



Białystok, 28.08.2023

dr hab. inż. arch. Aleksander Asanowicz, prof. PB
Wydział Architektury
Politechniki Białostockiej

RECENZJA PRACY DOKTORSKIEJ

pt. „**Wytwarzanie addytywne w architekturze. Uwarunkowania, potencjał i konsekwencje dla metod projektowych**” autorstwa mgr. inż. arch. Marcina Strzały, promotorem której był dr hab. inż. arch. Krzysztof Koszewski.

Podstawą recenzji jest wystąpienie Przewodniczącej Rady Dyscypliny Naukowej Architektura i Urbanistyka Politechniki Warszawskiej prof. dr hab. inż. arch. Krystyny Solarek, z dnia 27 czerwca 2023 roku.

Zgodnie z Ustawą z dnia 3 lipca 2018 r. Przepisy wprowadzające ustawę – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. poz. 1669), art.14 ust. 1 pkt 1, ust. 2 pkt 2 ustawy z dnia 14.03.2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. Nr 65, poz. 595, z późn. zm.) oraz Rozporządzeniem Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 19 stycznia 2018 r. w sprawie szczegółowego trybu i warunków przeprowadzania czynności w przewodzie doktorskim, w postępowaniu habilitacyjnym oraz w postępowaniu o nadanie tytułu profesora (Dz. U. poz. 261), celem niniejszej recenzji jest stwierdzenie czy rozprawa doktorska stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego oraz wykazuje ogólną wiedzę teoretyczną kandydata w danej dyscyplinie naukowej, a także umiejętność prowadzenia pracy naukowej.

Do recenzji przedłożono dysertację o objętości 313 stron, składającą się z czterech części: *Wprowadzenie, Badania własne, Badania eksperymentalne, Zakończenie*. Ponadto dysertacja zawiera streszczenie w języku polskim i angielskim, spis literatury liczący 152 pozycje, wykaz źródeł ilustracji (279 pozycji).

Wstęp

Rozpoczynając recenzję rozprawy doktorskiej należałoby odnieść się do pierwszego członu tytułu rozprawy – wytwarzanie addytywne. Użyte pojęcie jest pojęciem w architekturze nowym, co może wywoływać pewną konfuzję. Podanie tłumaczenia terminu na język polski

– wytwarzanie przyrostowe - nie zmienia sytuacji. Wyjaśnienie, że w zasadzie chodzi o zastosowanie technologii druku 3D, czyli że wytwarzanie addytywne/przyrostowe to technika produkcji obiektów trójwymiarowych na podstawie ich komputerowych modeli, która polega na łączeniu kolejnych warstw materiału również najczęściej wywołuje konsternację. Druk 3D był początkowo jedną z metod szybkiego prototypowania. Pierwsze metody szybkiego prototypowania stały się dostępne pod koniec lat osiemdziesiątych XX w. i były wykorzystywane do produkcji modeli i części prototypowych. Wzrost dokładności druku 3D umożliwia obecnie wykonywanie gotowych obiektów i części o jakości produkcyjnej w stosunkowo niewielkiej liczbie, jeśli jest to pożądane, stosunkowo niskim kosztem, biorąc pod uwagę koszty produkcji jednostkowej innych technik wytwarzania. Odniesienie pojęcia wytwarzanie addytywne do obszaru architektury jest nowe. Możemy przyjąć, że ten obszar działań rozpoczyna rok 2004. Problem wykorzystania metod addytywnych do „produkcji” architektury nie był w Polsce do tej pory podejmowany.

Ocena struktury pracy

Strukturę pracy należy ocenić bardzo wysoko. Jest ona logicznie skonstruowana, kolejność poszczególnych rozdziałów numerowanych od 1 do 13 nie budzi zastrzeżeń. Problematyczne jest jednak przyporządkowanie poszczególnych rozdziałów do czterech podstawowych części rozprawy. Ponadto części główne zatytułowane: 1 – *Wprowadzenie*, 2 – *Badania własne*, 3 – *Badania eksperymentalne* i 4 – *Zakończenie* nie pojawiają się w spisie treści. Wprowadza to niepotrzebny zamęt. Bez szkody, a nawet z korzyścią dla dysertacji, podział ten mógłby zostać usunięty. Jeśli Doktorant uznał go za niezbędny, to powinien znaleźć się on w spisie treści.

Recenzent ma również zastrzeżenia co do przyporządkowania niektórych rozdziałów częściom głównym. Wydaje się, że zarówno Rozdział 3 – Stan badań, jak i Rozdział 4 – Problemy i hipotezy badawcze powinny znaleźć się we *Wprowadzeniu*, czyli Części I. Analogicznie miejscem Rozdziału 12 – Weryfikacja hipotez badawczych w kontekście wyników badań powinna być Część III. Bez wątplenia poprawiłoby to strukturę logiczną dysertacji. Problemem redakcyjnym jest też sposób przedstawienia wykorzystanej literatury. Po pierwsze jest to wykaz pozbawiony numeracji. Niefortunnym zabiegiem jest połączenie w jednym wykazie publikacji w wersji papierowej i stron internetowych. Taka niefrasobliwość nie powinna mieć miejsca w rozprawie doktorskiej. Nie jest jasne jaki system prezentacji bibliografii przyjął Doktorant. Zdaniem recenzenta opieranie się na standardzie ogólnie przyjętym w Polsce byłoby właściwsze.

Recenzja dysertacji

Doktorant erudycyjnie rozpoczyna Rozdział 1 rozprawy od Tutusa Lukrecjusza Carusa, co świadczy o jego szerokich, również poza architektonicznych zainteresowaniach. Dużo jednak ważniejsze jest sformułowanie przez Doktoranta pytania o nasze możliwości pełnego zrozumienia technologii przyrostowych oraz o metody projektowe, które pozwoliłyby wykorzystać potencjał tych technologii. (s. 8) Aby rozpocząć poszukiwanie odpowiedzi na tak postawione pytanie niezbędne jest określenie szczegółowych celów badawczych, co też Doktorant czyni na stronie 11, jako punkt wyjścia przyjmując analizę uwarunkowań i

potencjału wykorzystania addytywnych metod produkcji w realizacji obiektów architektonicznych oraz określenie ich konsekwencji dla metod projektowych. Realizację tak określonego celu powinny umożliwić badania, które Doktorant podjął, zarówno w obszarze badań podstawowych jak i, co jest szczególnie cenne, w obszarze badań eksperymentalno-narzędziowych.

Rozdział 2 zawiera omówienie podstawowych teoretycznych aspektów rozprawy, a mianowicie: analizę wpływu materiału na kształt architektury oraz analizę wpływu narzędzi stosowanych w procesie realizacji projektu. W obu przypadkach Doktorant dochodzi do interesujących konkluzji. Doktorant pisze, że diametralną zmianę w odniesieniu do materialności architektury przynosi rewolucja przemysłowa. Tezę tę rozważa w kontekście wypowiedzi Duranda i Sempera, którzy zwracają uwagę na znaczenie materialności, czynią to jednakże w odmienny sposób. Powyższe stwierdzenie, jak i wypowiedź Franka Lloyd Wrighta, że każdy materiał wymaga innego podejścia, ma zasadnicze znaczenie dla dalszych rozważań i uprawomocnia tezę, że inżynieria materiałowa wciąż poszerza granice tego, co możliwe.

Omawiając drugi, wspomniany już aspekt – architektura a narzędzie Doktorant wprowadza rozróżnienie między narzędziem a metodą projektowania. Przyjmuje, że narzędzie to urządzenie służące do fizycznego oddziaływania na materiał. Gdy mówimy zaś o narzędziu wykorzystywanym w procesie projektowania to mamy na względzie metodę projektowania.

Analizując poglądy na rolę narzędzia w tworzeniu architektury dochodzi do wniosku wspartego pracami Mengusa, Gramazio, Kohlera, Shielda, że „narzędzie pozwala wydobyć ukryte wcześniej możliwości materiału, ale również przez odpowiednią obróbkę uzyskać całkiem nowe właściwości. Ta obustronna zależność staje się szczególnie istotna w kontekście (...) addytywnych metod produkcji”. (s. 30) Addytywne wytwarzanie jest głównym obszarem badań podjętych przez Doktoranta. Świadomość historii rozwoju metod przyrostowych dowodzi, że Doktorant jest w stanie wykorzystać w sposób twórczy dorobek ostatnich kilkudziesięciu lat i uzupełnić obszar nieciągłości między ideą architektoniczną i jej urzeczywistnieniem przestrzennym, o czym pisze Jan Słyk.

Należy podkreślić bardzo kompleksowe przedstawienie historii metod przyrostowych. Doktorant sięgnął do źródeł raczej nieznanymi w kręgu architektonicznym, co wskazuje na pewną interdyscyplinarność badań. Chociaż nie możemy być pewni słuszności użycia określenia „interdyscyplinarność”. O ile w odniesieniu do lat minionych takie definiowanie ma sens, to badania prowadzone przez Doktoranta wskazują na rozszerzenie kompetencji architekta i możliwe, że prowadzą do nowego paradygmatu „Projekt – Realizacja”.

W związku z powyższym recenzent zgadza się z wypowiedzią Doktoranta, że: „Współczesne metody addytywne uznane mogą być już za pełnoprawną technologię wznoszenia budynków (...). Jednocześnie architekci po raz kolejny muszą redefiniować swoją relację do materiału i narzędzia, a także stawiać pytania dotyczące ich miejsca w procesie projektowania i szukać tym samym nowych, adekwatnych metod projektowania”. (s. 37)

Przed przystąpieniem do badań własnych Doktorant przeprowadził analizę stanu badań. Na uwagę zasługuje oryginalne podejście do analizy źródeł. Po pierwsze analiza stanu badań była prowadzona w sposób ciągły w trakcie prac nad rozprawą. Metoda niezbyt często spotykana, aczkolwiek w danym przypadku właściwa z racji, jak pisze Doktorant, dynamiczny rozwój dziedziny. Po drugie, przyjęto dwie metody prowadzenia analiz: metodę synchroniczną i asynchroniczną. (s. 42) Po trzecie, wnioski analiz zostały podzielone na dwie grupy. Grupa pierwsza obejmowała dominujące tematy badawcze i potencjał wykorzystania metod addytywnych w architekturze. Doktorant nazywa tę grupę obszarem konsensusu. Grupa druga – obszar definiowania dyskursu – odnosi się do obszarów problematycznych, wymagających dalszych badań. Takie podejście jest bardzo cenne, jako że ukazuje całe spektrum poglądów i kontrowersji. Sama prezentacja analiz jest przeprowadzona bez zarzutu. Przeanalizowane zostały zarówno aspekty technologiczne jak i nie technologiczne, takie jak: ekonomia, ekologia, prawodawstwo.

Za szczególnie interesujące należy uznać rezultaty analizy obszarów problematycznych. Doktorant zwraca uwagę na dysonans między deklarowaną swobodą form a przeważającymi w większości publikacji obiektami „prostokreślnymi” wykonanymi z betonu. Kolejnym obszarem problematycznym jest brak transdyscyplinarnego podejścia do badań. Oba te problemy muszą zostać rozwiązane jeśli architektura addytywna ma się rozwijać. Taki punkt widzenia ma wpływ na zdefiniowanie trzech obszarów badań: uwarunkowania i potencjał wykorzystania addytywnych metod produkcji w architekturze, ogólne konsekwencje dla metod projektowych umożliwiających wykorzystanie powyższego potencjału i szczególne przypadki zastosowania metod projektowych. Logika tak zdefiniowanych badań nie budzi wątpliwości. Każdemu obszarowi badań przyporządkowana jest odpowiednia hipoteza badawcza.

Bazując na zdefiniowanych w poprzednich rozdziałach obszarach badań, hipotezach i metodyce badań Doktorant sporządził katalog obiektów architektonicznych zrealizowanych przy użyciu addytywnych metod produkcji w latach 2004 – 2020. Prezentacji Katalogu poświęcony jest Rozdział 6. Recenzent nie ma uwag co do kryteriów wyboru i struktury danych. Oba te elementy zostały opracowane prawidłowo. Na uwagę zasługuje wykorzystanie klas projektowania zdefiniowanych przez Rivkę Oxman. Katalog przypadków obejmuje 82 obiekty. Każdemu z nich przeznaczona jest karta katalogowa, zawierająca wszystkie niezbędne dla analiz dane, zarówno w formie tekstowej jak i ilustracji graficznych. Jednolitość struktury prezentacji ułatwia percepcję rozprawy i dokonywanie własnych porównań.

Bazując na Katalogu Doktorant przeprowadza analizę ilościową. Zastosowany aparat matematyczny jest prawidłowy, a przedstawione na wykresach wyniki są interesujące i potwierdzają trend rozwojowy wytwarzania addytywnego w architekturze (wykres 2, s. 107). Interesujący jest również wniosek, będący rezultatem analizy typologii przypadków (wykres 4, s. 107). Doktorant formułuje przypuszczenie, że architekci projektując częściej myślą o całości założenia czy jego formie, a nie o technologii, której nie traktują jako

narzędzia realizacji budowli czy środka wyrazu architektury. (s. 108) Recenzent oczekuje rozwinięcia tego stwierdzenia w prezentacji rozprawy. Tym bardziej, że dalej Doktorant pisze, iż zauważalny jest fakt, „że wielokrotnie sama technologia, nawet jeśli nie dzieje się tak świadomie, generuje pewien rodzaj wyrazu estetycznego przypadków, których rola została określona jako stricte strukturalna”. (s. 109)

Analizę danych architektonicznych obiektów z Katalogu Doktorant przeprowadza w 4 aspektach: rozmiar obiektu, rozmiar modułów, rozmiar detalu, metoda projektowa. Analiza ta również wykazała szereg ciekawych zależności. Parametry - rozmiar budynku i rozmiar detalu - wykazują tendencję wzrostową, przy równoczesnej tendencji malejącej rozmiaru detalu. Potwierdza to wstępne założenie o rozwoju metod addytywnych. Potwierdzają to również rezultaty analizy metod projektowych. Coraz szerzej wykorzystywane są zaawansowane metody projektowania performatywnego (wykres 9, s. 116).

Wnioski z analizy danych ogólnych i architektonicznych są sformułowane właściwie. Wynikają z logicznego procesu wnioskowania. Na uwagę zasługują opracowane przez Doktoranta wykresy od 6 do 9.

Omawiając dane technologiczne Doktorant podejmuje właściwą decyzję o uwzględnieniu dwu z pięciu parametrów technologicznych. Będą to: grupa technologii w ramach których wytworzone zostały analizowane obiekty i materiał. W odniesieniu do grupy pierwszej uzasadnia decyzję dominacją obiektów wytworzonych metodami *material extrusion* oraz *binder jetting*. (s. 117) W przypadku grupy drugiej – większość obiektów wyprodukowano z ceramiki, betonu lub polimerów. Doktorant właściwie eliminuje z obszaru analizy parametry mające jedynie pośrednie przełożenie na architekturę. Przeprowadzone analizy danych ogólnych, architektonicznych i technologicznych w większości przypadków pokrywają się z intuicyjnie formułowanymi oczekiwaniami są poprawne

Analizy porównawcze: współczynnik skali - porównanie rozmiaru modułów i rozmiaru technologii oraz wskaźnik detalu – porównanie rozdzielczości detalu projektowego i rozdzielczości technologii dają interesujące wyniki. Okazuje się, że im większe urządzenie w tym mniejszym stopniu, mniej efektywnie i ekonomicznie jest one używane. Uwzględnienie współczynnika skali powodowałoby zatem odrzucenie jednej czwartej obiektów z Katalogu. Doktorant wyklucza zatem z dalszej analizy ten współczynnik. Analiza wskaźnika detalu wykazała, że lepsze w zakresie wskaźnika detalu rozwiązania wymagają wykorzystania nowych, bardziej zaawansowanych metod projektowych. Według Doktoranta obecnie mamy do czynienia z dysonansem między możliwościami materiałowo-narzędziowymi a metodami projektowania i używanym instrumentarium. Recenzent uważa tę obserwację za ważną z punktu widzenia kierunku dalszego rozwoju przyrostowych metod budowania.

Zamierzeniem Doktoranta było przeprowadzenie zarówno analizy ilościowej jak i jakościowej obiektów zgrupowanych w Katalogu. Analiza jakościowa jest prezentowana w Rozdziale 8. O ile w Rozdziale 7 wykazano, że po pierwsze istnieje przewidywany w hipotezach wzrost znaczenia rozdzielczości w detalu projektów architektonicznych i po

drugie, że w przypadku podobnej rozdzielczości detalu i natywnej rozdzielczości narzędzia wykorzystywane są bardziej zaawansowane metody projektowe, to w Rozdziale 8 celem jest zrozumienie potwierdzonej zależności między narzędziem a metodą projektową. Doktorant przeprowadził procedurę ograniczenia ilości przypadków i na podstawie prawidłowo określonych kryteriów do analizy wybrał dziesięć przypadków, po dwa na każdą grupę materiałów. Wybrane obiekty zostały bardzo szczegółowo opisane i przeanalizowane z wykorzystaniem ujednoczonej struktury opisu. (Kontekst, Architektura, Metody wytwarzania, Metoda projektowa). (s. 137)

Przeprowadzone przez Doktoranta analizy pozwoliły na sformułowanie ciekawych wniosków, które zostały przedstawione w podrozdziale 8.5. Wnioski te są podzielone na dwie grupy. Grupa pierwsza jest próbą uogólnienia uzyskanych rezultatów. Grupę drugą stanowią uwagi szczegółowe, formułowane w odniesieniu do wszystkich z dziesięciu analizowanych przypadków. Jest rzeczą zastanawiającą znaczna ilość tych uwag. Takie rozdrobnienie budzi wątpliwości. Powstaje pytanie czy tak szczegółowych uwag nie można było usystematyzować i pogrupować. Chociaż możliwe jest, że problem ten wynika z niewielkiej ilości analizowanych obiektów. Nie jest to zarzut, ale jedynie stwierdzenie faktu, że analizowana metoda wytwarzania nie jest jeszcze zbyt popularna w architekturze. Do podobnego wniosku dochodzi również Doktorant pisząc: „W momencie rozpoczęcia zbierania i tworzenia katalogu przypadków (2016) wykorzystywanie metod addytywnych w realizacji architektury było w początkowej fazie rozwoju”. (s. 229)

W tym kontekście niezwykle cenna jest prezentacja autorskich badań eksperymentalnych jaki doktorant podejmował od roku 2014. Prezentację badań eksperymentalnych rozpoczyna omówienie projektu „Modular Light Cloud”, prezentowanego na Konferencji ECAADE (Education and Research in Computer Aided Architectural Design in Europe w Wiedniu w 2015 roku. Prace nad stworzeniem instalacji wykazały szereg problemów. Właśnie problem z instrumentarium projektowego stał się jednym z powodów podjęcia recenzowanej rozprawy. Stało się to również podstawą do prac badawczych o charakterze narzędziowym, które Doktorant realizował w latach 2015-2022. Opisane na stronach 251 – 269 kolejne iteracje autorskich narzędzi projektowych umożliwiły stworzenie autorskiej metody projektowej, która umożliwia projektowanie, symulację i optymalizację wewnętrznych struktur obiektów wytwarzanych metodami addytywnymi. Doktorant szczegółowo przedstawia dwa problematyczne aspekty metody, które wymagają dalszego rozpoznania i poszukiwania sposobów ich rozwiązania. Pierwszym problemem jest możliwość operowania na plikach znacznych rozmiarów. Model cegły, mający dokładność 5 mm, zajmowałby 1 gigabajt. Problem drugi to trudność/niemożliwość znalezienia optymalnych materiałowo rozwiązań w formach o bardzo skomplikowanych parametrach statycznych. Doktorant w trybie przypuszczającym formułuje potencjalne metody rozwiązania tych problemów. (s. 271)

W kończącej rozprawę Części 4 Doktorant przeprowadza weryfikację trzech głównych tez rozprawy. Jest to wywód logiczny, oparty o wnioski przeprowadzonych badań. Doktorant

stwierdza, że hipoteza pierwsza i druga znalazły swoje potwierdzenie. Hipoteza trzecia wymaga przeprowadzenia pełnych badań laboratoryjnych fizycznych prototypów i wykorzystania autorskiej metody w wielkoskalowym projekcie eksperymentalnym.

Recenzent zgadza się ze stwierdzeniami Doktoranta i uważa, że przeprowadzone badania i działania eksperymentalne potwierdzają założenia rozprawy. Równocześnie akceptuje rozważania o języku opisującym relacje materiału i narzędzi, o ewolucji narzędzia ukierunkowanej na umożliwienie architektowi pracę w „wielkoskalowym zoomowalnym” środowisku, czy w końcu o roli architekta w projektowaniu, gdzie „architekt projektował będzie zachowania indywidualnych podsystemów, określał ich wzajemne interakcje a wreszcie określał cel, który mają osiągnąć. Forma będzie wynikiem tych trzech czynników”. (s. 281)

Rozprawę kończą dwa obrazoburcze, ale według recenzenta słuszne konstatacje. Pierwsza to wypowiedź Neri Oxman: „Praktyka architektury budzi się w końcu do swojej nowej roli jako natury.” (s. 281) Drugie stwierdzenie formułuje Doktorant, pisząc: „ Tworzyć będziemy instrukcje oraz wejściowe i wyjściowe warunki brzegowe, a nie projekty”. (s. 281)

Podsumowanie

Podsumowując należy stwierdzić, że rozprawa prezentuje bardzo wysoki poziom naukowy. Trudno w niej znaleźć nieścisłości, czy też braki logiczne. Doktorant pokazuje wysokie umiejętności prowadzenia badań naukowych. Przedmiot i zakres pracy oraz zamierzenia badawcze zostały sformułowane właściwie. Przyjęta metoda badań pozwoliła na zebranie wszechstronnej informacji dotyczącej analizowanego problemu. Całość wywodu wzajemnie się uzupełnia, tworząc spójną logiczną całość. Wykorzystanie w prowadzeniu badań metody Imre Horwatha w sposób bardzo dobry porządkuje strukturę rozprawy, spinając ze sobą jej kluczowe elementy.

Wartościowym aspektem recenzowanej rozprawy jest osobiste wieloletnie zaangażowanie Doktoranta w rozwój metod addytywnego wytwarzania w architekturze.

Dysertację należy uznać za wartościową, porządkującą obecny stan wiedzy i ukazującą perspektywę dalszego rozwoju metod komputerowego wspomaganie projektowania architektonicznego, a w szczególności zdeterminowanych wprowadzaniem nowych metod i narzędzi wytwarzania architektury. Recenzent podkreśla wysoką jakość procesu analizy i bardzo umiejętną prezentację wyników.

Reasumując

Stwierdzam, że praca doktorska będąca przedmiotem recenzji spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim określone w art. 13 Ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. Nr 65, poz. 595, z późn. zm.). Wnoszę o jej przyjęcie oraz dopuszczenie mgr. inż. Marcina Strzały do dalszych etapów postępowania w sprawie nadania stopnia doktora.

