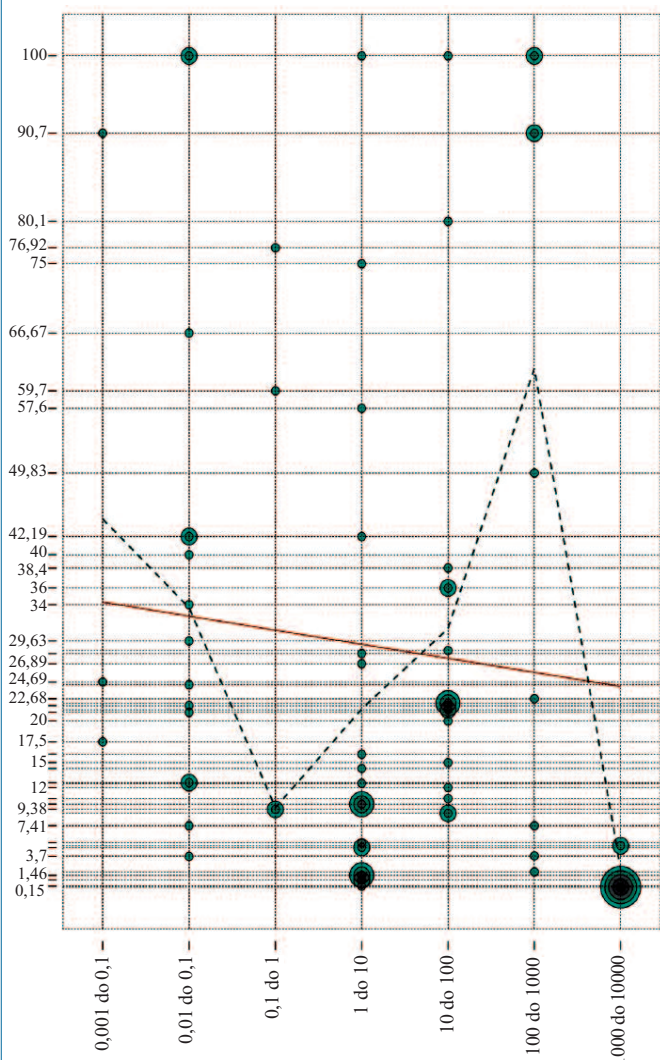
Pierwszy wskaźnik – WS miał na celu sprawdzenie, w jakim stopniu ograniczenia technologiczne dyktują wielkość wytwarzanych addytywnie modułów budowlanych. Jak można zaobserwować (rysunek 4), linia trendu jest dosyć płaska w całym badanym okresie, zmieniając się od 25% do 38% wy-



Rys. 4. Wskaźnik Skali (WS) wyrażony jako stosunek objętości wytworzonego obiektu do maksymalnego obszaru roboczego danej technologii

Rys. autorzy
 Fig. 4. Scale Indicator (SI) expressed as the ratio of the volume of the manufactured object to the maximum working area of a given technology
Fig. author's

korzystania maksymalnej objętości roboczej narzędzia. Należy jednak podkreślić, że wartości te mogą być zawyżone, ponieważ w prawie 1/3 przypadków nie wykorzystano więcej niż 10% obszaru roboczego narzędzia, a tylko w piętnastu przypadkach w więcej niż 50%. W 9 z 82 przypadków wartość WS wyniosła 90 – 100%. Mediana we wszystkich przypadkach wynosi 21%, a średnia 29%. W związku z tym, że wyniki wzbudziły pewne wątpliwości, wartości wskaźnika skali poddano dalszej analizie w odniesieniu do przedziałów wielkości obszaru roboczego narzędzia zdefiniowanych przez kolejne potęgi liczby 10 – od 0,001 do 0,01, od 0,01 do 0,1 itd. aż do przedziału 1000 – 10000 m³ (rysunek 5). W tym przypadku ogólny trend maleje, wskazując, że im większy obszar roboczy, tym mniejsza jego część jest używana. Jednocześnie, przyglądając się średnim, można zauważyć większą wartość współczynnika skali w narzędziach o obszarze roboczym do 0,1 m³ oraz w zakresie 10 – 1000 m³. Z kolei znaczny spadek WS widoczny jest w zakresie 0,1 – 10 i powyżej 1000 m³.

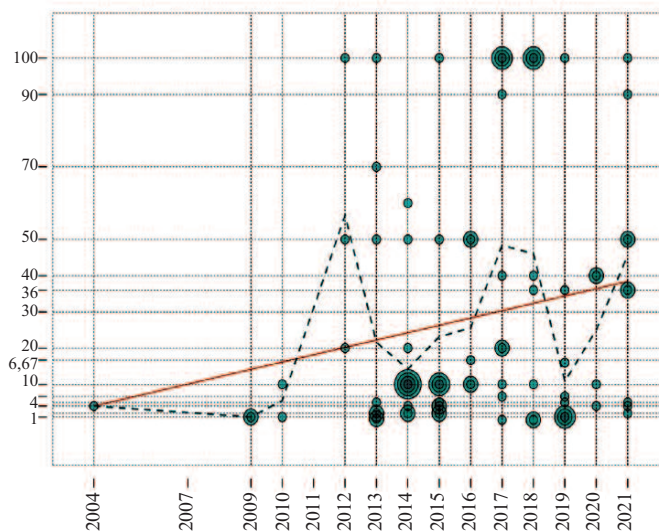


Rys. 5. Współczynnik Skali (WS) w stosunku do przedziałów maksymalnej objętości obszaru roboczego narzędzia wyrażonej w m³

Rys. autorzy
Fig. 5. Scale Indicator (SI) in relation to the ranges of the maximum volume of the tool's working area, expressed in cubic meters

Fig. author's

Drugi wskaźnik – WD sugeruje szybko zwiększające się wykorzystanie możliwości płynących z rozdzielczości narzędzi w porównaniu z poziomem skomplikowania zaprojektowanych detali (rysunek 6). Linia trendu charakteryzuje się rocznym wzrostem o 2% i osiągnęła ok. 38% w 2021 r. Mediana i średnia wartości wynoszą odpowiednio 10% i 30%. Ta dysproporcja doprowadziła do zestawiania uzupełniającego, w którym wartości WD zostały przeanalizowane w odniesieniu do domen rozdzielczości narzędzi. Wyniki tej analizy okazały się niejednoznaczne, ponieważ większość przypadków mieściła się w przedziałach od 0,01 do 0,1 i 0,1 do 1 cm, przy czym większość wartości rozkładała się równomiernie między wartościami skrajnymi, poniżej 10% i powyżej 90%.



Rys. 6. Wskaźnik Detalu (WD) wyrażony jako stosunek rozdzielczości detalu projektowego do maksymalnej rozdzielczości technologii

Rys. autorzy
Fig. 6. Detail Indicator (DI) expressed as the ratio of the resolution of the design detail to the maximum resolution of the technology

Fig. author's

Wnioski, dyskusja

Opisano szeroki zakres projektów wykorzystujących metody wytwarzania przyrostowego. Kryteria wyboru przypadków wskazują, że metody addytywne (AM) powinny być postrzegane jako pełnoprawne metody wytwarzania w dziedzinie architektury, a nie jako eksperymentalne lub służące do szybkiego prototypowania.

Badanie ilościowe wymiarów modułów wykazało, że w latach 2004 – 2021 ich wielkość nie zmieniła się znacznie. Ponadto, badanie porównawcze jednoznacznie wskazuje, że zwiększenie maksymalnej przestrzeni roboczej narzędzia wiąże się ze spadkiem wydajności danej technologii, ponieważ dostępny obszar roboczy wykorzystywany jest w małym stopniu. Doskonałym tego przykładem opisanym w literaturze jest wspomniany już projekt Digital Grottesque, w którym choć obszar roboczy technologii pozwalał na wytworzenie kubatury 200 x 800 x 100 cm, żaden z modułów nie przekroczył wymiarów 120 x 40 x 80 cm. Łatwość transportu, montażu i postprodukcji elementów podyktowała tę decyzję projektową [14].

Badanie ilościowe wykazujące zwiększającą się rozdzielczość detalu można interpretować jako zwiastun lepszemu zrozumieniu i dojrzałego wykorzystania technologii, tj. stworzenia bliższego połączenia i agregacyjnej relacji między narzędziem wytwarzania a projektowanym obiektem. Argument ten znajduje potwierdzenie w wynikach analizy porównawczej, która wskazuje na wzrost współczynnika detalu w badanym okresie. Z drugiej strony analiza wskaźnika detalu w odniesieniu do samej rozdzielczości narzędzia sugeruje, że wykorzystanie potencjału AM jest wynikiem decyzji świadomego projektanta, a nie ogólnego trendu. Fakt, że większość przypadków jest rozmieszczona w pobliżu skrajnych widm wartości WD, unaocznia kontrastujące podejścia, tzn. takie, w którym technologia wytwarzania jest wykorzystywana w sposób bezrefleksyjny, oderwany od metody projektowania oraz zupełnie odwrotne, w którym możliwości narzędzi są jednym z czynników definiujących projekt.

Ciekawą obserwacją, która pośrednio wynika z tych wniosków, jest kwestia zależności pomiędzy przestrzenią roboczą technologii a jej rozdzielczością. Średnia wartość WS wynosi początkowo ok. 40%, po czym drastycznie spada, a następnie ponownie stopniowo wzrasta do 60%, by na koniec spaść do poziomu poniżej 1%. Wiąże się to z pewnego rodzaju stanem granicznym, powyżej którego rozdzielczość technologii nie pozwala na praktyczne wykorzystanie oferowanego obszaru roboczego ze względu na czynniki ekonomiczne i czas produkcji. Urządzenia o powierzchni roboczej do 1 m³, to zazwyczaj rozwiązania FDM (fused deposition modeling), w których rozdzielczość, wynikająca z rozmiaru dyszy, wynosi ok. 0,01 – 0,03 cm. Powyżej 1 m i w przypadku maksymalnej wartości 10 000 m³ stosuje się różnego rodzaju autorskie ekstrudery o średnicy dyszy 1 – 2 cm, które montowane są na platformach mobilnych lub robotach przemysłowych. Drastyczny spadek WS występuje, gdy objętość jest tysiąc razy większa niż rozdzielczość narzędzia: 0,1 – 1 m³ w przypadku typowej rozdzielczości FDM 0,01 cm i 1000 – 10000 m³ w przypadku centymetrowego niestandardowego narzędzia do wytłaczania materiału (ME). Wynika to z faktu, że jednoczesne pełne wykorzystanie potencjału skali i detalu skutkowałoby bardzo długim czasem pracy oraz problemami technologicznymi wynikającymi choćby z małej odporności na ewentualne błędy wytwarzania (błąd w ramach mniejszego modułu implikuje konieczność ponownego wytworzenia tylko jego, a nie całości obiektu).

Podsumowanie

Jak wynika z przedstawionych analiz, aspekty narzędziowe (w sensie narzędzi wytwarzania używanych na placu budowy) i aspekty procesu wznoszenia budynku są interesującym polem badań, dotychczas niemalże nieporuszanym w odniesieniu do ich związków z projektowaniem architektonicznym. Proces projektowania traktowany jako działalność konceptualna i jak taka przekładany na fizyczne realia wznoszenia budynku musiał być zapośredniczony przez zapis koncepcji – rysunek lub, na wczesnym etapie zastosowania technik cyfrowych, wirtualny model. Dopiero w kolejnym kroku nastąpiło przełożenie na fizyczny artefakt na placu budowy. Nie

oznacza to oczywiście, że architekci nie byli świadomi tworzywa i procesu wytwarzania, o czym świadczy chociażby wspomniana sztuka stereotomii. Dopiero jednak cyfryzacja procesu wytwarzania pozwoliła na bezpośrednie przełożenie zapisu koncepcji architektonicznej na wytwarzanie obiektu, pozwalając tym samym na analizę porównawczą mierzalnych parametrów artefaktu i technologii. Dzieje się tak również dlatego, że specyfika wytwarzania addytywnego oferuje relatywnie dużą rozpiętość zarówno skal, w jakich operują narzędzia, jak i ich dokładności, co pozwala na rozbudowaną ilościową analizę porównawczą. Analiza ta z kolei umożliwiła wskazanie przypadków, gdzie dogłębna znajomość technologii wytwarzania była czynnikiem warunkującym decyzje projektowe (uwidocznione w parametrach ilościowych artefaktu). W ten sposób, operując podejściem ilościowym, można odnieść się do jakości procesu projektowania, wykorzystującego w pełni potencjał dostępnych możliwości.

Zaprezentowaną w artykule metodę można zastosować do kolejnych realizacji wykorzystujących wytwarzanie przyrostowe, jak i do innych metod wytwarzania, porównując zdefiniowane parametry współczynników skali i detalu, zachowując jednak świadomość kluczowej roli bezpośredniego połączenia zapisu projektowego z wytwarzaniem obiektów.

Literatura

- [1] Ingarden R. O dziele architektury w: Studia z estetyki. Tom drugi. Warszawa: Państwowe Wydawnictwo Naukowe; 1958. pp. 115–161.
- [2] Toker F. Gothic Architecture by Remote Control: An Illustrated Building Contract of 1340. Art Bulletin. 1985 vol. 67, no. 1. pp. 67–95.
- [3] Guzik W. Geometria maswerków gotyckich w: Biblioteczka Stowarzyszenia na Rzecz Edukacji Matematycznej, no. 3. Kraków: Wydawnictwo Szkolne Omega, 2011.
- [4] Hersey GL. Architecture and geometry in the age of the Baroque. Chicago: University of Chicago Press, 2000.
- [5] Duby G. The age of the cathedrals: art and society, 980-1420. Chicago: University of Chicago Press, 1981.
- [6] Delorme P. Le Premier tome de l'Architecture de Philibert de L'Orme..., Lyon, 1567. [Online]. <http://www.mdz-nbn-resolving.de/urn/resolver.pl?urn=urn:nbn:de:bvb:12-bsb10195337-1>[dostęp: 08.09.2023].
- [7] Semper G. The four elements of architecture and other writings w: RES monographs in anthropology and aesthetics. Cambridge [England]; New York: Cambridge University Press, 1989.
- [8] Frampton K. Studies in Tectonic Culture: the poetics of constriction in nineteenth and twentieth century architecture. Cambridge, Mass: M. I. T. Press, 2001.
- [9] Ingold T. Making: anthropology, archaeology, art and architecture. London; New York: Routledge, 2013.
- [10] Evans R. Architectural Projection w: Architecture and its image: four centuries of architectural representation: works from the collection of the Canadian Centre for Architecture, red. Blau, E., Evans, R. i Kaufman, E., Montreal: Canadian Centre for Architecture. 1989, pp. 19–35.
- [11] Mitchell WJ, McCullough M. Digital design media, 2nd ed. New York: Van Nostrand Reinhold, 1995.
- [12] Koszewski K. File-to-factory – nowe perspektywy w warsztacie architekta. Materiały Budowlane. 2010; 460: 33 – 36.
- [13] Hansmeyer M. Digital Grotesque II. <https://www.michael-hansmeyer.com/digital-grotesque-II>. [dostęp 10.06.2023].
- [14] Dillenburger B, Hansmeyer M. Printing Architecture: Castles Made Of Sand w: Fabricate 2014: Negotiating Design & Making, red. Gramazio F., Kohler M., Langenberg S., UCL Press. 2017. DOI: 10.2307/J.Ct1tp3c5w.15.

Przyjęto do druku: 20.03.2024 r.