

Prof. nzw. dr hab. inż. arch. Krystyna Januszkiewicz  
Wydział Budownictwa i Architektury  
Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie  
Ul. Żołnierska 50  
71-210 Szczecin

## RECENZJA rozprawy doktorskiej

„Optymalizacja topologii kontinuum materialnego w poszukiwaniu form architektonicznych. Adaptacja wybranych metod inżynierskich do celów architektonicznych” autorstwa  
mgr inż. arch. Sebastiana Białkowskiego  
pod kierunkiem dr hab. inż. arch. Anetty Kępczyńskiej-Walczak, prof. PŁ

Recenzja została opracowana na podstawie umowy-zlecenia zawartej w dniu 13.06.2018 przesłanej przez Wydział Budownictwa, Architektury i Inżynierii Środowiska Politechniki Łódzkiej.

Przedłożona do recenzji rozprawa doktorska jest manuskrytem zwartym liczącym 386 stron. Manuskrypt ten zawiera: Dodatek A z kodem źródłowym programu tOpos; Notacja; Słownik pojęć; Spis akronimów; Spis rysunków; Spis tabel; Spis listingów; Bibliografię (97 pozycji) oraz źródła internetowe (24 pozycje). Manuskrypt ten podzielony został na cztery części o odrębnych tytułach, te zaś zawierają rozdziały i podrozdziały.

Manuskrypt ten obejmuje istotne zagadnienia dotyczące kształtowania formy architektonicznej przy pomocy cyfrowych narzędzi projektowania inżynierskiego. Podjęte przez pana mgr inż. arch. Sebastiana Białkowskiego badania mają charakter interdyscyplinarny i obejmują wybrane zagadnienia z zakresu informatyki, inżynierii strukturalnej oraz architektury. Uzasadnia to w pełni powołanie promotora pomocniczego pana dr inż. Marka Wojciechowskiego z Katedry Geotechniki i Budowli Inżynierskich PŁ, który specjalizuje się w inżynierii strukturalnej wspomaganej komputerem z zastosowaniem Metody Elementów Skończonych (MES). Autor dysertacji dokonuje bowiem analizy możliwości optymalizacji rozłożenia materiału budowlanego w obiektach architektonicznych aby wykazać, że inżynierskie metody numeryczne mogą wspomóc proces poszukiwania formy, zwłaszcza na etapie formułowania koncepcji. Ponadto, w oparciu o wyniki swoich badań, pan Białkowski opracował narzędzia cyfrowe (programu tOpos) wspomagające wyszukiwanie formy optymalnej pod względem rozłożenia materiału, dowodząc w ten sposób tezy przyjętej w dysertacji.

Niewątpliwie, recenzowana rozprawa doktorska stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego poparte eksperymentalnym projektem z zakresu informatyki z elementami wiedzy z obszarów inżynierii strukturalnej i architektury.

Łączenie wiedzy z zakresów informatyki i architektury nie jest dziś nowe. Jest to konsekwencja rewolucji informatycznej, która od kilku dekad transformuje zarówno warsztat jak i stronę konceptualną architektury, zmieniają się także środki produkcji, stawiane są nowe wymagania wobec struktur budowlanych. Coraz więcej uniwersytetów w różnych krajach oferuje studentom architektury nowy kierunek Dual Degree - Architecture and Computation, po ukończeniu którego absolwent otrzymuje dwa dyplomy z informatyki i architektury. Rozprawa doktorska pana Białkowskiego jest zatem „zwiastunem” nowych tendencji w edukacji i badaniach nad architekturą.

Zaznaczyć należy, że rozwiązywany w rozprawie problem naukowy jakim jest optymalne rozłożenie materiału budowlanego w strukturach budowlanych jest nader aktualny. Imperatyw ochrony środowiska i zrównoważonego rozwoju wymagają dziś ponownego rozpatrzenia problemu efektywności w budownictwie w aspekcie ekologii. Klagenfurcką Deklarację Efektywności, ogłoszoną 31.07.1999 roku, nazwana proekologicznym manifestem Unii Europejskiej, zobowiązuje do rozpoznawania i wykorzystywania najnowszych osiągnięć we wszystkich dziedzinach nauki, techniki i technologii, do badań i wdrażania nowych rozwiązań. Zwłaszcza w budownictwie, które jest jednym z głównych eksploatatorów środowiska naturalnego. Przedstawione przez mgr inż. arch. Sebastiana Białkowskiego badania naukowo-eksperymentalne są niejako odpowiedzią na to wezwanie. Uruchomiony przez Komisję Europejską program naukowo-badawczy „EU Environment Action Programme to 2020” przeznaczają znaczne środki finansowania tego rodzaju innowacyjnych badań.

### **Ogólna charakterystyka rozprawy**

Uwagę recenzenta zwraca tytuł rozprawy pana Białkowskiego, gdyż jest tożsamy, w swoim pierwszym członie, z tytułem książki pana R. Kutylowskiego pt. „Optymalizacja topologii kontinuum materialnego” wydanej w 2004 roku przez Oficynę Wydawniczą Politechniki Wrocławskiej. Taka zbieżność może być niepokojąca. W obu przypadkach chodzi o materiał budowlany, co wyjaśnia Kutylowski we wstępie do swojej książki na s. 5. *Nota bene* z punktu widzenia stylistyki j. polskiego, w obu przypadkach, lepszym przymiotnikiem jest słowo materiałowy gdyż nie chodzi o kontinuum bytu abstrakcyjnego związanego z szeroko pojętą materią np. w sferze intelektualnej, lecz o materiał budowlany. Czy np. tytuł „Optymalizacja topologii rozmieszczenia materiału w cyfrowym kształtowaniu formy architektonicznej” nie byłby bardziej stosowny i adekwatny do zawartości rozprawy?

Tekst podstawowy dysertacji podzielony został na cztery części, które zawierają rozdziały i podrozdziały stanowiące logiczną całość.

Część I (s.3-34) zatytułowana „Wstęp” składa się z jednego rozdziału, w którym autor próbuje określić problematykę rozprawy doktorskiej, określa cel badań, formułuje tezę pracy, opisuje stan badań, a także przedstawia strukturę dysertacji opisując w skrócie zawartość poszczególnych części i rozdziałów. Brak jest uzasadnienia wyboru tematu i określenia zamierzenia naukowo-badawczego, określenia problemu naukowego, który będzie rozpatrywany. Pan Białkowski nie określa ani pola, ani zakresu badań, nie przedstawia także przedmiotu badań i metody pracy. Natomiast, Autor przedstawia, w dużym skrócie, jak przebiegał rozwój cyfrowych narzędzi dla architektów, pisze o „architekturze nowych technologii” próbując objaśnić co rozumiane jest przez „generatywność architektury”, „parametrycyzm”, „projektowanie przez proces”, „systemy formotwórcze”. Są to zagadnienia nie mające bezpośredniego związku z podjętym zamierzeniem naukowo-badawczym, a przedstawia się je na piętnastu stronach (s. 4-17). Natomiast, paragraf pt. „Analityczne formowanie architektury”, który powinien zawierać treści istotne dla prowadzonych badań, zajmuje zaledwie trzy strony i obejmuje podpunkty, takie jak „Architektura sił”, „Architektura performatywna” oraz „Architektura numeryczna” z czego istotny dla pracy są podpunkty pierwszy i ostatni, one powinny być rozwinięte.

Teza pracy (s. 33 podpunkt 1.3.2. „Zasadnicza teza pracy”) jest trójczłonowa i podana w sposób sugerujący, że Autor rozprawy zamierza dowodzić trzech tez jednocześnie. Może należałoby ująć tezę w jednym zdaniu złożonym.

Jeśli chodzi o opis stanu badań (paragraf 1.2), to zawiera podpunkty takie jak: „Metody numeryczne”, „Metody optymalizacyjne”, „Inżynierskie metody numeryczne w architekturze”. Zawarte tam treści są

raczej przedstawieniem historii rozwoju inżynierskich narzędzi cyfrowych, a nie prac naukowych i badań eksperymentalnych prowadzonych na świecie i w Polsce odnośnie tematu i przedmiotu badań. Jest to istotne gdyż właśnie „Stan badań” pozwala określić w jakim stopniu podjęte w rozprawie doktorskiej badania są wnoszące w daną dyscyplinę wiedzy. Część pierwsza recenzowanej dysertacji wymaga dogłębnej rewizji i ponownego przedstawienia.

Część II (s.37-56) pt. „Metody numeryczne” zawiera dwa rozdziały „Metoda elementów skończonych dla trójwymiarowego kontinuum materialnego” (s.37-55) oraz „Optymalizacja trójwymiarowego kontinuum materialnego” (57-75). W rozdziałach tych pan Białkowski wyjaśnia na czym polega Metoda Elementów Skończonych oraz dokonuje przeglądu metod optymalizacji topologii trójwymiarowego kontinuum materiałowego. Część II jest istotna dla przedstawienia wyników badań eksperymentalnych, gdyż zawiera opis i wyprowadzenie założeń przyjętych dla modelu obliczeniowego. Założenia te dotyczą procesów deformacji bryły geometrycznej (sześciangu) zarówno tych fizycznych jak i geometrycznych, które teoria sprężystości opisuje liniowymi równaniami różniczkowymi. Konsekwencją tej liniowości jest znaczne uproszczenie procedury MES, co przyspiesza proces obliczeniowy, a jednocześnie czyni ograniczenia w zastosowaniu.

Pan Białkowski odważnie wkracza na obszary, które dla architektów są mało znane i pozostawiane zazwyczaj w domenie inżynierskiej. Wyprowadza równania sprężystości liniowej, aby wektorowo określać pole przemieszczeń w kartezjańskim układzie współrzędnych, następnie opisuje stan sprężystości dla nieskończenie małej objętości poddawanej obciążeniu. Posługuje się tu wyrażeniem tensora o budowie analogicznej jak w przypadku odkształceń. Opisuje także relację pomiędzy naprężeniem a odkształceniem w izotropowym trójwymiarowym kontinuum materiałowym, którą wyraża przywołując prawo Hooke.

W następnym paragrafie tego rozdziału pt. „Równania elementu skończonego” Autor przyjmuje, węzły jako miejsce wzajemnego oddziaływania na siebie dowolnych trójwymiarowych elementów geometrycznych. Określa też trzy stopnie swobody dla węzłów w przestrzeni trójwymiarowej. Zakłada, że istnieje wektor, który opisuje przemieszczenie dowolnego punktu w elemencie spowodowane działaniem dowolnej siły, co powoduje deformację. Określa także jaki jest to rodzaj sił i sposób ich działania. Pozwala to na wyprowadzenie odpowiednich równań matematycznych. Aby określić powiązanie pola przemieszczeń dowolnego punktu w przestrzeni z przemieszczeniami węzłowymi. Autor proponuje posłużyć się funkcją kształtu. Funkcje te różnią się w zależności od rodzaju elementu i jego geometrii. Dalej, opisuje wzorami matematycznymi, przemieszczenia węzłów i wprowadza interpolacje elementu posługując się rachunkiem macierzowym. Wyprowadza także równania równowagi elementu, opisując jakie warunki musi spełniać układ sił działających na ciało sztywne.

Następnie pan Białkowski przechodzi do wyznaczenia macierzy sztywności. Aby to uczynić wyprowadza definicję kształtu określając najpierw dwa układy współrzędnych lokalny i globalny. W układzie lokalnym następuje całkowanie macierzy, zaś w układzie globalnym określone są relacje pomiędzy sąsiednimi elementami. Wymusiło to podwójną indeksację elementów składowych. Funkcja kształtu w układzie lokalnym została przedstawiona w postaci wektora, gdzie współrzędne lokalne muszą się zawrzeć w określonym przedziale liczbowym. W odniesieniu do układu globalnego, to indeksy nadane elementom i węzłom określają topologię MES oraz umożliwiają agregację globalnej macierzy sztywności opisaną dalej w rozprawie na stronach od 51 do 54. Jako, że globalna macierz sztywności jest sumą macierzy wszystkich elementów dyskretyzowanego obszaru przewidziano ich agregację w osobnym procesie oraz jej jakościową optymalizację wydajności. Rozpatrując problem rozwiązywania równań równowagi, pan Białkowski proponuje wykorzystanie odpowiedniego narzędzia cyfrowego w pakiecie Basic Lineal Algebra Subprograms (BLAS), widzi również potrzebę

stosowania metody Gradientu Sprężonego dla macierzy symetrycznych określonych dodatnio i zamieszcza w dysertacji odpowiedni algorytm (s. 56). Kolejny rozdział w „Części drugiej” zatytułowany „Optymalizacja topologii trójwymiarowego kontinuum materialnego” poświęcony został optymalnemu układowi „liniowo sprężystej struktury”. Układ taki może zostać znaleziony przy pomocy „metody dystrybucji materiału” zwłaszcza dla struktur prętowych. Jednakże, Autor koncentruje się na innym problemie. Chciałby, aby cyfrowe narzędzia projektowania dystrybuowały materiał konstrukcyjny w ograniczonej przestrzeni projektowej w sposób najbardziej efektywny z uwzględnieniem przyjętych warunków dla materiału, obciążania i podparcia. Zmienną optymalizowaną jest wtedy gęstość materiału, która zmienia się od wartości 0 (brak materiału) do 1 (pełne właściwości materiału), w każdym punkcie kontinuum materiałowego. Ponieważ zastosowany algorytm jest iteracyjny, dąży on do osiągnięcia domeny gęstości materiału 0, albo 1, bez wartości pośrednich. Wybór strategii optymalizacji rozłożenia materiału poprzedza przegląd ich rodzajów (s.58-60). Autor wybiera metodę, która operuje ciągłymi zmiennymi projektowymi zwaną metodą gradientową. Wymusza to wprowadzenie tzw. materiału fikcyjnego, którego właściwości są interpolowane pomiędzy jego pełnymi właściwościami a ich brakiem. Wynikiem tego procesu są niedyskretne wartości gęstości wewnątrz obszaru projektowego. Stwarza to dodatkowy problem i wymaga wprowadzenia współczynnika penalizacji. Pomocny okazał tensor sztywności wraz z modułem Younga. Pan Białkowski, na potrzeby tego zadania, modyfikuje równania równowagi aktualizując jednocześnie moduł Younga w metodzie SIMP (Solid Isotropic Microstructure with Penalization). Następnie Autor określa funkcję celu by przedstawić procedury rozwiązania problemu optymalizacji, poruszając zagadnienia takie jak optymalność kryteriów, analiza wrażliwości. Przedstawia także proces obliczeniowy gdzie dystrybucja gęstości wewnątrz przestrzeni projektowej oparta została na algorytmach numerycznych z elementami algebry liniowej. Algorytm optymalizacji topologii przedstawia na schemacie blokowym (Rysunek 3.6. s.74). Jednakże, końcowy wygląd topologii otrzymanych za pomocą dystrybucji gęstości narzędziami SIMP obarczony jest pewną niedogodnością, jeśli chodzi o numeryczną implementację procesu optymalizacji. Przedstawione w dysertacji rozwiązanie tego problemu jest nowe i oryginalne. Na etapie koncepcji nie budzi zastrzeżeń.

Część III (s. 85-237) pt. „Implementacja” składa się z dwóch rozdziałów: „tOpos – implementacja metod numerycznych”(s. 85-108) oraz „Biblioteka tOposCore” (109-237). Jest to opis autorskiego cyfrowego programu tOpos, który jest implementacją wyników badań przedstawionych w Części II dysertacji. W rozdziale pierwszym Części III przedstawione zostały główne założenia programistyczne dla programu tOpos, takie jak środowisko obliczeniowe i wymagania dotyczące jego wydajności obliczeniowej oraz język programowania. Wzięto także pod uwagę wymagania użytkownika, jego potrzebę wizualnej reprezentacji danych w przestrzeni trójwymiarowej. Aby ułatwić pracę z programem, pan Białkowski zaproponował oddzielną aplikację zawierającą środowisko 3D oraz narzędzia, za pomocą których można manipulować i tworzyć dane dotyczące bryły projektowanej formy obiektu. Jednakże zamysł ten nie został zrealizowany ze względu na brak środków badawczych. Łatwiejszym w realizacji okazało się opracowanie dodatku do istniejącego już programu i skorzystanie z jego środowiska i narzędzi modelujących. Wybrano popularny wśród architektów modeler parametryczny Rhinoceros3D z aplikacją Grasshopper3D. Aplikacja ta oparta jest na deklaratywnym języku programowania wizualnego VPT i polega na manipulowaniu elementami graficznymi zamiast na pisaniu tekstu, jak w tekstowych językach programowania. W porównaniu do programów tekstowych VPL ma tę zaletę, że jest intuicyjny, a tym samym wyróżnia się szybkim tempem uczenia się. Umożliwia także budowanie algorytmów za pomocą gotowych zestawów instrukcji. Ponadto, Rhinoceros3D z aplikacją Grasshopper3D obsługują obrazowane modyfikacje w czasie rzeczywistym,



co oznacza, że wszelkie modyfikacje skryptów są natychmiast uaktualniane i pokazywane jako geometria na wyjściu. Jest to możliwe dzięki zorganizowanemu przepływowi danych. Wybór przez pana Białkowskiego tego właśnie oprogramowania do implementacji swoich wyników badań należy uznać za najlepszy z możliwych.

Do napisania programu tOpos, jako dodatku do istniejącej aplikacji Grasshopper3D, pan Białkowski użył języka obiektowego C# z grupy NET Framework. Było to wymagane przez, służącą w tym celu platformę Rhinocommon API. Interfejs tOpos został opracowany przez autora zgodnie z interfejsem Rhinoceros/Grasshopper3D, co ułatwi pracę z programem. Zastosowano także technologię CUDA do przeprowadzania obliczeń na procesorach graficznych, która została udostępniona w 2006 aby umożliwić znaczną akcelerację przetwarzania zadań z dużą ilością danych, co szczegółowo opisano w rozdziale 4.3.3 (s.93-94 oraz s.100). W drugim rozdziale (s.109-237) Części III dysertacji pan Białkowski wyjaśnia budowę informatyczną tOpos oraz przedstawia jego logikę i działanie. Algorytm optymalizacji topologicznej o przebiegu liniowym narzucił przebieg procesu implementacji oraz jego strukturę. tOpos implementuje tylko poligonalne siatki trójwymiarowe. Obiekty modelowane za pomocą krzywych i powierzchni NURBS nie są obsługiwane, należy je przetworzyć na obiekty siatkowe typu "mesh". *Nota bene* popularny program inżynierski ROBOT pozwala na import obiektów typu NURBS w celu przeprowadzenia analiz MES, podobnie program ANSYS, a także Digital Project dla architektów, zupełnie nie zauważony przez Autora dysertacji. Programy te wykonują także analizy statyczne dla założonych warunków, współpracują z technologią BIM (Building Information Modeling). Jednakże, niełatwo dokonać analizy topologicznej, jak czyni to aplikacja tOpos. Oczywiście, tOpos jest uproszczoną wersją narzędzi inżynierskich, a jego popularyzacja może się przyczynić do rozszerzenia świadomości projektantów o efektywnym stosowaniu materiału budowlanego już na etapie koncepcji projektu architektonicznego. Jest to cenne, zwłaszcza dziś, kiedy możemy narysować przy pomocy krzywych NURBS formy o wysokim stopniu złożoności geometrycznej. Jednakże, nie wszystkie one mają cechy „budowlalności”, które należy im nadać w dalszym ciągu procesu projektowego, co często ma wpływ na ukształtowanie formy. W rozdziale pierwszym Części III Autor opisuje także komponenty, które definiują kształt modelu, warunki brzegowe i wprowadzają ograniczenia domeny oraz definiują jej rozdzielczość. Kształt modelu określa tu zamknięta siatka typu mesh, która wprowadzona np. do modelu typu NURBS pozbawia go gładkości w stopniu zależnym od wielkości faset siatki. Taki model definiowany jest, jak przyjmuje pan Białkowski, w komponencie „Boundary Domain”. Piny Y oraz P dostarczają wtedy informacji o właściwościach materiałowych i odpowiadają za moduł Younga oraz współczynnik Poissona. Określana jest także wartość startowa gęstości materiału. Autor wprowadza „Analyser”, w którym zawierają się, jak nazywa, „uniwersalne ustawienia”, które powinny się sprawdzać w większości przypadków. Optymalizacji topologicznej dokonuje się przy pomocy komponentu „Optimus”, który został opisany szczegółowo na stronach 102-105. Autor przedstawia tu schemat prezentujący proces analizy/optymalizacji modelu oraz schemat powiązań komponentów umożliwiających wizualizację otrzymanych wyników. Omawia także komponenty z grupy „Model Data”, gdzie gromadzone są dane dotyczące objętości, dane numeryczne oraz dane dotyczące naprężeń. Weryfikacji wydajności „tOpos” służą komponenty należące do grupy „Benchmark”.

W drugim rozdziale Części III (s.109-237) opisano biblioteki rdzenia programu nazwane „tOposCore” przedstawiając strukturę, architekturę danych, warunki brzegowe, przestrzenie modelowania danych etc. zamieszczając odpowiednie „Listingi”, czyli wydruki z najbardziej istotnymi fragmentami kodu programu tOpos. Są one pomocne w zrozumieniu działania programu. Rzadko zamieszczane w pra-

cach naukowych. Dlatego rozdział ten jest tak obszerny, choć nieopisane fragmenty kodu źródłowego autor zamieścił w Dodatku A na stronach 297-348.

Cześć IV (s.241-387) pt. „Architektura” składa z dwóch rozdziałów „Badania zastosowania aplikacji tOpos (s.241-293) oraz „Posumowanie i wnioski” (s. 293-295). Rozpatrywana jest tu przydatność programu „tOpos” w praktyce architektonicznej. W rozdziale pierwszym Części IV Autor przedstawia analizy wydajności aplikacji tOpos, założenia testu wydajności „solverów”, opisuje metodę pomiaru z uwzględnieniem czasów potrzebnych dla przebiegu procedur, co przedstawia w zestawieniu tabelarycznym. Analizę wyników popiera Autor wykresami obrazującymi wydajność zastosowanych „solverów” w stosunku do stopnia swobody modelu (s.244-245). Rozpatruje także problem wydajności pamięci RAM architektury CPU, które oscylują w granicach 8-16 GB. Oprócz zalet programu pan Białkowski przedstawia także pewne jego niedoskonałości, które nie wynikają z popełnionych błędów, ale są rezultatem przyjętych ograniczeń sprzętowych, chociażby takich jak cena. Jak słusznie zauważa Autor, nie ma to zauważalnego wpływu na wygląd finalnych form i nie powinno wpływać na proces formotwórczy (s. 250-251). Potwierdza to analiza zastosowania narzędzi programu tOpos testowanych przy różnych założeniach początkowych, tak przestrzennych jak i obciążeniowych. Do przeprowadzenia testów przyjęto jednakowe ustawienia silnika optymalizującego. Autor przeprowadził 9 testów (3 serie po 3 testy), które przedstawił w podrozdziale 6.5. Otrzymane wyniki potwierdzają tezę dysertacji. Są to trójwymiarowe struktury materiałowe, które mogą być rozumiane jako formy architektoniczne. Rozdział „Posumowanie i wnioski” (s. 293-295) kończy Części IV i zawiera podrozdziały takie jak „Posumowanie”, „Ocena metod numerycznych w procesie tworzenia formy architektonicznej” oraz „Wnioski i wytyczne do przyszłych badań”. Odczuwa się jednak pewien niedosyt, gdyż pan Białkowski nie odnosi się w żaden sposób do możliwości wykorzystywania technologii BIM (Building Information Modeling) w dalszym opracowaniu formy uzyskanej przy pomocy tOpos zważywszy na europejskie wymogi odnośnie dokumentacji projektu wykonawczego.

### **Struktura rozprawy doktorskiej**

Podział na części i układ rozdziałów oraz ich zawartości w recenzowanej rozprawie doktorskiej są poprawne w swoim zamyśle. Jednakże, „Część I” wymaga pewnej rewizji wedle wskazań zawartych w niemniejszej recenzji. Części II, III, IV są spójne i jasno prowadzonym dyskursem naukowym powiązane z opisem eksperymentu badawczego i stanowią zwartą całość. Natomiast, „Posumowanie i wnioski” powinny zostać wyłączone z „Części IV”, jeżeli zawarte są tam treści odnoszące się do wyników badań i realizacji przyjętego zamierzenia naukowo-badawczego.

### **Strona merytoryczna rozprawy doktorskiej**

Problemem naukowym podjętym przez pana mgr inż. arch. Sebastiana Białkowskiego jest optymalne rozłożenie materiału budowlanego w strukturach budowlanych. Problem ten zostaje zawężony do zagadnień związanych z projektowaniem architektonicznym, do jego fazy wstępnej, kiedy poszukuje się formy projektowanego obiektu. Zamierzeniem naukowo-badawczym recenzowanej rozprawy jest opracowanie narzędzia cyfrowego dla architektów, które ma wspomagać wynajdywanie formy architektonicznej, efektywnej pod względem rozłożenia materiału budowlanego. Niestety, nie zostało to przez Autora określone i odpowiednio rozwinięte w Części I dysertacji, chociaż pozostałe części rozprawy są temu poświęcone.

W badaniach interdyscyplinarnych, prowadzenia których podjął się pan Białkowski, trudnością zazwyczaj jest określenie pola i zakresu badań. Jednakże, jest to konieczne aby wskazać elementy wiedzy należące do poszczególnych dyscyplin i zakres w jakim zostają wykorzystywane. Wymaga

tego warsztat naukowy. Ponadto, tytuł rozprawy sugeruje, że przedmiotem badań jest topologia kontinuum materiałowego, opisana szczegółowo w Części II dysertacji. Jednakże, Autor nie potwierdza tego w dysertacji, tak samo jak nie opisuje przyjętej metody badań, którą by można określić jako analityczno-eksperymentalną. Metoda ta nie jest często stosowana w rozprawach doktorskich z dyscypliny architektura i urbanistyka.

Większego uporządkowania wymaga zamieszczony w dysertacji opis „stanu badań”. W pracach naukowych oczekuje się, że taki opis dostarcza informacji kto, gdzie i kiedy prowadził badania dotyczące podjętego problemu naukowego, a mieszczące się, w przyjętym przez autora rozprawy naukowej, polu i zakresie badań. Jakie zostały osiągnięte wyniki i gdzie zostały opublikowane. W tym przypadku potrzebny jest podział na badania analityczne i badania eksperymentalne. Dzięki informacjom zawartym w „stanie badań” można łatwo określić jaki jest wkład autora danej dysertacji w rozwój danej dyscypliny naukowej. Tym bardziej jest to tu konieczne, aby wykazać, że opracowane przez pana mgr inż. arch. Sebastiana Białkowskiego narzędzia cyfrowe są nowe, że nikt wcześniej w Polsce nie podjął takiego zamierzenia naukowo-badawczego, a otrzymane wyniki badań analityczno-eksperymentalnych czynią wkład w rozwój kilku dyscyplin naukowych.

Występujące w tytule dysertacji słowo ‘forma’ implikuje potrzebę określenia przez Autora w jakim rozumieniu używany jest ten termin, co oznacza pojęcie ‘forma’, zwłaszcza w projektowaniu cyfrowym, gdy forma wyłania się z cyfrowego procesu formotwórczego. Tym bardziej jest to istotne gdyż pan mgr inż. arch. Sebastian Białkowski opracował program tOpos, który ma wspomagać wyajdywanie formy w architektonicznym procesie projektowym i jest głównym elementem recenzowanej rozprawy doktorskiej. Można przypomnieć, że w dyskursie o pięknie (estetyka) przyjmuje się aksjomat, że każda forma ma kształt, a kształt ma formę - kształt i forma nie mogą istnieć oddzielnie, chociaż mogą być oddzielnie rozpatrywane. Formę można określić jako to, co jest w przestrzeni dane, jako uporządkowanie stosunków zachodzących między składnikami pewnej całości będącej zbiorem elementów stałych. Może być to przestrzeń fizyczna lub syntetyczna (cyfrowa). Kształt niewątpliwie implikuje odniesienia do pozamateriałowych właściwości geometrii, forma zaś, będąc zależna od kształtu, odsyła do aspektów materii, czy substancji, jej właściwości fizycznych, sposobów w jaki materiał budowlany jest spożytkowany dla dobra formy, jej właściwości estetycznych. Potrzeba rozpatrywania formy jako agregatu kształtu i substancji powinna wynikać z przyjętego w dysertacji zmierzania naukowo-badawczego. Istotne bowiem jest tu określenie zależności pomiędzy geometrią formy i rozkładem materiału budowlanego, jego właściwościami fizycznymi oraz działaniem sił, w tym siły ciężenia.

Skoro w tytule rozprawy występuje słowo „topologiczna”, to może należałoby określić w paragrafie pt. „Wprowadzenie do problematyki” czym zajmuje się topologia. *Nota bene* dopiero w drugiej połowie XX wieku teoria mnogości dostarczyła matematyce języka formalnego dla stworzenia precyzyjnych podstaw topologii, czyniąc z topologii istotę syntetycznych przestrzeni w grafice komputerowej. Czyli bez topologii nie byłoby dziś grafiki komputerowej. Niewątpliwie przyczynił się do tego rozwój technologii cyfrowych, zwłaszcza mocy obliczeniowej komputera, a co za tym idzie, istotnych działań nauki o zbiorach. Parametry, które występują w topologii opisują, w jaki sposób dwa lub więcej podmiotów są ze sobą powiązane. Jest to ważne zwłaszcza gdy ma się do czynienia z podziałem powierzchni w sposób spójny, niezależnie od dokładnej geometrii powierzchni macierzystej lub zadanego wzorca. Pozwala to oddzielać topologię od geometrii przy jednoczesnym zachowaniu spójności intencji projektanta. Parametry topologiczne pozwalają także rozpatrywać kwestie

dotyczące formy, składu jej elementów, a także sposobu wytwarzania. Otwierają w ten sposób możliwość dalszej analizy, gdyż precyzyjniej określają zamierzenia projektowe, uściślają w jaki sposób poszczególne części są ze sobą powiązane w stosunku do całości formy. Można by także wspomnieć, że topologia po raz pierwszy znalazła się w architekturze za sprawą Buckminstera Fullera i jego badań dotyczących geometrii utworów natury doprowadzając go do odkrycia, że tetrahedron jest najmniejszym elementem budującym formy występujące w przyrodzie.

Natomiast pierwsze zastosowania optymalizacji topologicznej typu Evolutionary Structural Optimization (ESO) w projektowaniu architektonicznym mogły być przeprowadzone dzięki profesorowi inżynierii strukturalnej Matsuro Sasaki. To, co Sasaki proponuje w swoich projektach jest odejściem od tradycyjnych metod empirycznych na rzecz nowych rodzajów analizy kształtu. Metody te wykorzystują zasady samoorganizacji materiałowej, jakie występują w przyrodzie. Sasaki adoptuje je do cyfrowego generowania racjonalnie ukształtowanych konstrukcji budowlanych. Jednym z pierwszych zrealizowanych projektów Sasakiego jest Island City Central Park Grin-Grin (2002-2005) w prowincji Fukuoka (Japonia), gdzie znajduje się kilka jego struktur. Współpracując z wybitnymi architektami zrealizował on w 2006 Krematorium Kakamigahara w Gufu (z Toyo Ito), a następnie w latach 2005-2011 Qatar Education City Convention Center w Doha (z Arata Isozaki). Projekty te opisane zostały przez ich twórcę w książce pt. „Morphogenesis of Flux Structure” wydanej w 2007 przez Architecture Association w Londynie. O tej nowej metodzie wynajdywania formy pisze także Krystyna Januszkiewicz w publikacjach takich jak: “Nonlinear Shaping Architecture Designed with Using Evolutionary Structural Optimization Tools” oraz “Parametric green architecture in urban space. A new approach to design environmental-friendly buildings” dostępne na WoS (open acces). Opisuje tam także Rolex Learning Centre w Lausanne oddane do użytku w 2008 projektu Kazuyo Sejima, Ryue Nishizawa SANAA. Niektóre z wymienionych tu obiektów zostały uwzględnione w dysertacji. Jednakże, odczuwa się pewien niedosyt informacji. Ponadto można by wskazać narzędzia cyfrowe jakie okazały się pomocne i jakie ich udoskonalenia zostały poczynione. Nie ma potrzeby opisywać historię rozwoju cyfrowych narzędzi dla architektów oraz popularyzacji CAD-a (s.3-7).

Powyższe sugestie mogłyby się znaleźć w Części I dysertacji i zastąpić niektóre partie tekstu nie związane bezpośrednio z podjętą problematyką badawczą.

W podrozdziale zatytułowanym „Architektura nowych technologii”(s.8-18) Autor stara się uchwycić niemal wszystkie wątki dotyczące skutków wprowadzenia technologii cyfrowych do architektury, co świadczy o erudycji wymaganej od doktoranta. Jednakże, pomija istotny dla projektowania cyfrowego wątek dotyczący tektoniki cyfrowej. Termin ten, spopularyzowany w 2004, odnoszony jest do architektury projektowanej cyfrowo, której forma jest wynikiem uwzględniania właściwości materiału, konstrukcji i technologii fabrykacji (CNC) w zapisie geometrycznym formy architektonicznej. Jest to stosunkowo nowe podejście do projektowania architektonicznego, zwłaszcza do jego fazy wstępnej. Najlepiej objaśniają to pozycje takie jak: P. Beesley and T. Seebohm „Digital Tectonic Design”, eCAADe Conference, Hannover 2000 oraz książka: N. Leach, D.Turnbull and C. Williams, “Digital Tectonics”, Wiley-Academy, London. 2004, a także: R. Oxman, “Digital Tectonics as a Morphogenetic Process”, Proceedings of the International Association for Shell and Spatial Structures (IASS) Symposium, Valencia 2009. O tektonice cyfrowej pisze także Krystyna Januszkiewicz patrz: “Digital tectonic design as a fresh approach to architectural design methodology”, Procedia Engineering, 1611, Elsevier 2016. Wnoszącą pozycją jest książka również Roberta Oxmana “The New Structuralism: Design, Engineering and Architectural Technologies” wydana przez Wiley & Sons w 2010.



W podpunkcie „Projektowanie przez proces” (s.12-14) zapominając, że każde projektowanie jest procesem, Autor zwraca uwagę na projektowanie za pomocą algorytmów. W tym miejscu można by przypomnieć, że w projektowaniu cyfrowym algorytm jest modelem obliczeń potrzebnym, aby mogło być wykonane zadanie projektowe. Projekt wymodelowany przez algorytm jest jednocześnie reprezentacją algorytmu i geometrii. Algorytm jest zatem procesem, który musi być określony krok po kroku. specyficznym przepisem, który zarządza i określa jak przetworzone powinny być przez komputer dane wejściowe. Geometria zaś jest składnikiem, względem której zastosowany został przepis (algorytm) i ona właśnie obrazuje dane wyjściowe. Algorytmy zawierają zestawy poleceń koniecznych do przeprowadzania procedur i zazwyczaj zawierają czynności dotyczące ograniczeń. Algorytmy mogą być długie, lub krótkie i zawsze przebiegają w czasie rzeczywistym. Chociaż idea algorytmu, lub programu, jako metody formalnej, poprzedzała istnienie komputerów elektronicznych, to użycie komputera zawsze oznaczało, i oznacza, aktywowanie algorytmicznej procedury, która przetwarza to co jest dane na wejściu w stosunku do tego co jest otrzymywane na wyjściu. Algorytm można zatem rozumieć jako system dokonujący operacji przetwarzania informacji konstruowany w celu realizacji zadania; w programowaniu – spełnia tzw. Postulaty Knutha tj. skończoność, definiowalność, obróbka danych rzeczywistych (import, eksport) oraz efektywność. Takie doprecyzowanie uczyniłoby dyskurs bardziej klarowny.

W punkcie „Architektura sił”(s.18-20) więcej uwagi można by poświęcić przedcyfrowym metodom wyznaczania formy o nazwie „form-finding”. Wnoszące do przedstawionych w dysertacji badań byłoby przedstawienie z jakimi trudnościami borykali się projektanci izotropowych łupin np. z betonu o złożonej geometrii. Opisanie na czym wówczas polegała eksperymentalna metoda badań zachowań struktur zgodnie z prawem ciężenia.

Odnosząc się do Gaudiego trzeba wiedzieć, że głębokie zrozumienie matematyki leży u podstaw jego architektury, a zwłaszcza tej powstałej na początku XX wieku. Podczas studiów uniwersyteckich korzystał z programu nauczania, który obejmował, między innymi, "zaawansowaną matematykę, fizykę ogólną, nauki przyrodnicze i geometrię opisową". Architektura ta, niemal wyłącznie składa się z matematycznych powierzchni drugiego stopnia - helikoidów, paraboli i hiperboloidów - parametrycznie powiązanych z zasadami liniowymi, funkcjami booleowskimi i krzywymi łańcuchowymi. Można przyjąć, że Gaudí wiedział o wcześniejszych pracach definiujących geometrię za pomocą równań parametrycznych, bez wątpienia używał on modeli opartych na równaniach parametrycznych. Najbardziej spektakularne jest używanie modelu łańcucha wiszącego. Gaudí wiedział, że wiszący łańcuch nie tworzy paraboli, lecz zbliżoną do niej krzywą. Inspirujące mogły być badania Roberta Hooke'a (1635-1703) i jego znany anagram, który brzmi: "kiedy elastyczna lina wisi, to odwrócona stanie się sztywnym łukiem". *Nota bene* Hooke użył tej metody, aby pokazać Christopherowi Wrenowi, jak powinna pracować kopuła katedry św. Pawła w Londynie. Chodzi tu o tego samego Roberta Hooke'a, który był odkrywcą podstawowego prawa elastyczności, tzw. prawo Hooke, które pan Białkowski przywołuje na s. 43, określając zależność odkształcenia od naprężenia.

Jednakże, Antoni Gaudi sporządzał wiszące modele aby wyznaczać linie ciśnień i badać jak można manipulować ich kształtem za pomocą obciążników wagi. Nie szukał on geometrii powierzchni jedynie kształtu żeber i słupów. Dopiero w połowie XX wieku Heinz Isler (1926-2009) opracował własną metodę analityczno-eksperymentalną zwaną dziś „form-finding” dla kształtu cienkościennych powłok betonowych, uwolnionych od paraboloid hiperbolicznych. Takie znajdowanie formy oznacza, że istnieje pewna poprawna forma niezależnie od projektanta, a zadaniem projektowym jest jej

odkrycie. Heinz Isler odkrył, że zdolność odkształcenia nasączonej tkaniny i uzyskana przez to wydajna geometria krzywizny, rozwiązuje problemy techniczne formowania struktur powłokowych o znacznych rozpiętościach. Metoda ta nazwana wówczas „form-finding” odnosi się dziś do metod projektowania, w których forma wyłania się z cyfrowych procesów naśladowujących formotwórcze procesy Natury. Isler opracował też własną metodę skalowania takich modeli, a następnie wykonywania testów obciążeniowych. Służyły do tego wykonane z drewna gabloty. Umieszczano w nich wyskalowany model, obciążano go punktowo na całej powierzchni i za pomocą tensorów monitorowane były skutki tego obciążenia. Zmiany obciążeń dokonywano ręcznie przez uruchomienie odpowiednich dźwigni skoordynowanych z obciążnikami podwieszonymi do tensorów. Zastępowało to popularną dziś Metodę Elementów Skończonych, która rozwinęła się dopiero gdy wzrosła moc obliczeniowa komputerów. Posługując się metodą analogowego projektowania parametrycznego Heinz Isler zrealizował wiele projektów obiektów o swobodnie uformowanej strukturze powłokowej. Znajdują się one na terenie Szwajcarii, Niemiec i Francji. Podkreślić należy, że prawie wszystkie projektowane przez niego powłoki były odlewane z betonu na jednostronnym, dolnym szalunku drewnianym.

Podpunkt „Architektura performatywna” (s.21) wymaga rewizji i podania przykładów zrealizowanych i projektowanych obiektów. Termin ten w Polsce jest niemal nieznany, chociaż powszechnie używany przez projektantów, inżynierów i badaczy kultury. Odnoszony jest do budowli projektowanych i wytwarzanych cyfrowo, których efektywny wysiłek i zachowania koncentrują się na realizacji szeroko pojętego imperatywu środowiskowego. Budowle te opisują procesy, przez które łączą się ekologia, kultura, technologia i architektura, aby tworzyć pole złożonych relacji w celu wytwarzania nowych efektów o silnym działaniu. Architektura performatywna znajduje uzasadnienia w czynnikach obiektywnych. Parametry strukturalne, materiałowe, środowiskowe, ekonomiczne, które przedtem nie odgrywały roli pierwszoplanowych, stają się istotnym nośnikiem treści znaczeniowych. Informują o zmianie sposobu myślenia w relacjach Człowiek– Natura– Kultura.

W języku angielskim słowo „perform” oznacza „przeprowadzać jakieś działanie”, czy „wykonywać jakieś zadanie”. Odnosząc je do architektury można by sięgnąć do wyczerpanej już dziś debaty na temat korelacji formy i funkcji, sięgającej korzeniami modernistycznej awangardy początku XX w. Jednakże, w dobie narzędzi cyfrowych, następuje całkowite zerwanie z takim myśleniem. Uwaga koncentruje się na rozpatrywaniu skutków działania wielu różnych procesów informatycznych kształtujących formę pod względem jej zachowań i współpracy ze środowiskiem. Takie jakościowe oceny koncepcji projektowych mogą być dziś przeprowadzane dzięki udoskonaleniom w technikach przetwarzania graficznych danych wyjściowych i technikach wizualizacji. Przez nakładanie na siebie (superpozycje) różnych analitycznych ocen, propozycje projektowe są porównywane, aby wybierać stosunkowo proste rozwiązania, dające optymalne wyniki. Kształt i forma powstają zatem w odpowiedzi na warunki środowiskowe oraz geometrię i cechy materiału, co oznacza czy z danego materiału można wykonać elementy o pożądanej geometrii. Aby lepiej zrozumieć te zagadnienia można by sięgnąć po kanoniczne dziś książki wydane pod redakcją Brako Kolarevica: „Performative Architecture–beyond instrumentality” (2005), „Manufacturing Material Effects” (2013), „Architecture in the digital age – design and manufacturing” (2004), a także artykuły takie jak: K. Bollinger, M. Grohman, O. Tessmann, “Form, Force, Performance. Multi-parametric Structural Design”, AD Vol.78, 2008, a także K. Januszkiewicz, “Architektura performatywna w Kolonii”, AV 2/2012.

Należałoby się zastanowić, które wątki przedstawione w paragrafie „Wprowadzenie do problematyki” będą istotne do wnioskowań zamykających dysertację. Wtedy można by je odpowiednio rozwinąć. „Podsumowanie i wnioski końcowe” na stronach 293-296 dotyczą li tylko badań analityczno-ekspe-

rymentalnych oraz wyników eksperymentu naukowego tj. programu tOpos oraz form wynajdywanych za jego pomocą, które mogą być pomocne w projektowaniu architektonicznym, a nie odnoszą się do treści zamieszczonych we „Wstępie..”. Można by rozwinąć te wnioski, zwłaszcza, że rozwój cyfrowych narzędzi projektowania zmierza dziś w kierunku integracji różnych opcji, tak aby powstał jeden wszechstronny program w systemie CAD, pozwalający projektantowi badać zachowania budowli w różnych aspektach. Część z tych problemów rozwiązuje dziś technologia BIM (Building Information Modeling). *Nota bene* w 2015 zaprezentowany został innowacyjny pakiet Tekla Structures powstały z połączenia narzędzi parametrycznych aplikacji Grasshopper i BIM. Dzięki temu połączeniu możliwe jest parametryczne modelowanie w Tekla Structures (TS jest aplikacją 5D BIM) za pomocą Rhinoceros/Grasshopper. Stworzenie łącza oprogramowań Grasshopper – Tekla Structures było możliwe dzięki wyspecjalizowanemu interfejsowi programowania aplikacji Tekla Open API, który daje możliwość optymalizacji tego oprogramowania i rozszerzenia go o inne oprogramowanie współpracujące. Po instalacji składników Rhinoceros/Grasshopper w Tekla Structures uaktywnia się zakładka z komponentami Tekla w Grasshopper.

Podkreślić należy, że Części II, III, IV, opisujące eksperyment realizujący przyjęte zamierzenie naukowo-badawcze nie nasuwają uwag merytorycznych. Zastosowany aparat matematyczny został znakomicie skorelowany z celem, jakim jest optymalizacja kontinuum materiałowego. Wywód naukowy i badawczy został tu przeprowadzony wzorcowo i może stanowić znakomity przykład dla innych tego rodzaju opracowań. Pan Białkowski posługuje się językiem jasnym i zrozumiałym nie tylko dla inżynierów i informatyków, zwłaszcza, że zrozumienie części III i IV wymaga wiedzy programistycznej.

Powyższe uwagi merytoryczne są po to, aby je uwzględnić w przygotowaniu rozprawy doktorskiej do wydania książkowego. Wniosek taki uzależnia recenzent od przebiegu obrony doktoratu.

### **Strona formalna, językowa i edytorska**

O poziomie warsztatu naukowego świadczy, niewątpliwie, umiejętność prowadzenia dyskursu naukowego, a zwłaszcza umiejętność oddzielania myśli swoich od cudzych. Temu służą przypisy, które informują, z jakimi autorami podejmowany jest dyskurs, które fragmenty ich tekstów są przywoływane bezpośrednio, a które tylko pośrednio, do kogo należą wyniki badań na które się powołujemy. Przypisy sporządzać można na kilka sposobów, lecz żaden z nich nie został poprawnie użyty w dysertacji pana Białkowskiego. *De facto* czytelnik nie wie, czy Autorowi chodzi o to, żeby porównać jego myśl z myślą innego autora, która nie musi być zgodna, czy też myśl Autora jest tożsama z tamtą myślą. O pewnej kulturze przypisów świadczy podawanie pełnego imienia autora, a nie jego inicjału, lub też braku nawet inicjału imienia jak na stronach 4,7,9,10,16,18,21-28, jak i wielu innych oraz poprawnego używania skrótów takich jak op. cit. lub ibidem czy passim. Wymaga tego metodologia prowadzenia prac naukowych w Polsce. Zastąpienie inicjału imienia autora publikacji jego pełnym brzmieniem poprawiło by poziom kultury naukowej dysertacji.

Rozprawę doktorską zamyka wykaz pozycji bibliograficznych zatytułowany „Bibliografia”, a lepiej byłoby napisać „Wykaz bezpośrednio wykorzystanej literatury”, co nie sugerowałoby, że zamieszczono wszystkie pośrednio i bezpośrednio związane z tematem pozycje, jakie udało się Autorowi zebrać.

Rozprawa doktorska pana mgr inż. arch. Sebastiana Białkowskiego napisana została poprawnym językiem naukowym o dobrej stylistyce, co dobrze świadczy o kulturze języka polskiego Autora.

Wkradły się jednak pewne uchybienia gramatyczne i edytorskie takie jak np.: strona 7 – obiekty *wielkoskalowe* – może chodzi o obiekty wielkowymiarowe; strona 11 – „Wzbogacenie warsztatu architekta o kolejne narzędzia, w tym wypadku sięgające po wiedzę z nauk informatycznych, wymusza na projektantach poszerzania wiedzy, aby w pełni wykorzystać ich potencjał”; strona 21 – *.performance* i dalej *wysulek* , a poniżej *lazują się* , a poniżej *bazują są* na algorytmach; strona 60 – Algorytmy ewolucyjne *Niewatpliwą* wadą algorytmów ewolucyjnych jest ich *znaczna obliczeniowa*. Ponadto, pojawiają się błędy w nazwiskach i nazwach, np. strona 14 – *Doo-Sabim* – powinno być Doo-Sabin; strona 16 – *ABuZabi* – powinno być Abu Dabi, lub Abu Dhabi, – jeśli chodzi o nazwę półwyspu to Abu Zabi i dalej *Hasirashid* – powinno być Hani Rashid, jest to imię i nazwisko architekta, tak samo na stronie 17 – *Shiheru Bana* – powinno być Shigeru Bana. Najwięcej uchybień znajduje się w tekście Części I , pozostałe części rozprawy zostały starannie przygotowane.

Mimo uwag i sugestii, odnoszących się zwłaszcza do Części I dysertacji, recenzent wysoko ocenia rozprawę doktorską pana Sebastiana Białkowskiego. Doktorant wykazał się wystarczającą znajomością warsztatu naukowego, a nawet bardzo dobrą, szczególnie w Częściach II, III i IV. Wykazał się także umiejętnością prowadzenia interdyscyplinarnych badań analityczno-eksperymentalnych, rzadko podejmowanych w dyscyplinie architektura i urbanistyka. Ociążony został najważniejszy cel badań – określona została przydatność algorytmów optymalizacji topologicznej do celów architektonicznych, a postawiona w rozprawie teza została udowodniona. Dysertację należy uznać za niezwykle wartościową, ukazującą perspektywę dalszego rozwoju, zarówno metod projektowania, jak i samej architektury. Rozprawa pana Białkowskiego stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego poprzez opracowanie projektowe wykorzystujące technologie cyfrowe. Przyjęta w rozprawie doktorskiej metoda analityczno-eksperymentalna jest zgodna z Ustawą (z Art. 13 Ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym). Metoda ta pozwoliła na połączenie rozważań czysto teoretycznych z implementacją praktyczną wyników badań. Badania i eksperymenty dotyczące przydatności algorytmów optymalizacji topologicznej nie były jeszcze prowadzone w Polsce w żadnym ośrodku naukowym. Badania pana Białkowskiego czynią istotny wkład w rozwój wiedzy o architekturze, sprzęgając wiedzę inżynierską z wiedzą z zakresu informatyki, szczególnie gdy wysiłki naukowców na świecie koncentrują się na efektywnym gospodarowaniu surowcami, energią i wodą. Opracowane przez doktoranta narzędzie wspomagające projektowanie architektoniczne jest obecnie niezwykle potrzebne także na polu dydaktyki akademickiej. Może stanowić doskonałą pomoc dydaktyczną w procesie nauczania integrującym studentów architektury i inżynierii strukturalnej przygotowującym do wykonywania zawodu w zespołach wielobranżowych.

**Reasumując** stwierdzam, że praca doktorska pt. „Optymalizacja topologii kontinuum materialnego w poszukiwaniu form architektonicznych. Adaptacja wybranych metod inżynierskich do celów architektonicznych”, 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 pana mgr inż. arch. Sebastiana Białkowskiego do jej publicznej obrony oraz przeprowadzenia dalszych etapów postępowania w sprawie nadania stopnia doktora. Wniosek o wyróżnienie recenzowanej pracy, z uwagi na jej wybitne walory naukowe i praktyczne, uzależniam od merytorycznego ustosunkowania się doktoranta do uwag zawartych w niemniejszej recenzji.

Szczecin 06. 09. 2018