



**POLITECHNIKA
GDAŃSKA**
WYDZIAŁ ARCHITEKTURY

Imię i nazwisko autora rozprawy: Anna Czech
Dyscyplina naukowa: Architektura

ROZPRAWA DOKTORSKA

Tytuł rozprawy w języku polskim:
DYNAMICZNE RELACJE POMIĘDZY MATEMATYKĄ STOSOWANĄ, A PROJEKTOWANIEM
ARCHITEKTONICZNYM

Tytuł rozprawy w języku angielskim:
DYNAMIC RELATIONSHIPS BETWEEN APPLIED MATHEMATICS AND ARCHITECTURAL DESIGN

Promotor
<i>podpis</i>
dr hab. inż. arch. Krystyna Pokrzywnicka
Promotor pomocniczy
<i>podpis</i>
dr inż. arch. Robert Juchnevič

Dla Tatj i Dżaksona

Gdańsk, kwiecień 2022r.



SPIS TREŚCI

1. Wprowadzenie	str. 1.01
1.1. Określenie tematyki rozprawy.....	str. 1.01
1.2. Uzasadnienie wyboru problematyki badawczej.....	str. 1.01
1.3. Zakres rozprawy wraz z określeniem metod badawczych.....	str. 1.03
1.4. Podstawowe pojęcia	str. 1.05
1.5. Cele rozprawy.....	str. 1.10
1.6. Tezy badawcze.....	str. 1.12
1.7. Stan badań.....	str. 1.13
2. Projektowanie algorytmiczne modelowanie parametryczne projektowanie generatywne współczesne stadium ewolucji zastosowań matematyki w architekturze	str. 2.01
2.1. Poszukiwania obecności matematyki w procesie projektowym.....	str. 2.01
2.2. Myślenie algorytmiczne.....	str. 2.05
2.3. Modelowanie parametryczne.....	str. 2.06
2.4. Generowanie formy.....	str. 2.08
3. Cyfrowa notacja natury	str. 3.01
3.1. Fraktale rekurencja iteracyjność zapowiedź optymalizacji.....	str. 3.02
3.2. Algorytmiczne odwzorowanie struktur roślinnych.....	str. 3.04
3.3. Morpho-ecologies Bionika Biomimikra Biomimetyka.....	str. 3.08
4. Research by design – część eksperymentalna Typologia algorytmów używanych przy projektowaniu architektonicznym	str. 4.01
4.1. Elipsoidalne skręcone wieże.....	str. 4.01
4.1.1. Wieża na planie elipsy.....	str. 4.01
4.1.2. Wieża na planie pochodnej z rodziny elipsoid o nierównomiernym kącie obrotu.....	str. 4.03
4.2. Pierścienie składające się z dowolnych figur geometrycznych skręconych względem siebie.....	str. 4.06
4.3. Diagramy Woronoja Tesselacja Dirichleta.....	str. 4.07
4.4. Gradient kolorystyczny zbioru podwójnych łuków.....	str. 4.09



0.4 | SPIS TREŚCI

4.5. Wariacje na temat zespołu brył inspirowanego Berlińskim Muzeum Holokaustu.....	str. 4.12
4.5.1. Zbiór prostopadłościanów o zróżnicowanej wysokości, uzależnionej od odległości od zadanej krzywej.....	str. 4.12
4.5.2. Generowanie wyniesienia zbioru form na podstawie bitmapy.....	str. 4.14
4.6. Obłe elewacje modułowe.....	str. 4.15
4.7. Krzywoliniowe systemy elewacyjne przy użyciu mapowania wykresem i odwróconych macierzy danych.....	str. 4.17
4.8. Zróżnicowane paraboliczne serie powierzchni przestrzennych na bazie prostej i łuku.....	str. 4.20
5. Zastosowanie metod matematycznych w procesie projektowania na przykładzie koncepcji konkursowej Centum Plaza.....	str. 5.01
5.1. Wytyczne projektowe Idea projektowa Przedmiot konkursu, cel konkursu, kryteria oceny prac konkursowych.....	str. 5.01
5.2. Proces projektowy, a słońce komfort użytkowania przestrzeni.....	str. 5.05
5.2.1. Nasłonecznienie: nowo projektowane pokoje mieszkalne, sąsiadująca zabudowa mieszkaniowa w obszarze oddziaływania.....	str. 5.05
5.2.2. Radiacja: projektowane bryły, przestrzenie półpubliczne zewnętrzne.....	str. 5.09
5.2.3. Część biurowa daylight factor(DF), spatial daylight autonomy(sDA).....	str. 5.10
5.3. Przewietrzanie outdoor airflow.....	str. 5.13
5.4. Analizy widokowe.....	str. 5.19
5.5. Zabiegi elewacyjne.....	str. 5.21
5.6. Wnioski.....	str. 5.24
6. Zastosowanie metod matematycznych w procesie projektowania na przykładzie studialno – ideowej koncepcji konkursowej na projekt zabudowy i zagospodarowania głównej osi kompozycyjnej Gdyni – Pirs Przyszłości Skwer Kościuszki i Molo Południowe.....	str. 6.01
6.1. Wytyczne projektowe Przedmiot konkursu, cel konkursu, kryteria oceny prac konkursowych.....	str. 6.01
6.2. Problemy projektowe.....	str. 6.03



6.3	Idea projektowa Relacja z dziedzictwem historycznym, analizy widokowe, w stronę wody, środowisko, mieszkańcy, awangarda technologiczna, dodatkowe dane.....	str. 6.05
6.4	Forum Morskie wraz z Laguną minimalizacja prędkości wiatru w przestrzeni przy maksymalizacji widoków.....	str. 6.09
6.5	Wielofunkcyjne pawilony regulacja nastonecznienia.....	str. 6.17
6.6	Wnioski	str. 6.20
7.	Zastosowanie metod matematycznych w procesie projektowania i cyfrowej produkcji na przykładzie projektu Armadillo Vault prezentowanego podczas Biennale w Wenecji w 2016 roku.....	str. 7.01
7.1.	Wytyczne projektowe Przedmiot opracowania, cel projektu.....	str. 7.02
7.2.	Problemy projektowe.....	str. 7.03
7.3	Idea projektowa Odkrywanie form poprzez ograniczenia, matematyczne pancerniki.....	str. 7.03
7.4	Forma, jako wynik koordynacji matematycznego zapisu wytycznych konstrukcyjnych, architektonicznych oraz produkcyjnych.....	str. 7.04
7.4.1.	Poszukiwanie formy projekt powierzchni oporowej.....	str. 7.05
7.4.2.	Teselacja formy modularyzacja.....	str. 7.09
7.4.3.	Geometria bloczków kamiennych planaryzacja.....	str. 7.12
7.4.4.	Produkcja CNC, „wafłowa” podkonstrukcja i montaż.....	str. 7.16
7.5	Wnioski	str. 7.18
8.	Zastosowanie metod matematycznych w ujęciu architektonicznym w projekcie badawczym CoDeFa parametryczne drewniane systemy elewacyjne.....	str. 8.01
8.1.	Cel badawczy.....	str. 8.02
8.2.	Stan badań Wykorzystanie zapisu matematycznego w projektowaniu i produkcji prefabrykowanych fasad drewnianych.....	str. 8.02
8.3.	Określenie problemów badawczych.....	str. 8.04
8.4.	Idea projektowa.....	str. 8.05
8.5.	Metody badawcze.....	str. 8.06
8.5.1.	Współpraca interdyscyplinarna warsztaty.....	str. 8.06
8.5.2.	Opracowane narzędzia cyfrowe.....	str. 8.07
8.6.	Demonstracja efektu projektu CoDeFa.....	str. 8.12

0.6 | SPIS TREŚCI

8.6.1. Współczesna cyfrowa interpretacja fasady z gontów.....	str. 8.14
8.6.2. Współczesna cyfrowa interpretacja fasady opartej na belkach.....	str. 8.15
8.6.3. Współczesna cyfrowa interpretacja fasady typu deska na płycie.....	str. 8.17
8.6.4. Ukazanie możliwości projektowych i wytwórczych 15 makiet.....	str. 8.18
8.6 Dyskusja Wnioski Perspektywy.....	str. 8.18
9. Konkluzje i wnioski	str. 9.01
10. Spis tabel i grafik	str. 10.01
11. Bibliografia	str. 11.01
12. Streszczenie summary	str. 12.01
13. Dorobek naukowy i zawodowy Doświadczenie zawodowe Wykształcenie Publikacje naukowe Konferencje naukowe Publikacje pozanaukowe Udział w opracowaniu projektów architektonicznych	str. 13.01

1. WPROWADZENIE

1.1. Określenie tematyki rozprawy

Wybrana problematyka badawcza dotyczy analizy matematycznego zapisu tworzenia form dwu- oraz trójwymiarowych oraz współczesnych metod matematycznych stosowanych w procesie projektowania architektonicznego.

Obszar zainteresowań naukowych skoncentrowano na współczesnych relacjach pomiędzy matematyką stosowaną, a projektowaniem architektonicznym oraz na wykorzystywaniu poszczególnych gałęzi języka matematyki, w celu określenia i klasyfikacji wpływu zagadnienia na jakość projektu architektonicznego.

1.2. Uzasadnienie wyboru problematyki badawczej

Zainteresowanie naukowe wyżej opisaną interdyscyplinarną problematyką związane jest z równoległym ukończeniem studiów magisterskich na Wydziale Architektury oraz Fizyki Technicznej i Matematyki Stosowanej na specjalności Matematyka Stosowana.

Podczas studiów wyższych, przyszli architekci nauczani są podstaw wybranych gałęzi wiedzy technicznej: geometrii wykreślnej, technik komputerowych w projektowaniu, konstrukcji budowlanych, systemów konstrukcyjnych czy fizyki oraz mechaniki budowli. Szersze rozeznanie we współczesnych osiągnięciach zastosowań matematyki daje możliwość diametralnej, rewolucyjnej zmiany w podejściu do samego procesu projektowania architektonicznego.



1.2 | WPROWADZENIE

Matematyka stosowana¹ stanowi odnogę matematyki, koncentrującą się na wykorzystaniu jej osiągnięć w dziedzinach pobocznych. Działania te mają na celu rozwój aparatu matematycznego na potrzeby innych nauk, w szczególności techniki, informatyki, medycyny, biologii, czy architektury².

Formy przestrzenne (w tym architektoniczne) dające zapisać się skomplikowanym językiem matematyki, generowane parametrycznie oraz algorytmicznie przy pomocy różnorodnych metod matematycznych stają się coraz popularniejsze na świecie. Dzieje się tak dlatego, że współczesna moc obliczeniowa komputerów umożliwia tworzenie bardzo złożonych form przestrzennych niemożliwych do stworzenia i przedstawienia przy pomocy tradycyjnych form prezentacji w formie rysunku płaskiego, czy makiety, modelu wytwarzanego ręcznie.

Ponadto, szerokie spektrum możliwości jakie niesie za sobą stosowanie matematyki w projektowaniu architektonicznym ma szansę przybliżyć efekty projektowe do idei równoważenia rozwoju i poszanowania środowiska naturalnego.

Obecnie projektanci w Polsce i na świecie, w swojej codziennej pracy zawodowej nie wykorzystują w pełni możliwości, jakie niesie za sobą zastosowanie matematyki w projektowaniu. Da się jednak wyraźnie zaobserwować wdrażanie tych procesów, nie tylko w największych i najbardziej znaczących na rynku pracowniach. Stąd też

-
- 1 Stolz M., 2002, *The History Of Applied Mathematics And The History of Society*, Synthese, str. 43-57
 - 2 Goulthorpe M., 2009, *The Possibility of (an) Architecture*, Routledge



podjęte badania nad zagadnieniami zapisu matematycznego i metod matematycznych w projektowaniu architektonicznym, współczesnymi sposobami ich stosowania oraz analizy.

1.3. Zakres rozprawy wraz z opisem zastosowanych metod badawczych

Określenie i usystematyzowanie zakresu rozprawy oraz prace nad zdefiniowaniem problemu naukowego i jego rozwiązaniem odbyły się wedle poniższych kolejnych etapów:

Zakres rozprawy rozpoczyna pierwszy etap pracy badawczej - poszukiwanie obecności matematyki w procesie projektowym i analiza historycznych zastosowań matematyki w projektowaniu. Etap ten został wykonany na podstawie badań literaturowych i analiz przypadków metodą studiów indywidualnych przypadków, metodą porównawczą oraz metodą analizy krytycznej. Poszukiwano kontynuacji i odniesień powyższego we współczesnym projektowaniu.

Kolejno, pod rozwagę poddano rozwój stopnia zaawansowania inspiracji matematyką w projektowaniu. Analizie współczesnych przykładów i doświadczeń zastosowań matematyki w projektowaniu poddano zebrane dane z książek, publikacji naukowych i prasowych, rozpraw doktorskich, tematycznych konferencji naukowych, wywiadów, czy też video-tutoriali, stron internetowych i blogów. Analizie poddano podejście do kreowania form i poszukiwania matematycznego sposobu zapisu idei i wytycznych projektowych.



1.4 | WPROWADZENIE

Współczesny stopień zastosowań matematyki w projektowaniu architektonicznym scharakteryzowano podejściem algorytmicznym oraz generowaniem form parametrycznych.

Kontynuacją pracy badawczej było poszukiwanie cyfrowej notacji natury, analiza cech matematycznych fraktali, algorytmiczne odwzorowanie struktur roślinnych oraz obecność zapisu i metod matematycznych w zjawisku „Morpho-ecologies”, bionice/ biomimikrze/ biomimetyce, w celu określenia celów i priorytetów stawianych współczesnej architekturze, powiązanych z ideą równoważenia rozwoju i podejściem proekologicznym.

Następnym etapem badań było przeprowadzenie własnych doświadczeń i eksperymentów - przy użyciu oprogramowania Grasshopper, stanowiącego wtyczkę do programu Rhinoceros, służącą do modelowania algorytmicznego - badania polegały na tworzeniu i analizie własnych skryptów matematycznych generujących formy przestrzenne, mogące mieć zastosowanie w architekturze. Ten etap badań został opracowany w charakterze „research by design” na podstawie informacji zebranych z videoblogów i videotutoriali dotyczących modelowania algorytmicznego.

W kolejnym kroku nastąpiła publikacja badań i przedstawienie ich podczas międzynarodowych tematycznych konferencji.

W dalszym etapie pracy badawczej nastąpiło nawiązanie współpracy z ekspertami w dziedzinie oraz stosowanie wyżej wymienionych w realnych projektach architektoniczno-urbanistycznych, czego efektem są rozdziały dotyczące zastosowania metod matematycznych w procesie projektowania na przykładzie koncepcji konkursowych *Centum Plaza i Pirs Przyszłości*.

Kolejno, nawiązano kontakt z ekspertami w dziedzinie oraz przeanalizowano zakres stosowania metod matematycznych w zagranicznych projektach: *Armadillo Vault* i *CoDeFa*.

Podczas pracy nad dysertacją, cały czas miało miejsce śledzenie bieżących zmian w tematyce badań i aplikacja ich na potrzeby pracy badawczej.

1.4. Podstawowe pojęcia

Na potrzeby dysertacji zdefiniowano podstawowe pojęcia, których występująca poniżej, autorska definicja odnosi się przede wszystkim do kontekstu w jakim są analizowane w tej rozprawie:

a) **Matematyka Stosowana** – gałąź matematyki ukierunkowana na wykorzystanie matematycznego zapisu na potrzeby projektowania architektonicznego³.

3 Issa R., 2013, *Essential Mathematics for computational design – Third Edition*, Robert McNeel& Associates



Dziedziny matematyki stosowanej	
algebra	liniowa nieliniowa
algorytmy	
analiza	funkcyjna matematyczna numeryczna
biomatematyka	
badania operacyjne	
geometria	analizyczna wykreślna
identyfikacja układów technicznych	
informatyka matematyczna	
języki programowania	
matematyka w naukach przyrodniczych	
mechanika	nieliniowa obliczeniowa płynów tradycyjna
metody	matematyczne w technice numeryczne programowania wariacyjne
pakiety matematyczne	
podstawy automatyki i robotyki	
procesy stochastyczne	
rachunek	prawdopodobieństwa wariacyjny
równania	różniczkowe cząstkowe różniczkowe zwyczajne
statystyka	
struktury danych	
techniczne układy dyskretne	
teoria	bifurkacji funkcji analitycznych grafów obliczeń sterowania złożoności
topologia	
układy dynamiczne	

Tabela.1.4a:
Dziedziny matematyki
stosowanej

źródło: własne



b) **Algorytm** – skończony ciąg zdefiniowanych zapisem matematycznym czynności, których wykonanie zaowocuje powstaniem formy architektonicznej. Algorytm może być zaimplementowany w postaci programu komputerowego.

W myśl definicji klasycznej, algorytm⁴ to jednoznaczny przepis obliczenia w skończonym czasie pewnych danych wejściowych do pewnych danych wyjściowych.

W sposób algorytmiczny, wykorzystując równania rekurencyjne (przy formułowaniu funkcji celu w badaniach operacyjnych i teorii decyzji) oraz programowanie dynamiczne (wykorzystywane przede wszystkim w problemach NP-trudnych), podchodzi się również do poszukiwania najlepszej formy dla zadanego problemu. Dodając do zagadnienia obserwację praw natury, biomatematykę można mówić konkretnie o poddziedzinie algorytmów – **algorytmach genetycznych**.

Algorytm najlepszego dopasowania / matching pursuit – technika numeryczna, która poszukuje dopasowania funkcji z określonego zbioru do danych wielowymiarowych. Sygnał z przestrzeni Hilberta określa jako sumę ważoną funkcji atomów. Rozwinięcie szeregu Fouriera również stanowi analogiczną reprezentację zagadnienia.

c) **Projektowanie komputacyjne**⁵, **digitalizacja procesu projektowego**⁶, **projektowanie algorytmiczne** –

4 Banachowski L., Diks K., Rytter W., 2006, *Algorytmy i struktury danych*, WNT wyd. V

5 Ang. computational design

6 Januskiewicz K., 2010, *O projektowaniu architektury w dobie narzędzi cyfrowych. Stan aktualny i perspektywy rozwoju*,



zagadnienia opierające się na włączeniu do procesu powstawania formy cyfrowych narzędzi w postaci **modelowania parametrycznego i generatywnego**. W rezultacie architekt nie tyle tworzy gotowy obiekt, co tworzy sam proces generowania form. Projektowanie komputacyjne w omawianym kontekście opiera się na odnalezieniu i określeniu matematycznych zależności pomiędzy dającymi się zapisać językiem matematyki aspektami wpływającymi na projekt. Rezultatem powyższego myślenia o procesie projektowym jest generowanie obiektu w oparciu o zadane, sprecyzowane i połączone ze sobą wskaźnikowe parametry.

d) **Morpho-ecologies, Bionika, Biomimikra, Biomimetyka** – zapożyczenia przy kreowaniu form architektonicznych czerpane z organizmów żywych, w szczególności roślin.

e) **Radiacja** – zyski ciepła z promieniowania słonecznego mierzone w kWh/m².

f) **Daylight Factor (DF)** – stosunek poziomu światła zewnętrznego do światła wpadającego do pomieszczenia, określany wzorem $DF = (E_i/E_o) \times 100\%$, gdzie E_i to natężenie światła dziennego w danym punkcie wewnętrznej płaszczyzny, a E_o to jednoczesne oświetlenie zewnętrzne na płaszczyźnie poziomej od niezastłoniętej półkuli zachmurzonego nieba⁷.

g) **Spatial Daylight Autonomy (sDA)** – mierzona w luxach jakość światła dziennego⁸.

Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej.

7 <http://patternguide.advancedbuildings.net/using-this-guide/analysis-methods/daylight-factor> 03.2022

8 <http://patternguide.advancedbuildings.net/using-this-guide/analysis-methods/daylight-autonomy.html> 03.2022



h) **Przewietrzanie - Symulacja tunelu aerodynamicznego / Outdoor airflow CDF (computational fluid dynamics)** – badania wpływu ruchu mas powietrza na komfort użytkownika przestrzeni.

i) **Dyskretyzacja / wzorzec dyskretyzacji** – dział matematyki dyskretnej i teorii sterowania zajmujący się przetransponowaniem modeli i równań ciągłych na dyskretne odpowiedniki, w celu ewaluacji numerycznej, czy implementacji na urządzeniu cyfrowym. Do tego procesu używa się przede wszystkim metody Eulera i kwantyzacji, czy ekstrapolatora rzędu zerowego.

j) **Teselacja** – podział wielokątów wygenerowanego obrazu 3d na mniejsze, w celu dokładniejszego odwzorowania geometrii.

k) **Modularyzacja** – podejście do konstruowania formy bazujące na zestawianiu ze sobą ustandaryzowanych jednostek/ modułów.

l) **Planaryzacja** – tworzenie form trójwymiarowych z płaskich, dwuwymiarowych form pomniejszych.

ł) **Integrated project delivery (IPD)**⁹ – metoda opracowywania projektu angażująca wszystkich uczestników procesu budowlanego na wszystkich etapach, mająca na celu zwiększania efektywności procesu projektowego przy wykorzystywaniu technologii w celu ułatwiania komunikacji.

⁹ <https://www.aiacontracts.org/resources/64146-integrated-project-delivery-a-guide> 03.2022



1.5. Cele rozprawy

Praca ma na celu zbadanie wzajemnych powiązań matematyki stosowanej i architektury, a w szczególności zbadanie zasadności stosowania metod matematycznych w procesie tworzenia form architektonicznych.

Analizując proces projektowy, poszukiwano odpowiedzi na pytania dotyczące wspólnych podstaw matematycznych w projektowaniu szeroko pojętych form przestrzennych. Ważnym aspektem pracy było poszukiwanie matematycznych inspiracji w powstawaniu projektów architektonicznych oraz próba zauważenia ewolucji w sposobie projektowania form przestrzennych, ściśle powiązanej z wykorzystywaniem możliwości zastosowań matematyki i algorytmiki przy uwzględnieniu mocy obliczeniowej komputerów. Podjęto się prób sklasyfikowania możliwych celów projektowych przy obecnym stopniu zaawansowania powyższego zjawiska.

Zadano sobie również pytanie, czy współczesny proces twórczy wykorzystujący możliwości technologiczne, a co za tym idzie skomplikowane obliczenia matematyczne, coraz bardziej spaja proces powstawania form, niezależnie od dziedziny twórczości.

Le Corbusier definiował architekturę w następujący sposób: *“Architektura jest mądrą, właściwą, wspaniałą grą brył w świetle(...). Poprzez wykorzystanie naturalnych materiałów powinna wytworzyć relację emocjonalne(...). Architektura jest sztuką w pełnym tego słowa znaczeniu;*

jest porządkiem matematycznym, spełnioną harmonią dzięki dokładnej proporcji wszystkich relacji.”¹⁰

W myśl definicji Le Corbusiera praca rozważa, czy na obecnym stadium rozwoju możliwości współczesnej matematyki architekci są w stanie określić za pomocą funkcji matematycznych parametry każdego aspektu wpływającego na poprawny projekt. Czy możliwym jest matematyczne opisanie relacji między wszystkimi występującymi parametrami i czy ich optymalizacja zaowocuje efektywnym procesem projektowym. Czy architekci zmierzają w kierunku, aby proces projektowy całościowo oprzeć na zapisie matematycznym. Zadaje ponadto pytanie o możliwość zatracenia się pierwiastka ludzkiego w architekturze, a co za tym idzie zanik „duszy” budynku. Groźba ta powstaje, gdyż proces projektowy od momentu powstania algorytmu zaczyna toczyć się sam, a twórca jest istotny tylko na początku, precyzując cele. Takie porzucenie standardów i przyzwyczajzeń generuje transformację cywilizacyjną może być sprzeczne z archetypem domu/budynku.

Po wstępnym etapie badań nad zastosowaniem matematyki w projektowaniu architektonicznym, w docelowej fazie nadrzędnym celem zarówno naukowo-badawczym, jak i aplikacyjnym dysertacji jest autorska analiza typów funkcjonalnych zapisu matematycznego i metod matematycznych w algorytmach używanych przy projektowaniu urbanistycznym i architektonicznym.

W ostatecznej fazie praca ma na celu określenie w jakich fazach projektowania, w jakim stopniu i w jakich

¹⁰ Le Corbusier, 1923, *Vers une architecture*, Paris, str. 9,16,121



aspektach sprecyzowanie matematycznego zapisu wymagań projektowych i stosowanie metod matematycznych stanowi efektywny wydzźwięk dla końcowego projektu architektonicznego.

1.6. Tezy badawcze

Mając na uwadze powyższe cele rozprawy, tezy pracy mają za zadanie przybliżyć odbiorcę do możliwie najdokładniejszej odpowiedzi na pytania dotyczące relacji zapisu architektonicznego/ metod matematycznych we współczesnym projektowaniu architektonicznym, definiując argumentację na podstawie przeprowadzonych badań i analiz.

Teza nr 1:
Projektowanie architektury rozumianej jako sztuki optymalnego kształtowania form przestrzennych można udoskonalić dzięki stosowaniu metod matematycznych na wszystkich fazach procesu projektowego, od koncepcji do realizacji.
Teza nr 2:
Ujęcie aspektów projektu architektonicznego jako zmiennych funkcji matematycznych przyczynia się do podniesienia jakości architektury pod kątem podejścia proekologicznego i idei równoważenia rozwoju w kontekście nasłonecznienia, radiacji, kryteriów takich jak Daylight Factor (DF), Spatial Daylight Autonomy (sDA), symulacji przewietrzania (Outdoor airflow), obszaru widoczności, uelastycznienia, estetyzacji i optymalizacji.

1.7. Stan badań

Mimo doświadczanego rozdźwięku między codzienną pracą architekta, a potencjalnymi możliwościami jakie niesie za sobą pełne wykorzystanie możliwości współczesnej matematyki, tematyka ta jest obecnie bardzo aktualna, silnie rozwijająca się i na pewno będzie wieść prym w analizie procesu projektowego w najbliższej przyszłości.

Badania nad opartym na zapisie matematycznym podejściem do projektowania prowadzi wielu naukowców, jak również wiele pracowni projektowych.

Badania objęły zapoznanie się z tą jakże szeroką obecnie tematyką, próby systematyzacji informacji, wychwycenia najbardziej istotnych współcześnie danych, po to, aby docelowo sprecyzować i poddać analizie tematykę pracy badawczej.

Dane zebrano na podstawie wielu źródeł min.: publikacje i artykuły naukowe, rozprawy doktorskie, publikacje pokonferencyjne, wywiady i dyskusje na konferencjach i seminariach naukowych.

Korzystano również z bazy wiedzy zawartej we współczesnych źródłach, takich jak videotutoriale, strony internetowe i blogi.

Stan badań rozpatrywano pod kątem poniższych aspektów: Zastosowanie zapisu matematycznego w projektowaniu architektonicznym w ujęciu



1.14 | WPROWADZENIE

historycznym¹¹¹²¹³¹⁴¹⁵¹⁶¹⁷, zastosowanie zapisu matematycznego i metod matematycznych we współczesnych formach architektonicznych¹⁸¹⁹²⁰²¹²², udział zapisu matematycznego na wszystkich etapach procesu projektowego²³²⁴²⁵²⁶²⁷²⁸²⁹³⁰³¹³² oraz zastosowanie metod matematycznych przy precyzowaniu współczesnych celów dla projektowania architektonicznego związanych

- 11 Rossi C., 2003, *Architecture and mathematics in ancient Egypt*, Cambridge University Press
- 12 Sarhangi R., 2012, *Persian architecture and mathematics*, Nexus Network Journal. Architecture and Mathematics
- 13 Williams K., Ostwald M.J., 2015, *Architecture and Mathematics from Antiquity to the Future*, Birkhäuser
- 14 Frei O., 1982, *Natürliche Konstruktionen. Formen und Strukturen in Natur und Technik und Prozesse ihrer Entstehung*, Deutsche Verlags-Anstalt GmbH, Stuttgart
- 15 Lim J., 2009, *Bio-structural Analogues in Architecture*, BIS Publishers, Amsterdam
- 16 Stewart I., 1999, *Life's Other Secret: The New Mathematics of the Living World*, Wiley
- 17 Ferreiros J., Gray J.J., 2006, *The Architecture of Modern Mathematics*, Oxford University Press
- 18 Tedeschi A., 2014, *AAD Algorithms-Aided Design*, Le Penseur
- 19 Schumacher P., 2014, *Design Parameters to Parametric Design*, The Routledge Companion for Architecture Design and Practice: Established and Emerging Trends, London
- 20 Agkathidis A., 2012, *Computational architecture: Digital designing tools and manufacturing techniques*, BIS.
- 21 Khabazi Z., 2011, *Generative Algorithms, Concepts and Experiments: Strip Morphologies*, Architectural Association (AA) London
- 22 Bladowski J., 2013, *Rozprawa doktorska: Zastosowanie algorytmów genetycznych w projektowaniu architektonicznym*, Politechnika Gdańska; Wydział Architektury
- 23 Duarte E.B., 2016, *User-Made Environments: Reflectivity & Digital Fabrication as Social Experience in Art & Architecture Pedagogy*, Ar(t)chitecture, Technion, Israel
- 24 Juchnevič R., 2020, *Rozprawa doktorska: Optymalizacja procesu projektowania przy użyciu współczesnych sposobów zapisu myśli architektonicznej*, Politechnika Gdańska; Wydział Architektury
- 25 Kolarevic B., 2009, *Towards Integrative Design*, International Journal of Architectural Computing 7 (3)
- 26 Mehrjerdi, Y. Z., 2009, *Excellent Supply Chain Management. Assembly Automation*
- 27 Çidik M.S., Boyd D., Thurairajah N., 2017, *Ordering in Disguise: Digital Integration in Built-Environment Practices*. Building Research and Information 45 (6)
- 28 Dossick C., Neff G., 2011, *Messy Talk and Clean Technology: Communication, Problem-Solving and Collaboration Using Building*



z ideą równoważenia rozwoju i podejścia proekologicznego³³³⁴³⁵³⁶. W ujęciu problematyki pod kątem norm i przepisów obowiązujących architektów (współcześnie wprowadzane są wymogi stosowania metod matematycznych przy symulacji wiatrów w obrębie nowych inwestycji) oraz wytycznych projektowych jakie niesie za sobą idea certyfikacji inwestycji (takich jak Breeam czy Leed), zagadnienie również jest współcześnie bardzo aktualne i rozwojowe.

Information Modelling. Engineering Project Organization Journal 1 (2): 83–93

- 29 Harty C., 2008, *Implementing Innovation in Construction: Contexts, Relative Boundedness and Actor-Network Theory*. Construction Management and Economics 26 (10): 1029–41
- 30 Wang Z., 2021, *Real Design Practice, Real Design Computation*. International Journal of Architectural Computing 19 (1)
- 31 Alvarez M., Wagner H.J, Groenewolt A., Krieg O.D., Kyjanek O., Sonntag D., Bechert S., Aldinger L., Menges A, Knippers J., 2019, *The Buga Wood Pavilion Integrative Interdisciplinary Advancements of Digital Timber Architecture*. Ubiquity and Autonomy - Paper Proceedings of the 39th Annual Conference of the Association for Computer Aided Design in Architecture, ACADIA 2019, 490–500
- 32 Rust R., Jenny D., Gramazio F., Kohler M., 2016. *Spatial Wire Cutting : Cooperative Robotic Cutting of Non-Ruled Surface Geometries for Bespoke Building Components*. CAADRIA 2016, 21st International Conference on Computer-Aided Architectural Design Research in Asia - Living Systems and Micro-Utopias: Towards Continuous Designing
- 33 Schumacher P., 2016, *Introduction: Parametricism 2.0 – Gearing up to Impact the Global Built Environment*, AD Parametricism 2.0 - Rethinking Architecture's Agenda for the 21st Century
- 34 Wehle-Strzelecka S., 2010, *Wykorzystanie wzorów przyrody i doświadczeń bioniki w kształtowaniu architektury pozyskującej energię słońca*, Czasopismo techniczne, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej
- 35 Peters B., Peters T., 2018, *Computing the Environment*, Digital Design Tools for Simulation and Visualisation of Sustainable Architecture, AD Smart 06
- 36 Peters T., 2011, *Experimental Green Strategies. Redefining ecological design research*, AD november/december 201



2. PROJEKTOWANIE ALGORYTMICZNE | MODELOWANIE PARAMETRYCZNE | PROJEKTOWANIE GENERATYWNE, JAKO WSPÓŁCZESNE STADIUM EWOLUCJI ZASTOSOWAŃ MATEMATYKI W ARCHITEKTURZE

2.1. Poszukiwania obecności matematyki w procesie projektowym

Analiza przykładów na to, jak wpływy osiągnięć matematyki mogą inspirować architekturę, przedstawia relacje między kompozycją form przestrzennych, a zasadami zapisu matematycznego i jest zauważalna w różnych przedziałach czasowych, różnych stylach i podejściach do myślenia o tworzeniu formy¹. Za symbolicznego prekursora myślenia o proporcjach, jako o parametrach można uznać Witruwiusza i jego Złoty Podział (Tabela 2.1a). Poddając analizie proces powstawania formy, poszukiwano ewolucji projektowania form przestrzennych, ściśle powiązanej z wykorzystywaniem możliwości zastosowań matematyki i algorytmiki przy uwzględnieniu mocy obliczeniowej komputerów² (Tabela 2.1b,c,d,e). Rozważano, czy możliwym jest zapis instrukcji na poprawny projekt przy użyciu sztywnego, logicznego, wskaźnikowego języka matematyki. Ponadto, czy współczesny proces twórczy, obfitujący w stosowanie metod matematycznych coraz bardziej spaja proces projektowy w każdej z dziedzin twórczości.

-
- 1 Czech A., Borucka J., 2016, *The Use of the Language of Mathematics as an Inspiration for Contemporary Architectural Design*, *Procedia Engineering* V. 161, s.1582-1587, Elsevier
 - 2 Czech A., Borucka J., 2017, *THE ARCHITECTURE AND FASHION DESIGN – An Examination of the Relationship between Fashion and Architecture Design in light of Technological Advancements*, [w:] *AR(t)CHITECTURE*, (red.) Iris Aravot, Dana Margalith, Faculty of Architecture and Town Planning, Technion, I.I.T, Haifa 2016, s. 97-108



2.2 | PROJEKTOWANIE PARAMETRYCZNE

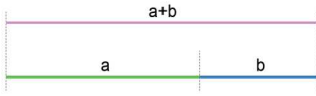
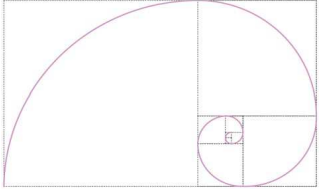
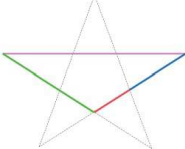
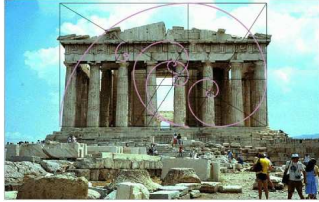
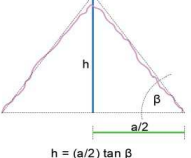
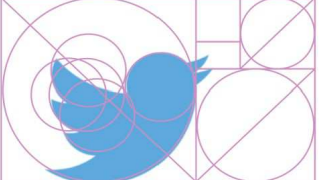
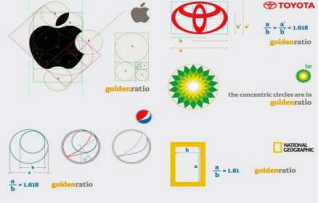
Prekursor idei parametryzacji Witruwiusz – Złoty podział	
<p>Zapis metoda matematyczna</p> <p>wartość Złotej Liczby</p> <p>proporcje Złotego Podziału</p> <p>źródło: grafika własna</p>	$\varphi = \frac{1 + \sqrt{5}}{2} = 1.6180339887\dots$  $\frac{a}{b} = \frac{a+b}{a} = 1.618\dots = \varphi$
<p>Interpretacja geometryczna</p> <p>Złota spirala</p> <p>Złoty Podział w Gwieździe Pitagorejskiej</p> <p>źródło: grafiki własne</p>	 
<p>Przykłady implementacji w architekturze</p> <p>Poszukiwanie złotych proporcji w porządku doryckim frontowej fasady Partenonu w Atenach</p> <p>źródło: grafika własna zdjęcie podstawowe: https://budowle.pl</p> <p>Złoty podział w kącie nachylenia ściany piramidy Cheopsa</p> <p>źródło: grafika własna</p>	  $h = (a/2) \tan \beta$
<p>Przykłady implementacji w sztuce użytkowej</p> <p>Logo Twittera wpisane w „Złote Prostokąty”</p> <p>źródło: grafika własna logo: https://twitter.com</p> <p>Logo znanych marek tworzone w oparciu o Złoty Podział</p> <p>źródło: http://designshack.co.uk</p>	 

Tabela.2.1a:
Wiruwiański Złoty Podział
jako prekursor idei
parametryzacji

źródło: własne



Rozwój zaawansowania zapisu matematycznego w inspiracjach przy projektowaniu architektonicznym cz. 1	
źródło inspiracji	De Stijl Styl międzynarodowy Bauhaus
cechy	- prostota geometrii - odrzucenie dekoracji - kąty proste
przykład	projekt miasto architekt źródło zdjęcia Willa Schrödera Utrecht Gerrit Rietveld https://upload.wikimedia.org
	
cechy zapisu matematycznego	- trywialny język geometrii euklidesowej

Tabela.2.1b:

Rozwój zaawansowania zapisu matematycznego w inspiracjach przy projektowaniu architektonicznym cz.1
De Stijl | Styl międzynarodowy | Bauhaus

źródło: własne

Rozwój zaawansowania zapisu matematycznego w inspiracjach przy projektowaniu architektonicznym cz. 2	
źródło inspiracji	Surrealizm Dekonstruktywizm
cechy	- intencja zaburzenia logicznego porządku rzeczywistości - ekspresja percepcji wewnętrznej - fragmentacja - wrażenie chaosu
przykład	projekt miasto architekt źródło zdjęcia UFA-Palast Drezno Coop Himmelblau http://www.coop-himmelblau.at
	
cechy zapisu matematycznego	- krzywoliniowe kształty - zachwianie statyki

Tabela.2.1c:

Rozwój zaawansowania zapisu matematycznego w inspiracjach przy projektowaniu architektonicznym cz.2
Surrealizm | Dekonstruktywizm

źródło: własne



2.4 | PROJEKTOWANIE PARAMETRYCZNE

Rozwój zaawansowania zapisu matematycznego w inspiracjach przy projektowaniu architektonicznym cz. 3

źródło inspiracji	Origami Kirigami
cechy	- tworzenie formy wedle zasad japońskiej sztuki składania papieru
przykład	projekt miasto architekt źródło zdjęcia Embedded Project Shanghai HDD FUN http://www.hhdfun.com
	
cechy zapisu matematycznego	- projektowanie według algorytmu postępowania

Tabela.2.1d:
Rozwój zaawansowania zapisu matematycznego w inspiracjach przy projektowaniu architektonicznym cz.3
Origami | Kirigami

źródło: własne

Rozwój zaawansowania zapisu matematycznego w inspiracjach przy projektowaniu architektonicznym cz. 4


źródło inspiracji	Fraktale
cechy	- samopodobieństwo - inspiracja formami z natury
przykład	projekt miasto architekt źródło zdjęcia Nagakin Capsule Tower Tokio Kisho Kurokawa http://www.kisho.co.jp
	
cechy zapisu matematycznego	- nietrywialna struktura - wymiar Hausdorffa większy niż topologiczny - rekurencja - iteracyjność - zapowiedź optymalizacji

Tabela.2.1e:
Rozwój zaawansowania zapisu matematycznego w inspiracjach przy projektowaniu architektonicznym cz.4
Fraktale

źródło: własne



2.2. Myślenie algorytmiczne

Podchodząc do procesu projektowego, jako do skończonego ciągu zdefiniowanych (np. zapisem matematycznym) czynności można oczekiwać efektu w postaci powstania przemyślanej, mądrej formy architektonicznej. Takie podejście określa miano projektowania algorytmicznego³.

Samo pojęcie algorytmu nie musi mieć koniecznie znamion zapisu stricte matematycznego, ale wraz z rozwojem myślenia nad projektowaniem algorytmicznym, taki rodzaj zapisu się naturalnie narzuca.

Przykładem algorytmu może być np. „przepis” na stworzenie formy przestrzennej metodą Origami. Mamy do czynienia z klasycznym, jednoznacznym instruktażem, którego implementacja zaowocuje zawsze tę samą formą. W procesie projektowania architektonicznego, nawet zanim wprowadzone zostanie modelowanie parametryczne, czy generatywne, warto stosować algorytmy postępowania.

Poniżej przedstawiono autorski przykład algorytmu dla samego procesu projektowego dla dziedziny architektonicznej:

1. *Analiza wytycznych dla działki budowlanej – optymalne określenie wskaźników, poprzez odnalezienie najlepszych zależności między nimi (min. powierzchnia zabudowy, intensywność, wysokość zabudowy, szerokość elewacji, odległości między budynkami, powierzchnia biologicznie czynna, ilość miejsc parkingowych)*

2. *Analiza kontekstu – uzyskanie ładu przestrzennego przy poszanowaniu specyfiki lokalizacji w odniesieniu do*

3 Terzidis K., 2006, *Algorithmic Architecture*, Architectural Press



zastanego środowiska przyrodniczego, krajobrazu i dziedzictwa kulturowego.

3. *Analizy „geograficzne” – warunki geograficzne, gruntowo-wodne, topografia, klimat, występowanie organizmów żywych, nasłonecznienie, zacienianie, przesłanianie, analizy widokowe*

4. *Wyciągnięcie wniosków z powyższych, określenie priorytetów, optymalizacja*

5. *Określenie wytycznych dotyczących przeznaczenia obiektu i jego funkcji (optymalizacja programu funkcjonalno-przestrzennego)*

6. *Poszukiwanie inspiracji, formowanie idei projektowej (zwłaszcza w odniesieniu do analizy kontekstu)*

7. *Poszukiwania i analizy formy*

8. *Dostosowanie tekstur, materiału i kolorystyki*

9. *Optymalizacja*

Projektowanie architektoniczne, jako złożona dziedzina sprawia, że każdy punkt głównego algorytmu należy rozbudować o „podalgorytmy” specjalistyczne. Projekt architektoniczny, odchodząc od tematu gustów i estetyki, powinien być przede wszystkim poprawny, czyli spełniający wymogi i wytyczne. Projektowanie wedle algorytmu postępowania pomaga zminimalizować chaos natłoku wytycznych i precyzuje cele⁴.

2.3. Modelowanie parametryczne

Zestawiając dane wejściowe, np. zawarte w wytycznych z dokumentów planistycznych, zauważamy, że regulacje dotyczące kształtowania zabudowy w nich opisane w znacznej mierze są wskaźnikowe.

4 Tedeschi A., 2014, *AAD Algorithms-Aided Design*, Le Penseur



Poza tym, kreując nową formę (dzieło sztuki lub budynek), poddaje się ją również sztywnym, logicznym i mierzalnym wskaźnikom związanym z zasadami kompozycji. Główne środki kompozycji stanowią: geometryczna charakterystyka formy, podziały i artykulacje, stosunki wagowe, symetria, osie symetrii, akcenty, hierarchie, kolor, tekstura i proporcje⁵. Znaczną część tych cech można określić zapisem matematycznym oraz uzależnić od siebie wzajemnie metodami matematycznymi za pomocą funkcji wielu zmiennych.

Będąc ukierunkowanym na poszukiwania zapisu matematycznego w procesie projektowym, należy zdawać sobie sprawę i zaobserwować jak najwięcej oczekiwanych parametrów.

Na tym etapie, poszukując zależności między zadanymi parametrami, można mówić o modelowaniu parametrycznym^{6,7}. W definicji modelowanie parametryczne jest „sztywne”, bez elementu losowości. Takim myśleniem możemy wytworzyć np. ścianę określając wskaźnikowo jej parametry (grubość, długość i wysokość) lub możemy uzależnić funkcjonalnie parametry względem siebie. Do omówionego już

5 Arnheim R., 1974, *Art and Visual Perception: A Psychology of the Creative Eye*, Berkley: University of California Press

6 Schumacher P., 2016, *Introduction: Parametricism 2.0 – Gearing up to Impact the Global Built Environment*, AD Parametricism 2.0 - Rethinking Architecture's Agenda for the 21st Century

7 Schumacher P., 2014, *Design Parameters to Parametric Design*, The Routledge Companion for Architecture Design and Practice: Established and Emerging Trends, London

8 Zboińska M., 2012, Rozprawa doktorska: *Wpływ parametrycznych technik modelowania i optymalizacji na architekturę obiektów krzywoliniowych*, Politechnika Gdańska; Wydział Architektury



algorytmicznego procesu projektowego dochodzi więc parametryzacja.

2.4. Generowanie formy

Naturalnym następstwem jest digitalizacja procesu projektowego, czyli projektowanie komputacyjne⁹¹⁰. Za pomocą włączania do algorytmicznego procesu projektowego cyfrowych narzędzi w postaci modelowania parametrycznego i generatywnego, celem projektanta okazuje się być nie wytworzenie bryły, a samego procesu tworzenia¹¹¹²¹³. Bryły wytwarzane tą metodą noszą miano wygenerowanych¹⁴¹⁵¹⁶¹⁷¹⁸.

Na rynku istnieje kilka graficznych edytorów algorytmów. Ich interface jest ułatwieniem dla projektanta, który nie musi posiadać umiejętności pisania kodów, a może wykorzystywać gotowe komponenty, które stanowią odpowiednik reprezentacji funkcji matematycznych oraz może pracować na określonych typach danych (dane liczbowe, tekst, geometria).

9 ang. computational design

10 Agkathidis A., 2012, *Computational architecture: Digital designing tools and manufacturing techniques*, BIS.

11 Braham W.W., 2007, *Rethinking Technology*, A Reader in Architectural Theory, Routledge

12 Douglis E., 2009, *Autogenic Structures*, Taylor & Francis

13 Helenowska-Peschke M., 2014, *Parametryczno-Algorytmiczne projektowanie architektury*, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej

14 Adrover E.R., 2015, *Deployable Structures*, Laurence King Publishing

15 Bechthold M., 2008, *Innovative Surface Structures, Technologies and Applications*, Taylor & Francis

16 Khabazi Z., 2010, *Generative Algorithms, Concepts and Experiments: Weaving*, Architectural Association (AA) London

17 Khabazi Z., 2011, *Generative Algorithms, Concepts and Experiments: Strip Morphologies*, Architectural Association (AA) London

18 Khabazi Z., 2011, *Generative Algorithms, Concepts and Experiments: Porous Shell*, Architectural Association (AA) London



Mowa o kodowaniu kreatywnym, idei stworzonej na potrzeby projektantów, nie będących programistami^{19,20,21}.

Graficzny edytor algorytmów użyty w dysertacji w rozdziale Research by design to Grasshopper – plug-in do oprogramowania do modelowania 3D Rhinoceros. Środowisko Grasshoppera umożliwia projektantowi tworzenie własnych komponentów przy znajomości takich środowisk jak np. C#, Visual Basic lub Python²².

Procesem koniecznym podczas projektowania architektonicznego jest optymalizacja. Dyscypliną naukową, będącą gałęzią matematyki zajmującą się teorią decyzji są badania operacyjne. Sensem tej dyscypliny jest wyznaczenie metody służącej rozwiązaniu określonego problemu, podejmując optymalne decyzje. Podstawowym problemem optymalizacyjnym jest programowanie matematyczne, czyli maksymalizacja określonej funkcji celu przy zadanych warunkach ograniczających.

Naturalnym następstwem występującym w podejściu algorytmicznym do procesu projektowego jest zagadnienie algorytmów genetycznych²³. Taki typ algorytmu, inspirowany zjawiskiem ewolucji, służy

19 Duarte E., B., 2016, *User-Made Environments: Reflectivity & Digital Fabrication as Social Experience in Art & Architecture Pedagogy*, Ar(t)chitecture, Technion, Israel

20 Frazer J.H., Liu H., Tang M., 2004, *Supporting creative design in a visual evolutionary computing environment*, *Advances in Engineering Software* 35 261-271, Elsevier

21 Frazer J., Liu X., Tang M., Jansen P., 2002, *Generative and Evolutionary Techniques for Building Envelope Design*, *Generative Art*.

22 Khabazi Z., 2012, *Generative Algorithms with Grasshopper version 2.0*, Architectural Association (AA) London

23 Bładowski J., 2013, *Rozprawa doktorska: Zastosowanie algorytmów genetycznych w projektowaniu architektonicznym*, Politechnika Gdańska; Wydział Architektury



optymalizacji. Plug-in do Grasshoppera, przydatny przy optymalizacji (dla jednego kryterium) z zastosowaniem algorytmów genetycznych nosi nazwę Galapagos.

Algorytmy służące do optymalizacji²⁴, np. algorytmy genetyczne zaliczane są do kategorii algorytmów generatywnych.

W odróżnieniu od modelowania parametrycznego, można tu mówić o projektowaniu generatywnym, które jest jego rozszerzeniem ideowym wzbogaconym o element losowości. Procesy generatywne są znacznie bardziej złożone, np. zawierają w sobie całe spektrum tak zwanych symulacji (np. symulacja tunelu aerodynamicznego). W myśl projektowania generatywnego, proste zasady są w stanie wygenerować niezwykle złożoną geometrię.

Za pomocą projektowania generatywnego przeprowadzane są analizy dotyczących następcznienia, zacieniania, radiacji, analizy wiatru, analizy widokowe. Są to złożone algorytmy, które wykorzystują zadane numeryczne dane wejściowe określone przez lokalne stacje meteorologiczne i pochodne tematycznie wytyczne.

Rozważając współczesną architekturę należy wziąć pod uwagę osiągnięty stopień zaawansowania technologicznego, moc obliczeniową nowoczesnych komputerów, zazębianie się matematyki i algorytmiki i siłę ich oddziaływania na proces projektowy. Można

²⁴ Juchnevič R., 2020, *Rozprawa doktorska: Optymalizacja procesu projektowania przy użyciu współczesnych sposobów zapisu myśli architektonicznej*, Politechnika Gdańska; Wydział Architektury



powiedzieć, że projektowane formy przestrzenne w coraz większym stopniu wywodzą się z współczesnych możliwości technologicznych. Tym sposobem, obserwując dzisiejsze projektowanie zauważamy jak coraz większa ilość zaawansowanej matematyki występuje w procesie kreowania form przestrzennych²⁵²⁶. Drogą „ewolucji”, obecności matematyki we współczesnym tworzeniu form przestrzennych należy doszukiwać się w idei parametryzacji i projektowania generatywnego²⁷.

Dzięki temu, zmianie ulega sposób myślenia o matematycznym podejściu do projektowania architektonicznego. Architektura parametryczna i generatywna to taki sposób myślenia o kreowaniu budynku, aby przy zadanych ograniczeniach zadbać o największą ilość parametrów funkcji celu. Projektowanie komputacyjne sprowadza się do odnalezienia zależności funkcyjnych między poszczególnymi elementami zarówno w przestrzeni i kompozycji, jak i w funkcjonalności budynku.

Jeśli jakiś aspekt wpływający na poprawny projekt jest wskaźnikowy, matematyka jest narzędziem, który jest w stanie go zoptymalizować. Dlatego dzięki projektowaniu parametrycznemu możemy zmniejszyć zużycie energii, zapewnić chłodzenie latem, wykonać analizę nasłonecznienia, symulację ruchu ludzi, dostosować

25 Burry J., Burry M., 2010, *The New Mathematics of Architecture*, Thames & Hudson

26 Kolarevic B., 2004, *Architecture in the Digital Age*, Taylor & Francis

27 Jabi, W., 2013, *Parametric Design for Architecture*, Laurence King Publishing Ltd.



2.12 | PROJEKTOWANIE PARAMETRYCZNE

stosunek przeszkleń do warunków atmosferycznych, ilość ciepła wnikaającego przez m² fasady itp.

Architektura parametryczna stanowi więc kluczowy moment przeskoku w zastosowaniu zapisu matematycznego, gdyż od tego momentu oprócz bryły jesteśmy w stanie ingerować przede wszystkim w funkcjonowanie budynku, w jego ekonomikę, elastyczność przekształceń, czy wpływ na środowisko.

Na obecnym etapie rozwoju są to kluczowe aspekty architektury, jako że osiągamy jako cywilizacja coraz wyraźniejszą świadomość, że jakakolwiek działalność człowieka powinna odbywać się z poszanowaniem środowiska naturalnego.

Idea projektowania parametrycznego i generatywnego, poprzez swoje funkcjonalne zastosowanie, wykracza szeroko poza sztukę i architekturę i odnosi się współcześnie do wielu dziedzin. Przykładem może być projekt parametrycznego gipsu autorstwa Jake'a Eville z Victoria University w Wellington. Eville zaprojektował wytwarzany drukarkami 3d możliwie najbliższy elastyczny gips, który usztywnia złamaną kość tak samo skutecznie jak tradycyjny gips.



3. CYFROWA NOTACJA NATURY

Poniższy rozdział koncentruje uwagę na zastosowaniu odkryć biologów w dziedzinie morfogenezy, z naciskiem na siły tworzące i utrzymujące przy życiu formy organiczne oraz na wykorzystaniu powyższych zjawisk i próbie odtworzenia ich za pomocą metod matematycznych podczas projektowania¹². Analizuje cechy roślin i zwierząt, których zewnętrzna powłoka dostosowuje się do warunków zewnętrznych³. Poszukuje żywych form, w których ewolucja wykształciła cechy związane z kształtem, formą, „elewacją” (np. w postaci skóry) umożliwiające przetrwanie oraz sprawne funkcjonowanie oraz podejmuje próbę przetransponowania takiego myślenia o żywych organizmach na budynek i jego fasadę, przy wykorzystaniu języka matematyki⁴⁵. Wpływy matematyki na projekty inspirowane środowiskiem naturalnym zauważalne są od starożytności. Obserwacje zagadnienia wraz z upływem czasu dowodzą wzrostu uzależnienia efektu projektowanych form od stopnia zaawansowania zastosowań zapisu matematycznego dla dziedzin pobocznych⁶⁷⁸⁹¹⁰.

-
- 1 Lim J., 2009, *Bio-structural Analogues in Architecture*, BIS Publishers, Amsterdam
 - 2 Klein L., 2014, *Żywe architektury – Analogia biologiczna w architekturze końca XX w.*, Fundacja Kultura Miejsca
 - 3 Paturi F. R., tłumaczenie Witkowska B., 1984, *Ewolucja czy konstrukcja: Rośliny genialnymi inżynierami przyrody*, Warszawa
 - 4 Pearce P., 1978, *Structure in Nature is a Strategy for Design*, MIT
 - 5 Thompson D., 1942, *On Growth and Form*, Cambridge University
 - 6 Frei O., 1982, *Natürliche Konstruktionen. Formen und Strukturen in Natur und Technik und Prozesse ihrer Entstehung*, Deutsche Verlags-Anstalt GmbH, Stuttgart
 - 7 Ball P., 2009, *Shapes: Nature's Patterns: A Tapestry in Three Parts*, Oxford University Press
 - 8 Ball P., 2001, *The Self-Made Tapestry: Pattern Formation in Nature*, Oxford University Press



3.1. Fraktale | rekurencja | iteracyjność | zapowiedź optymalizacji

Praca traktuje zagadnienie fraktali jako symboliczne ogniwo w ewolucji inspiracji matematyką w projektowaniu form przestrzennych, gdyż stanowią one kolejny poziom w stopniu skomplikowania algorytmicznego zapisu form przestrzennych.

Słowo fraktal (łac. *Fractus*) oznacza dokładnie złamany, cząstkowy, ułamkowy. W znaczeniu potocznym oznacza obiekt samo-podobny (tzn. taki, którego części są podobne do całości) albo "nieskończenie subtelny" (ukazujący subtelne detale nawet w wielokrotnym powiększeniu). Ze względu na różnorodność przykładów matematycy unikają podawania ścisłej definicji i proponują określać fraktal jako zbiór, który posiada wszystkie poniższe charakterystyki albo przynajmniej ich większość. Fraktal ma w każdej skali, złożoną, nietrywialną strukturę, która nie daje się łatwo opisać w języku tradycyjnej geometrii euklidesowej. Jest samo-podobny, jeśli nie w sensie dokładnym, to przybliżonym lub stochastycznym, jego wymiar Hausdorffa jest większy niż jego wymiar topologiczny, ma względnie prostą definicję rekurencyjną¹¹², ma *naturalny* ("poszarpany", "kłębiasty" itp.) wygląd.

Wraz z rozwojem możliwości obliczeniowych współczesnych komputerów, fraktale można potraktować

9 Stewart I., 1999, *Life's Other Secret: The New Mathematics of the Living World*, Wiley

10 Stevens P., 1974, *Patterns in Nature*, Little Brown and Company

11 Mandelbrot, B.B., 1983, *The fractal geometry of nature*, W. H. Freeman and Company NY, USA

12 Mandelbrot B. B., 2004, *Fractals and Chaos*, Berlin: Springer



jako algorytmiczną inspirację naturą zapisaną skomplikowanym językiem matematyki. Daje to nowe spojrzenie na czerpanie przez artystów i architektów inspiracji z otaczającej natury. Współcześnie inspirujemy się cyfrową notacją natury. Projektowane formy zatoczyły koło, powróciły do natury, ale w zupełnie nowym rozumieniu tego słowa, co jest dostosowane do cybernetycznego świata, w którym obecnie żyjemy. Ponadto, fraktale ze względu na swoją względnie prostą definicję rekurencyjne nakierowują architekturę na ideę optymalizacji, a co za tym idzie na myślenie o idei równoważenia rozwoju. Dlatego też matematyczne zagadnienie fraktali, można odbierać jako bardzo dokładne przedstawienie celów parametryzacji we współczesnym projektowaniu architektonicznym.

Przykładem fraktala spotykanym w środowisku naturalnym może być kalafior (Rys.3.1a), błyskawica, płatek śniegu czy kwiat paproci.



Rys.3.1a:
Fraktal w naturze

źródło:
<http://ciekawe.org>



3.2. Algorytmiczne odwzorowanie struktur roślinnych

Opracowanie *Algorithmic Beauty of Plants*¹³ poświęcone jest generowaniu form odnajdywalnych w naturze za pomocą prostej matematyki. Stanowi próbę oddania piękna roślin za pomocą precyzyjnego, mechanicznego języka matematyki, który określa jako odwzorowanie świata rzeczywistego za pomocą mechanizmów obliczeniowych. Służy za podstawę tworzenia matematycznej, komputerowej natury.

Pierwszy rozdział koncentruje uwagę na modelowaniu graficznym przy pomocy L-Systemów¹⁴ (innymi słowy systemów Lindenmayera), które w grafice komputerowej podchodzą do iteracyjnego generowania roślin w analogii do generowania fraktali.

Podejście do pracy na ciągu znaków jest podobne do notacji Beckusa-Natura, jako reguł zapisu gramatyki bezkontekstowej używanej w informatyce do zapisu składni języków programowania¹⁵, jak również do hierarchii Chomsky'ego klas języków formalnych i lingwistyki komputerowej¹⁶. Podstawową różnicą jest praca na „przepisywaniu” całego ciągu wejściowego, w odróżnieniu od pojedynczych symboli. Zadany model zawiera oryginalny ciąg znaków (traktowany jako aksjomat) oraz serię produkcji, czyli reguł jego

13 Prusinkiewicz P., Lindenmayer A., 1990, *The Algorithmic Beauty of Plants*, Springer-Verlag, New York

14 Weisstein E.W., 2020, *Lindenmayer System*, MathWorld, Wolfram Research

15 Iglewski M., Madey J., Matwin S., 1979, *Pascal – język wzorcowy. Pascal 360.*, WNT

16 Wieczorkowski K., 2009, *Lingwistyczne teorie Noama Chomsky'ego w zastosowaniach komputerowych w pedagogice*, Forum Oświatowe



„przepisywania” w kolejnych krokach. Pracując na zadanym ciągu rekurencyjnie, rozszerzana jest wrażliwość na kontekst, stochastyczność i parametryzację. W przypadku przełożenia symboli na struktury graficzne, w założeniu, że każda reguła produkcji ma zastosowanie jedynie do tego jednego konkretnego symbolu, mamy do czynienia z L-systemem bezkontekstowym. Odmiennie, jeśli produkcja zawiera symbole sąsiednie, mówimy o L-systemach kontekstowych. Jeśli dla symbolu (struktury graficznej) istnieje tylko jedna reguła produkcji, określa go miano deterministyczny. L-system stochastyczny to reguły produkcji, do których przypisane zostało konkretne, określone prawdopodobieństwo jego zastosowania.

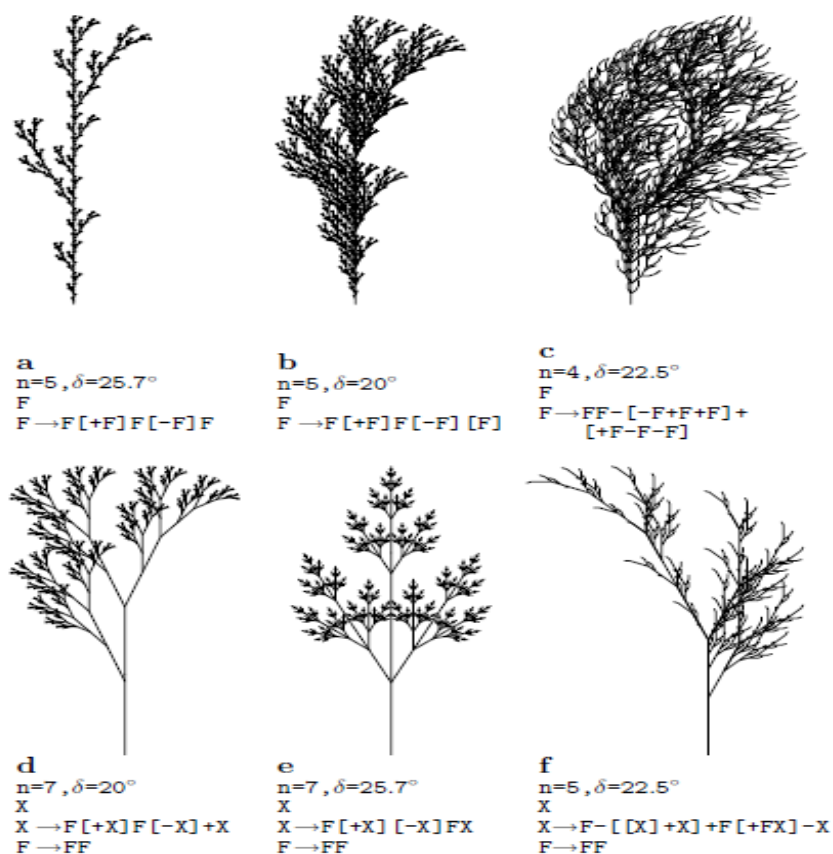
Transformacja zapisu formalnego do grafiki może tu przybierać różne formy, na przykład tak zwaną grafikę żółwia, gdzie każdy symbol w L-systemie interpretowany jest jako określona sekwencja ruchów żółwia (analogicznie jak w języku programowania Logo, służącym jako środek do nauczania informatyki i matematyki). Powstałym ciągom odpowiadają kształty geometryczne, jako że instrukcje postępowania obejmują dyrektywy ruchu. Dzięki mocy obliczeniowej, przekształca z aksjomatu i względnie prostych instrukcji produkcji skomplikowane ciągi, w których rozpoznawalne są formy roślinne. Formy biologiczne są tym samym w tym pojęciu wyhodowane z podstawowego systemu produkcyjnego (takiego jak DNA), a nie muszą przechowywać pełnej reprezentacji gotowego organizmu.

Rozdział „Modelowanie drzew” poświęcony jest rozgałęziającym się strukturom i przemieszczaniu w myśl



3.6 | CYFROWA NOTACJA NATURY

reakcji ruchowej roślin na bodźce zewnętrzne (zjawisko tropizmu¹⁷). Obserwacja ruchu, w postaci zwrotu lub wygięcia, w kierunku bodźca znajduje zastosowanie w tworzeniu elewacji współgrającej z otoczeniem. Kolejno omawiana jest szersza gama kształtów roślin. Wyodrębniane są takie cechy struktury roślin, jak regularne rozmieszczenie organów (liście na łodydze, czy łuski na szyszce). Szczegółowy kształt liścia lub płatków kwiatu jest tu traktowany jako predefiniowana struktura danych (Rys.3.2a). Wprowadzane jest pojęcie komponentów oraz omawiana wydajność ich reprezentacji. Dodatkowo opracowana jest opis „wirtualnego laboratorium”, jako środowiska oprogramowania do modelowania roślin.



Rys.3.2a:
 Przykłady struktur odwzorowujących formy roślinne za pomocą L-systemów

źródło: Prusinkiewicz P., Lindenmayer A., 1990, The Algorithmic Beauty of Plants, Springer-Verlag, New York

17 Kopcewicz J., 2002, *Ruchy roślin. Fiziologia roślin*, Wydawnictwo Naukowe PWN, 2002, s. 586-601

W myśl idei algorytmicznego tworzenia form zaczerpniętych z przyrody, za pomocą oprogramowania Mathematica autorstwa Stephena Wolframa opracowano autorski skrypt (Rys.3.2b) generujący wielokolorową paproć (Rys.3.2c) na bazie fraktala.

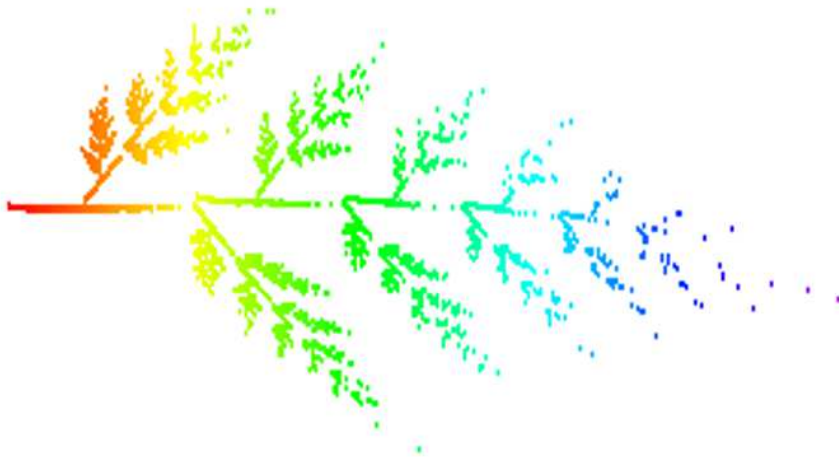
```
Options[Fraktal] = {frakt -> 1};

Fraktal[op_] := Module[{lista = {}, x = 0, y = 0},
  opcja = frakt /. {op} /. Options[Fraktal];
  Which[

opcja == 2, {
  a[x_,
    y_] := {0.8*x - 0.0286*y + 0.1875, -0.049*x + 0.825*y + 0.0762};
  b[x_, y_] := {0.2270*x - 0.164*y + 0.1328,
    0.342*x + 0.192*y + 0.3086};
  c[x_,
    y_] := {0.2480*x - 0.195*y + 0.2461, -0.3770*x - 0.0966*y +
    0.4119};
  d[x_, y_] := {0.237*x, -0.0137*y + 0.375};
  For[n = 1, n < 20000, n++,
    { z = Random[Integer, {0, 3}];
      If[z == 0, {x, y} = a[x, y]];
      If[z == 1, {x, y} = b[x, y]];
      If[z == 2, {x, y} = c[x, y]];
      If[z == 3, {x, y} = d[x, y]];
      AppendTo[lista, {Hue[x], Point[{x, y]}]};
    }];
  Show[Graphics[lista]];},
```

Rys.3.2b:
Skrypt generujący wielokolorową paproć na bazie fraktala

źródło: własne



Rys.3.2c:
Efekt graficzny obrazujący działanie skryptu generującego wielokolorową paproć na bazie fraktala

źródło: własne

3.3. Morpho-ecologies | Bionika | Biomimikra | Biomimetyka

W rozważaniach nad kierunkiem rozwoju najbliższej przyszłości architekt Paolo Portoghezi postuluje:

„Najważniejszą treść nowego stulecia można zawrzeć w generalnym imperatywie: uczyć się od przyrody¹⁸. Od natury wywodzą się wszystkie archetypy architektoniczne powstałe w wyniku obserwacji”¹⁹.

W myśl powyższej idei, architektura powinna kontynuować dzieło przyrody, jako że również podlega oddziaływaniu takich samych czynników zewnętrznych – działaniu słońca, wody i wiatru. Architektura powinna rekompensować środowisku straty spowodowane inwestycyjną działalnością człowieka.²⁰

Zasoby przyrodnicze, takie jak struktura komórki, skóry, powłok, oślon (pod postacią pancerzy, muszli, skorupy, kory, łożdgi i liści), zdolności i cechy DNA oraz procesy zachodzące w przyrodzie (takie jak fotosynteza) nakierowują architektów na podpowiedzi rozwiązań projektowych konkretnie dla rozwiązań materiałowych czy konstrukcyjnych. Odpowiednikiem powyższych w architekturze są na przykład powłoki jako płaszczyzny transmisyjne wewnątrz-otoczenie wraz z systemami pozyskującymi energię słoneczną.

18 Ang. learning from nature

19 Portoghezi P., 1999, *Imparare dalla natura (Learning from nature)*, Domus 9

20 Wehle-Strzelecka S., 2010, *Wykorzystanie Wzorów przyrody i doświadczeń bioniki w kształtowaniu architektury pozyskującej energię słońca*, Czasopismo techniczne, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej



Morpho – ecologies

W myśl definicji Goethego, morfologia to nauka o badaniach nad formą, natomiast Ernst Haeckel definiuje ekologię, jako naukę o związkach między organizmami, a otoczeniem.

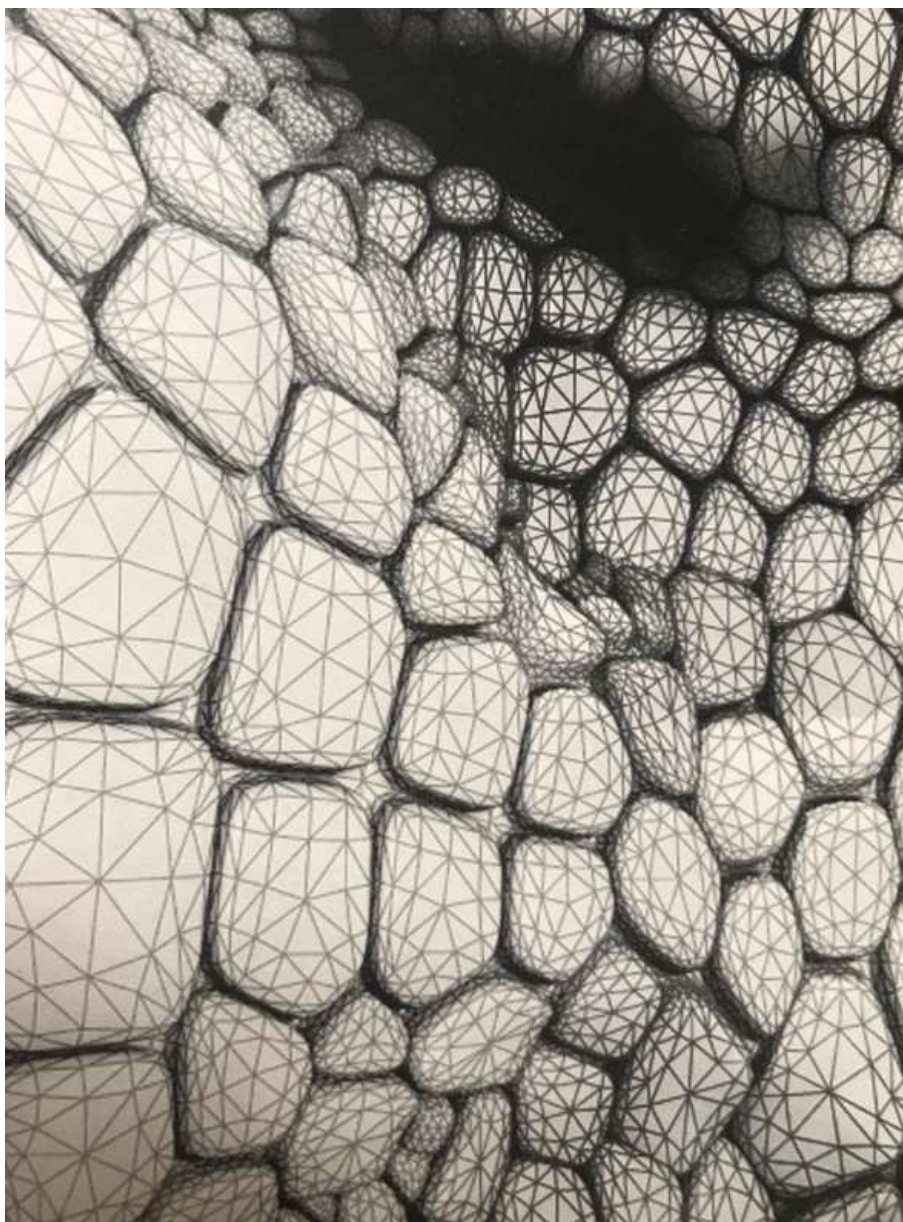
„*Morpho-Ecologies*²¹” to koncepcja i podejście polegające na odniesieniu związków między organizmami żywymi, a środowiskiem do architektury, której jednym z kluczowych zadań jest wytworzenie możliwości zamieszkania, poprzez interweniowanie w przestrzeń za pomocą struktury i materiału.

Określenie nowych ram dla projektowania architektonicznego opiera się w tym podejściu do porównań do zagadnień z morfogenezy i ekologii. Wyższego poziomu funkcjonalności i wydajności architektury dopatruje się w paradygmacie biologicznym.

W myśl powyższej koncepcji, inspiracji do zastosowań w projektowaniu elewacji dopatrywać się można w zróżnicowanej powierzchni skóry krokodyla (Rys.3.3a). Wszystkie moduły naskórka są topologicznie identyczne, ale stanowią warianty geometryczne rozmieszczone na zakrzywionych powierzchniach. Mniejsze moduły lokalizowane są na obszarach o bardziej skomplikowanej krzywiznie, jako że te obszary wymagają większej elastyczności, aby umożliwić krokodylowi poruszanie się. Różnorodność geometryczna, jak i zróżnicowanie skali integrują się w celu uzyskania większej funkcjonalności.

21 Hensel M., Menges A., 2006, *Morpho-Ecologies*, Architectural Association London





Rys.3.3a:
Model cyfrowy
zróżnicowania
powierzchni skóry
krokodyla

źródło:
Nicolas Stathopoulos i
Pavel Hladik

Kolejnym przykładem jest odniesienie do „labiryntów” koralowców (Rys.3.3b). Zobrazowany fragment modelu cyfrowego przedstawia dwa poziomy hierarchie zróżnicowania. Liniowy szkielet elementów „labiryntu” wypełniony przegubowym materiałem powierzchniowym, który łączy i wspiera pierwszy poziom. Indywidualne elementy są zróżnicowane geometrycznie, ale równe pod względem skali.





Rys.3.3b:
Fragment modelu cyfrowego obrazujący dwa poziomy hierarchii zróżnicowania formy u koralowców

źródło:
Nicolas Stathopoulos i
Pavel Hladik

Bionika | Biomimikra | Biomimetyka

Postępując się wmiennie określeniami bionika²², biomimikra, biomimetyka, mamy do czynienia z interdyscyplinarną nauką, której podstawą są badania budowy i obserwacje funkcjonowania organizmów żywych oraz próby przetransponowania wyciągniętych wniosków do innych dziedzin wiedzy, w tym architektury.

²² Lebediew, J.S., 1983, *Architektura i bionika*; Arkady, Warszawa



3.12 | CYFROWA NOTACJA NATURY

Takie badania prowadził już Leonardo da Vinci, który próbował stosować obserwacje przyrody w swoich projektach, np. brył samolotów.

Julian Vincent, uznawany za autorytet w dziedzinie biomimikry szacuje, że współcześnie, za pomocą dostępnej technologii, naukowcom udało się wykorzystać i zastosować w dziedzinach pobocznych około dwanaście procent procesów podpatrzonych w naturze²³.

Stowarzyszenie The Biomimicry Guild, specjalizujące się w zastosowaniu biomimikry, stanowi bazę patentów w dziedzinie oraz nawiązuje współpracę z projektantami przy projektowaniu form inspirowanych naturą.

Opracowując wspólnie z pracownią HOK koncepcję wielokrotnie nagradzanej metropolii (Lavasa, Mumbai) w Indiach, za podstawę wytycznych projektowych narzucano sobie założenie, aby fundamenty na wzór korzeni drzew gromadziły wodę deszczową, a dachy, jak korony drzew odpowiadały za sprawowanie kontroli nad procesem parowania²⁴. Systemy odprowadzania wody w okresach deszczy monsunowych zostały opracowane po obserwacjach i analizie kanalików w mrowiskach konstruowanych przez lokalne mrówki.

Efekty rozwoju zastosowań biomimikry uzależnione są od interdyscyplinarnych zespołów.

Matematycy stanowią w tej strukturze ogniwo łączące biologów oraz specjalistów z dziedzin pokrewnych z projektantami.

²³ Vincent J., 2006, Biomimetics: its practice and theory, Journal of the Royal Society Interface

²⁴ <https://littlegreenseed.wordpress.com/2012/06/24/hoks-architectural-biomimicry/> 03.2022



Na potrzeby implementacji zjawiska biomimikry, w projektowaniu architektonicznym należy wziąć pod uwagę jego następujące aspekty. Analogicznie do organizmów żywych przystosowanych do swoich siedlisk, architektura powinna za ich przykładem wykorzystywać lokalnie pozyskiwanie energii i wody oraz regulować termikę.

Można tego dokonać analizując na przykład gatunki, które potrafią przetrwać na terenach pustynnych. Chrzęszcz *Onymacris Unglicularis* występujący na Pustyni Namib wykształcił charakterystyczną, unikatową powłokę pancerza, która przekształca mgłę w krople wody, co stanowiło inspirację do badań nad technologią powłok bionicznych pozyskujących wodę z otoczenia. Zastosowanie materiału z podwójnej warstwy porowatego polimeru, w którym wewnętrzna warstwa odpycha wodę, a zewnętrzna ją przyciąga, dzięki połączeniu za pomocą instalacji węglowych nanorurek, wykształcono „gąbkę”, która wiąże wodę. Aby wydobyć ją z takiego labiryntu należy ścisnąć materiał.

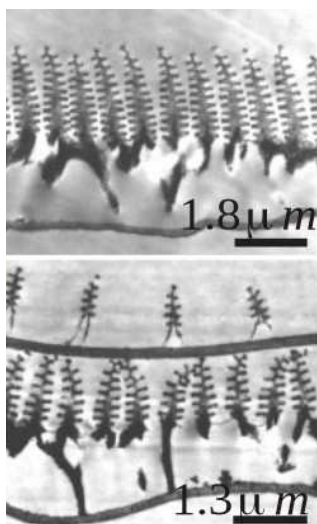
Technologia analiz załamania fal świetlnych obserwowanych na skrzydłach motyla *Morpho* (Rys. 3.3c) umożliwia redukcję zużycia sztucznych barwników i pigmentów przy doborze kolorystyki projektowanych elewacji. W mikroskopijnej strukturze skrzydeł owada zaobserwowano załamanie fali świetlnej i uzyskanie błękitnej barwy, jako że do oka odbiorcy dostaje się tylko część spektrum „filtrowana” przez strukturę²⁵.

²⁵ Gimzewski J., Vensa V., 2011, *Blue Morph: uwagi o działaniu samoorganizującej się zmiany krytycznej (self-organized criticality)*, Przegląd Kulturoznawczy NR 1(9)



Rys 3.3c:
Iryzacja – nadawanie
koloru jako funkcja
kryształów
fonicznych
powstałych w wyniku
ewolucji naturalnej

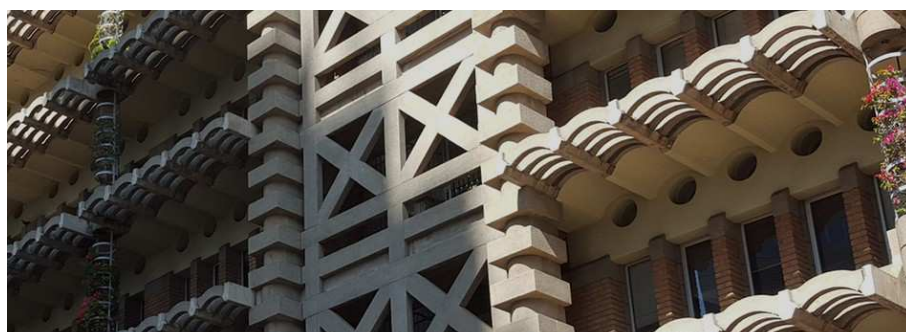
źródło:
Vukusic P., Sambles
J.R., 2003, *Photonic
structures in biology*,
Nature Vol 424



Projekt architektoniczny Eastgate w Harare w Zimbabwe autorstwa Micka Pearcea (Rys.3.3d) powstał natomiast w oparciu o badania kopców termitów, które jak się okazało, wytworzyły charakterystyczny system wentylacji. Implementacja powyższego w projekcie kompleksu biurowo-handlowego w sieci szybów wentylacyjnych, które regulują temperaturę i kontrolują cyrkulację powietrza redukuje aż o 90% ilość energii wymaganej do ogrzania i chłodzenia w porównaniu do analogicznych budynków pozbawionych tego systemu²⁶.

Rys 3.3d:
Elewacja Eastgate
Harare w Zimbabwe
powstała w oparciu o
badanie kopców
termitów

źródło:
www.arup.com

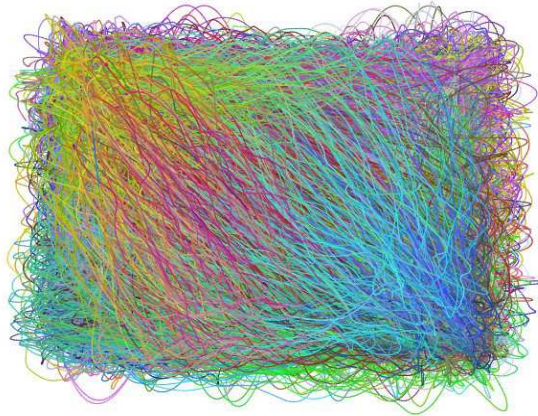


Craig Reynolds opracował zagadnienie „Boids”, tłumaczone jako „bird-oid objects”, które przy wykorzystaniu oprogramowania sztucznego życia symuluje

²⁶ National Geographic video "See How Termites Inspired a Building That Can Cool Itself", dostęp youtube.com 03.2022



zachowanie hord ptasich. W architekturze ma to zastosowanie na przykład przy badaniu symulacji ewakuacji z budynków²⁷. Efekty wytworów graficznych opartych na bazie „bird-oid objects” przedstawia poniższa grafika (Rys.3.3e).



Rys 3.3e:
Efekt działania
algorytmu opartego
na bazie „bird-oid
objects”

źródło:
www.rectangleworld.com

Obserwowane zjawiska organizmów żywych, za pomocą matematycznego przetransponowania ich na materiały budowlane i ich strukturę, mają bezpośredni wpływ na regulację zasilania, termiki, przepływu wody, czy odpadów. W architekturze, jako pośredniku w procesach wymiany zasobów między człowiekiem, a środowiskiem naturalnym, zastosowane technologie integrują cywilizację z ekosystemem, co powinno następować w poszanowaniu środowiska²⁸²⁹³⁰³¹.

27 Craig R., 1987, Flocks, herds and schools: A distributed behavioral model, SIGGRAPH '87: Proceedings of the 14th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, str. 25-34

28 Kowalski Z., Kulczycka J., Góralczyk M., 2007, *Ekologiczna ocena cyklu życia procesów wytwórczych (LCA)*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa

29 Schumacher P., 2016, *Introduction: Parametricism 2.0 – Gearing up to Impact the Global Built Environment*, AD Parametricism 2.0 - Rethinking Architecture's Agenda for the 21st Century.

30 Peters B., Peters T., 2018, Computing the Environment, Digital Design Tools for Simulation and Visualisation of Sustainable Architecture, AD Smart 06

31 Peters T., 2011, Experimental Green Strategies. Redefining ecological design research, AD november/december 2011



3.16 | CYFROWA NOTACJA NATURY

Ponadto, w myśl nurtu „biophilic design”, polegającym na wprowadzaniu natury do wnętrza i otoczenia budynków, obserwować można korzyści płynące dla człowieka³². Udowodniono, że pacjenci szpitalni, którzy mieli widok na tereny zielone podczas rekonwalescencji dochodzili do zdrowia szybciej³³. Otaczająca natura jest w stanie przekazać wiele wiedzy projektantom, jak również wpływać na samopoczucie.

Zagadnienie cyfrowej notacji natury stanowi rozszerzenie zagadnienia fraktali, umiejscawiając zapis matematyczny jako ogniwo pośrednie między formami żywymi, a korzyściami jakie mogą wnosić do projektowania architektonicznego.

32 Kellert S.R., Wolson E.O., 1993, *The Biophilia Hypothesis*, Island Press

33 Dąbski M., 2015, *Rola i kształtowanie zieleni w otoczeniu szpitali*, Forma '24/1

4. RESEARCH BY DESIGN | CZĘŚĆ EKSPERYMENTALNA | TYPOLOGIA ALGORYTMÓW UŻYWANYCH PRZY PROJEKTOWANIU ARCHITEKTONICZNYM

Część praktyczna badań polega na tworzeniu i analizie algorytmów generujących formy przestrzenne.

Zastosowanie badań w praktyce opiera się na generowaniu i analizie algorytmów¹ dotyczących tworzenia sparametryzowanych form przestrzennych²³⁴⁵⁶⁷⁸ oraz badania ich zachowań i możliwości edycji podczas zmiany parametrów.

4.1. Elipsoidalne skręcone wieże

4.1.1. Wieża na planie elipsy

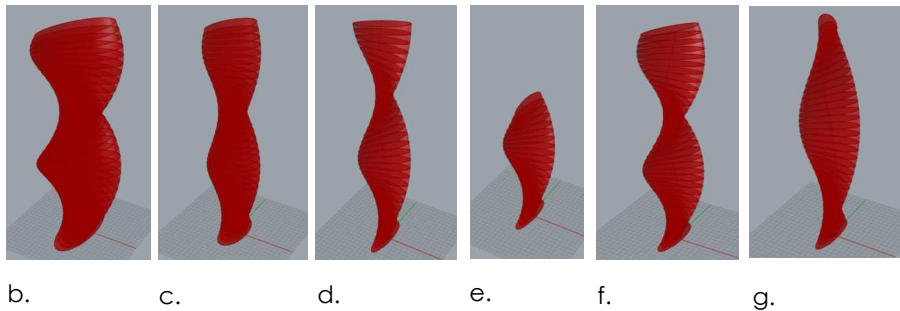
Pierwszy eksperyment badawczy polega na tworzeniu sparametryzowanej wieży na planie elipsy, generując jej skręt na podstawie indukcyjnej serii obrotów kolejnego piętra względem poprzedniego. Elipsę określono funkcją elementarną, w postaci kanonicznej dla układu kartezjańskiego (x, y) za pomocą równania $x^2/a^2 + y^2/b^2 = 1$, gdzie a i b są długościami półosi.

W pierwszym kroku algorytm tworzy dwuwymiarową elipsę na podstawie zadanych promieni (długości półosi). Myśląc o obiekcie docelowym jako o budynku, elipsa stanowi rzut poziomy typowego piętra. Następnie zapisano serię powtórzeń wyniesienia każdego z pięter.

-
- 1 Przy użyciu programu Grasshopper stanowiącego wtyczkę do programu Rhinoceros służącą do modelowania algorytmicznego
 - 2 <https://vimeopro.com/rhino/grasshopper-getting-started-by-david-rutten/video/79844992> 03.2022
 - 3 <https://vimeo.com/album/2282897> 03.2022
 - 4 <http://designalyze.com/software/grasshopper> 03.2022
 - 5 <http://www.grasshopper3d.com/> 03.2022
 - 6 <https://thinkparametric.com/> 03.2022
 - 7 <http://antonioturillo.blogspot.it/> 03.2022
 - 8 <http://formularch.blogspot.com/> 03.2022

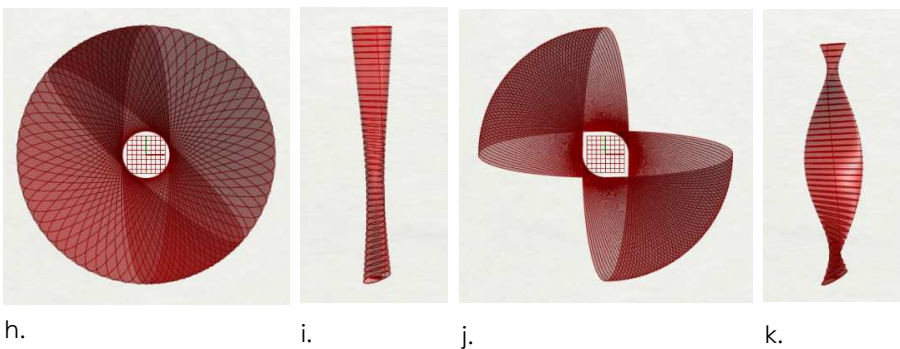


zadanych różnych kątach obrotu obrazuje grafika 4.1.1f,g,h.



Rys.4.1.1b,c,d,e,f,g:
Efekty działania algorytmu wieży na planie elipsy z indukcyjną rotacją każdego piętra względem poprzedniego dla zadanych różnych parametrów promieni, kąta obrotu i ilości kondygnacji

źródło: własne

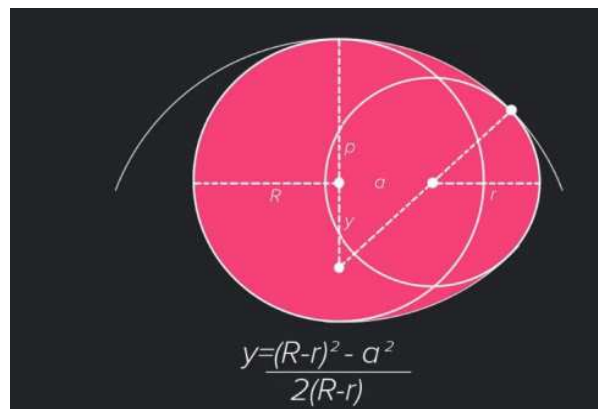


Rys.4.1.1h,i,j,k:
Efekty działania algorytmu wieży na planie elipsy z indukcyjną rotacją każdego piętra względem poprzedniego dla zadanych różnych parametrów promieni, kąta obrotu i ilości kondygnacji – widoki z góry (h,j), widok perspektywiczny (i,k)

źródło: własne

4.1.2. Wieża na planie pochodnej z rodziny elipsoid o nierównomiernym kącie obrotu

Kolejny eksperyment badawczy polegał na wytworzenie wieży na planie pochodnej z rodziny elipsoid, powstałej w wyniku uzyskania wzoru na krzywą styczną do dwóch zadanych okręgów niewspółśrodkowych.⁹



Rys.4.1.2a:
Plan piętra typowego jako płaszczyzny wewnątrz pochodnej z rodziny elipsoid, jako krzywej stycznej do dwóch zadanych okręgów niewspółśrodkowych

źródło:
<https://thinkparametric.com>

⁹ Problem projektowy zaczerpnięto z kursu architektury parametrycznej online <https://thinkparametric.com/> 03.2022

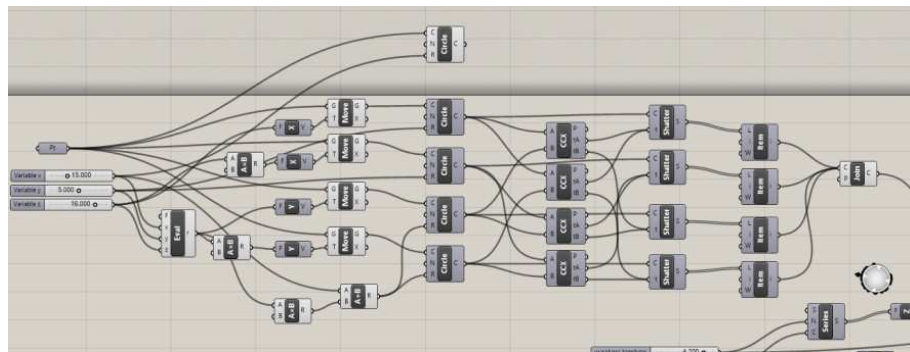
4.4 | RESEARCH BY DESIGN

Zadaniem tego algorytmu jest wygenerowanie wieży o znacznie bardziej skomplikowanym rzucie piętra typowego i nierównomiernym kącie obrotu.

Plan piętra typowego tworzy płaszczyzna wewnątrz pochodnej z rodziny elipsoid, powstała w wyniku zaprogramowania wzoru na krzywą styczną do dwóch zadanych okręgów niewspółśrodkowych (Rys.4.1.2a). Problem projektowy, wprowadzający zapis matematyczny

Rys.4.1.2b:

Algorytm postępowania przy tworzeniu planu piętra typowego jako płaszczyzny wewnątrz pochodnej z rodziny elipsoid, jako krzywej stycznej do dwóch zadanych okręgów niewspółśrodkowych



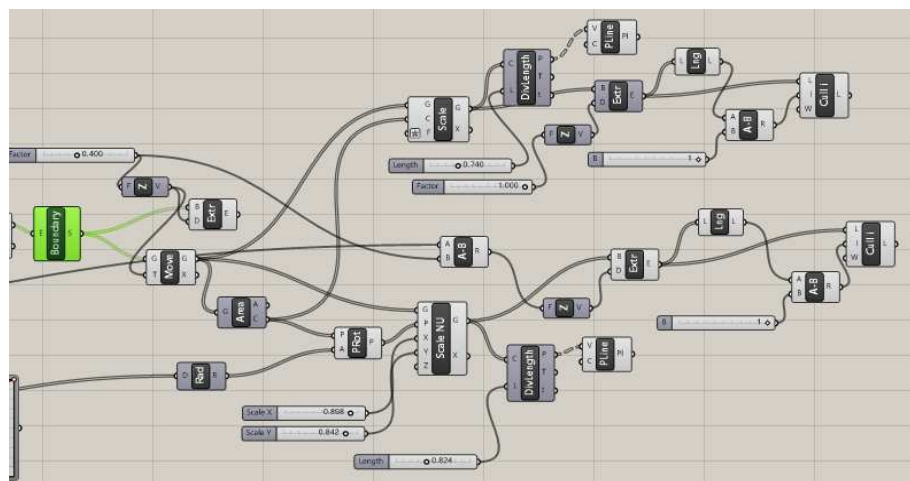
źródło: własne

funkcji określającej ową pochodną elipsoidy bazuje na danych wyjściowych w postaci pojedynczego punktu w przestrzeni (Rys.4.1.2b).

Wieża składa się z korpusu podstawowego oraz wysuniętych równomiernie balkonów z balustradami, co zapisano za pomocą poniższej grafiki obrazującej powstawanie formy (Rys.4.1.2c)

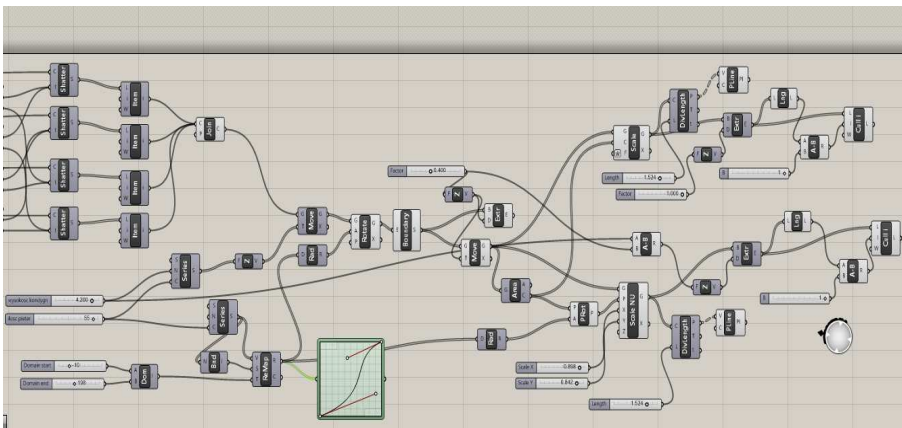
Rys.4.1.2c:

Algorytm postępowania przy tworzeniu korpusu podstawowej oraz wysuniętych równomiernie balkonów z balustradami



źródło: własne

Generowanie skrętu wieży następuje na podstawie serii obrotów kolejnego piętra względem poprzedniego, jednak z uzależnieniem od siebie zmiennej określającej wysokość wieży i promień skrętu każdego piętra względem poprzedniego, tak aby nie dopuścić do przekraczania zadanego kąta obrotu. Docelowo modyfikacja polega na uzyskaniu nierównomiernych skrętów między piętrami przy edycji za pomocą mapowania grafowego (Rys.4.1.2d).



Rys.4.1.2d:
Algorytm postępowania przy generowaniu skrętu wieży za pomocą mapowania grafem

źródło: własne

Efekty działania algorytmu przy zadanych różnych parametrach przedstawiają poniższe grafiki (Rys.4.1.2.e,f,g).



e.



f.



g.

Rys.4.1.2e,f,g:
Efekty działania algorytmu dla wieży na planie pochodnej z rodziny elipsoid, przy generowaniu skrętu za pomocą mapowania grafowego

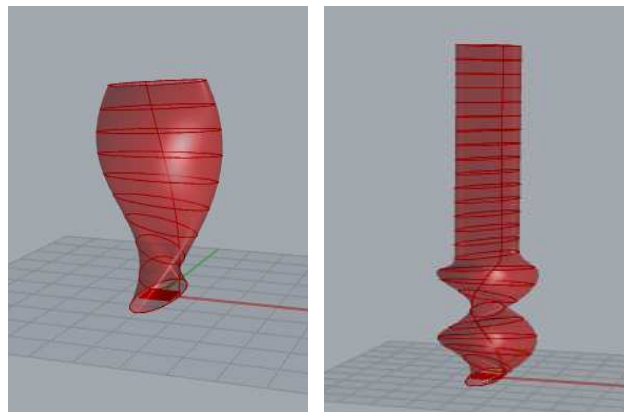
źródło: własne



Podczas badań wystąpiła niepożądana sytuacja problemowa, w której nie uzależniono parametru skrętu od maksymalnej wysokości wieży, co uniemożliwiło podwyższenie wieży, jeśli osiągała ona pełen kąt obrotu. W drugiej problematycznej sytuacji, wieża osiągając maksymalny kąt obrotu rosta dalej jedynie pionowo w górę (Rys.4.1.2h,i).

Rys.4.1.2h,i:
Efekty niepożądane błędów w działaniu algorytmu dla wieży na planie pochodnej z rodziny elipsoid, przy generowaniu skrętu za pomocą mapowania grafowego

źródło: własne



h.

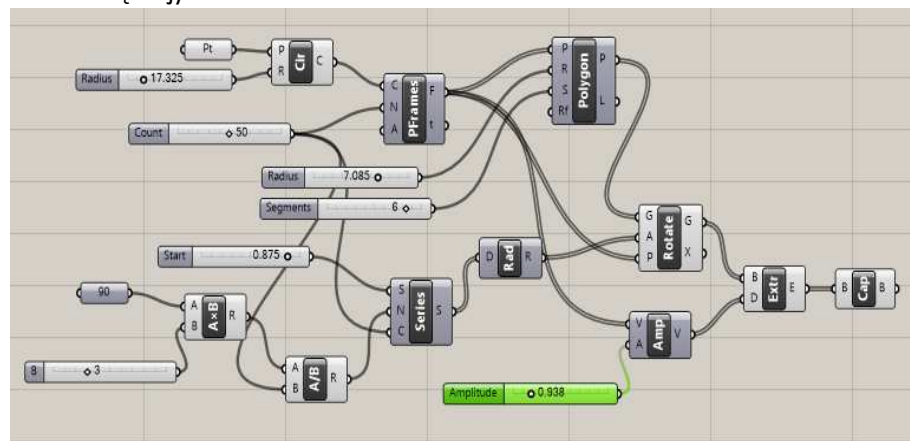
i.

4.2. Pierścienie składające się z dowolnych figur geometrycznych skręconych względem siebie

Kolejnym ćwiczeniem badawczym było tworzenie pierścieni (lub innych dowolnych zamkniętych kształtów), wypełnianie ich dowolnymi figurami geometrycznymi oraz uzależnianie promienia skrętu jednej z figur w stosunku do poprzedniej od ilości figur w pierścieniu (lub innej krzywej zamkniętej).

Rys.4.2a:
Następujące po sobie kroki zapisu matematycznego dla pierścieni składające się z dowolnych figur geometrycznych skręconych względem siebie

źródło: własne



Następujące po sobie kroki zapisu matematycznego powyższego obrazuje schemat algorytmu (Rys.4.2a), a uzyskane różnorodne efekty graficzne przy zadaniu różnych parametrów zestawiono na trzech przykładach (Rys.4.2b,c,d).



Rys.4.2b,c,d:
Efekty graficzne uzyskane za pomocą skręcania względem siebie dowolnych figur geometrycznych w obrębie dowolnych krzywych zamkniętych

źródło: własne

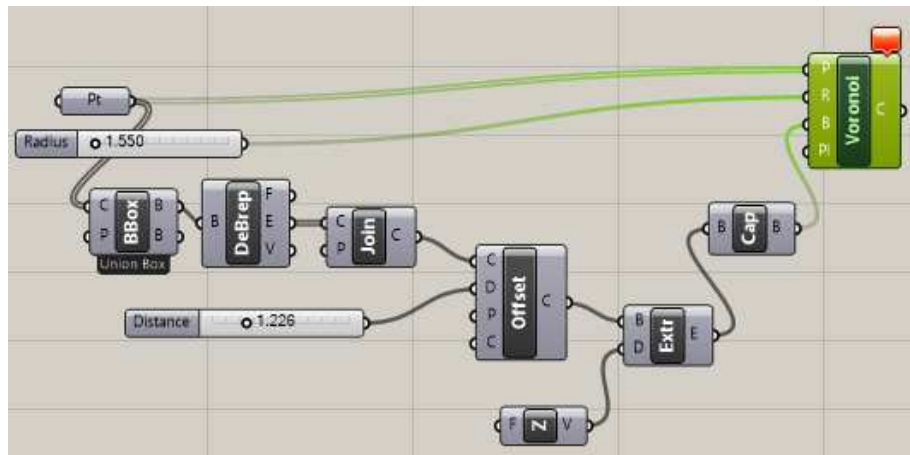
4.3. Diagramy Woronoja | Tesselacja Dirichleta

Kolejny problem badawczy, mogący mieć zastosowanie w projektowaniu architektonicznym, opiera się na podziałach płaszczyzny wedle tesselacji Dirichleta¹⁰. Zamiennie można mówić o Diagramach Woronoja, tesselacji Dirichleta, tesselacji Woronoja czy komórkach Woronoja.

Pracując na ograniczonym obszarze dwuwymiarowym i losowym zbiorze n punktów z tego obszaru, zadanie polega na uzyskaniu takiego podziału obszaru, aby każdy punkt w dowolnym podobszarze znajdował się bliżej określonego punktu ze zbioru n niż od pozostałych $n-1$ punktów. Procedurę postępowania ukazuje poniższy skrypt (Rys.4.3a).

¹⁰ Opracowano na podstawie problemu projektowego Weinstein E.W., Voronoi Diagram, dostęp na <https://mathworld.wolfram.com/VoronoiDiagram.html> 03.2022



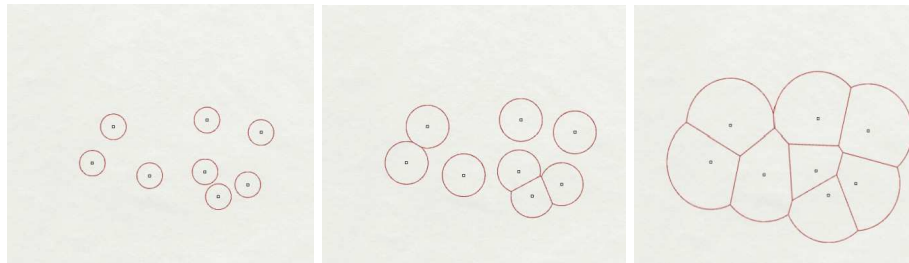


Rys.4.3a:
Następujące po sobie
kroki zapisu
matematycznego dla
uzyskania diagramu
Wonoraja

źródło: własne

Obserwacje rozrastania się podobszarów w efekcie graficznym po zmianie parametru maksymalnego promienia wokół każdego z punktów ukazują poniższe grafiki (Rys.4.3b,c,d).

Rys.4.3b,c,d:
Rozrastanie się
podobszarów w
wizualizacji graficznej
tessellacji Dirichleta
przestrzeni przy
zwiększaniu parametru
maksymalnego
promienia wokół
każdego z punktów



b.

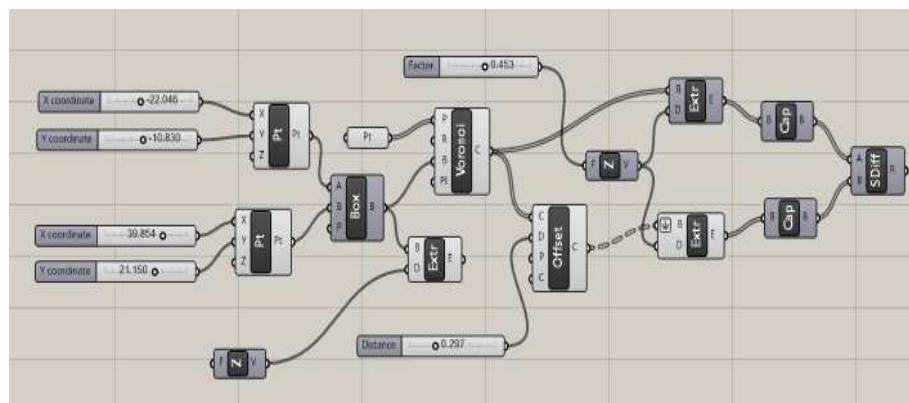
c.

d.

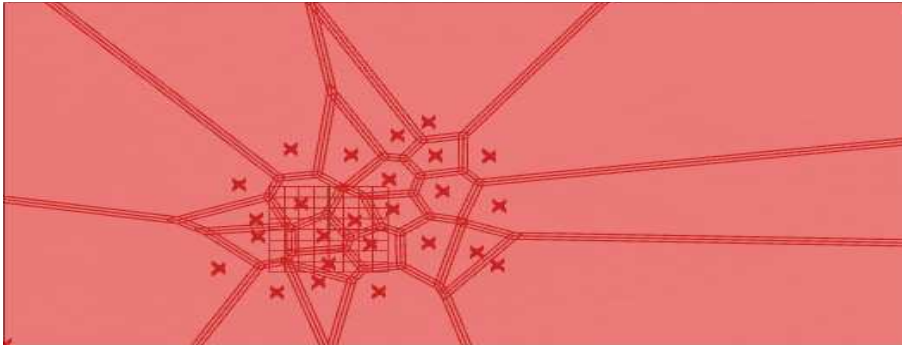
źródło: własne

W kolejnym kroku podjęto próby wyniesienia formy w przestrzeń trójwymiarową, zadając grubość liniom ograniczającym obszary wedle przedstawionych instrukcji (Rys.4.3e,f,g).

Rys.4.3e:
Próby uzyskania zasady
działania tessellacji
Dirichleta w przestrzeni
trójwymiarowej

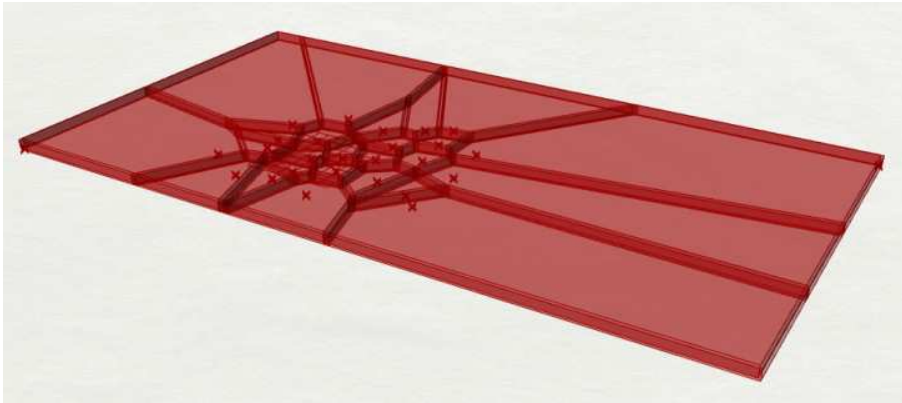


źródło: własne



Rys.4.3f:
Efekty graficzne
uzyskania zasady
działania tresselacji
Dirichleta

źródło: własne



Rys.4.3g:
Efekty graficzne
uzyskania zasady
działania tresselacji
Dirichleta w przestrzeni
trójwymiarowej

źródło: własne

4.4. Gradient kolorystyczny zbioru podwójnych łuków

Przy użyciu funkcji generującej łuki na podstawie zbioru punktów początkowych i końcowych (otrzymanych przez podział dwóch dowolnych krzywych w przestrzeni trójwymiarowej na odcinki o równej długości) oraz stycznych do początków i końców łuków, algorytm tworzy gradient graficzny rozróżniający łuki na podstawie ich długości.

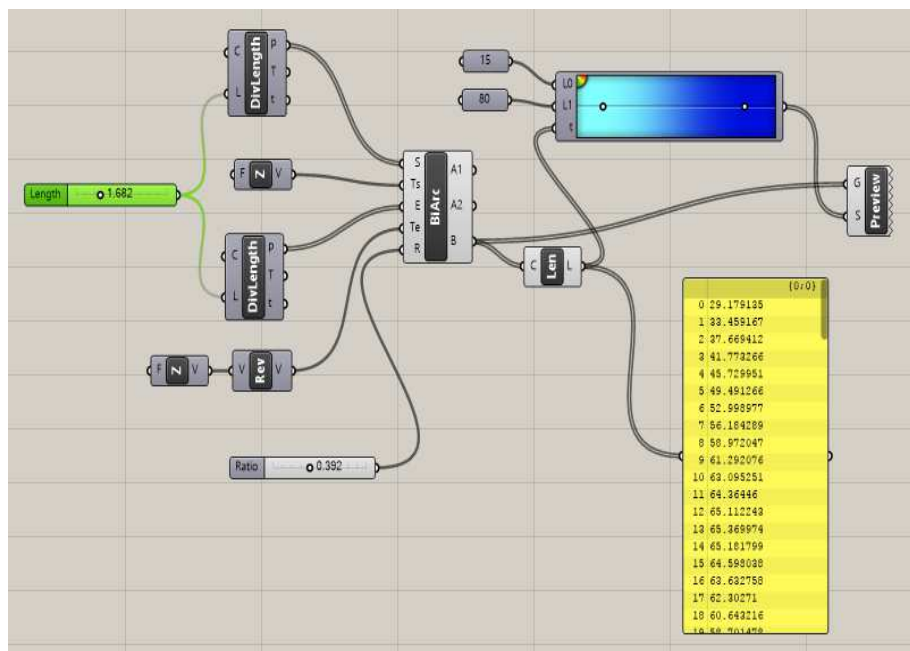
Danymi wyjściowymi dla algorytmu (Rys.4.4a) są dwie dowolne krzywe usytuowane w przestrzeni trójwymiarowej. W pierwszym kroku algorytm dzieli te krzywe na segmenty o zadanej przez użytkownika długości. Tym samym uzyskano dwa zbiory punktów, początkowe i końcowe. W kolejnym kroku generowane są tak zwane łuki podwójne / przetamane.



4.10 | RESEARCH BY DESIGN

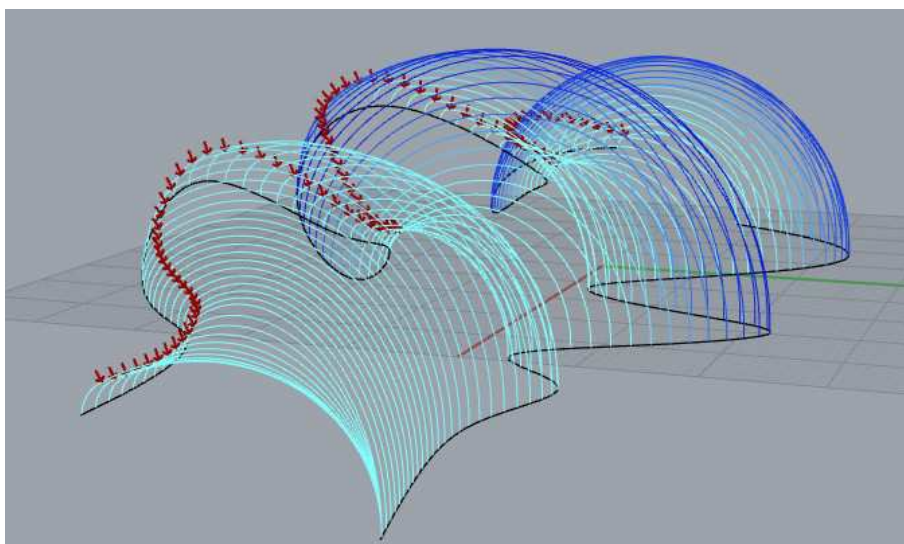
Pracując na zbiorze punktów początkowych, przy użyciu wektora normalnego równoległego do osi „z” trójwymiarowego układu współrzędnych, funkcja tworzy pierwszy zbiór stycznych do krzywej początkowej w uzyskanych po podziale punktach, w kierunku dodatnim. Analogicznie, na krzywej końcowej, w punktach uzyskanych po podziale, wyprowadzane są styczne do krzywej końcowej.

Aby łuki znalazły punkt wspólny w przestrzeni dodatniej układu współrzędnych, należy zastosować wektor odwrotny do normalnego, a następnie wprowadzić parametr ograniczony wartościami od zera do jednego określający promień „przełamania” łuku podwójnego powstałego z powyższych stycznych. Do pomocy dodano funkcję obliczającą długość powstałych łuków podwójnych. Na podstawie uzyskanej przez nią listy danych, aby mieć łatwiejszy ogląd ich długości w przestrzeni trójwymiarowej nadano im kolor używając funkcji gradientu kolorystycznego (Rys.4.4b,c,d).



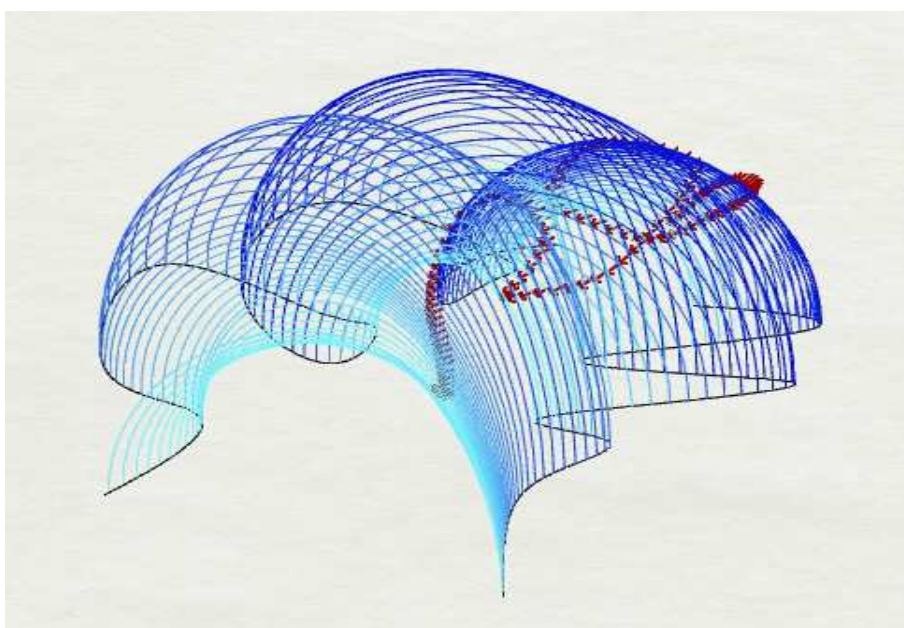
Rys.4.4a:
Algorytm postępowania przy generowaniu gradientu kolorystycznego dla zbioru podwójnych (przełamanych) łuków

źródło: własne



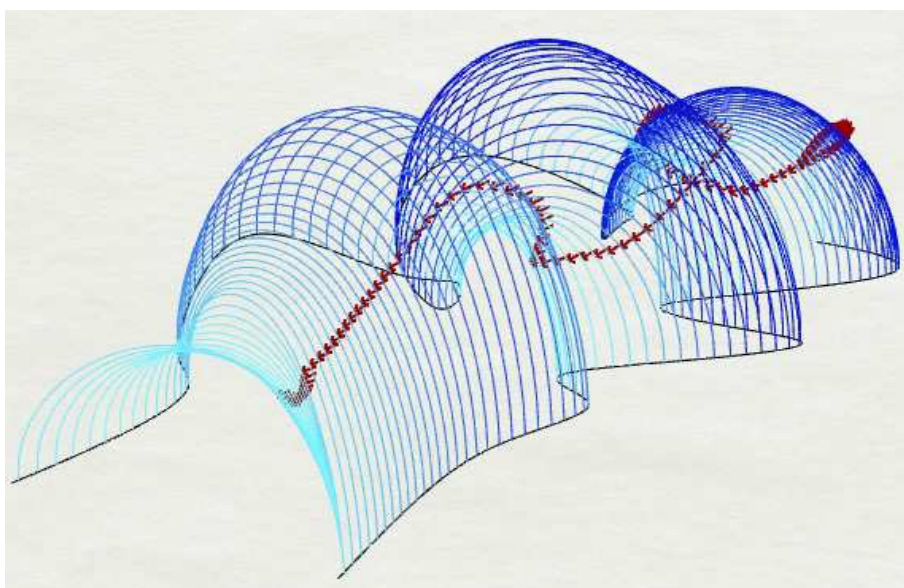
Rys.4.4b:
Efekty przestrzenne generowania gradientu kolorystycznego dla zbioru podwójnych (przetamanych) łuków. W grafice d zauważamy spłaszczoną bryłę, uzyskaną przy zadaniem punkcie przecięcia bliższym wartości 1

źródło: własne



Rys.4.4c:
Efekty przestrzenne generowania gradientu kolorystycznego dla zbioru podwójnych (przetamanych) łuków

źródło: własne



Rys.4.4d:
Efekty przestrzenne generowania gradientu kolorystycznego dla zbioru podwójnych (przetamanych) łuków

źródło: własne



4.5. Wariacje na temat zespołu brył inspirowanego Pomnikiem Pomordowanych Żydów Europy w Berlinie¹¹

4.5.1. Zbiór prostopadłościanów o zróżnicowanej wysokości, uzależnionej od odległości od zadanej krzywej
Badanie polega na uzyskiwaniu zbioru prostopadłościanów o zróżnicowanej wysokości na podstawie przeliczania odległości środka podstawy danego prostopadłościanu od dowolnie zadanej krzywej narysowanej w przestrzeni dwuwymiarowej. Krzywa ta może stanowić w układzie urbanistycznym np. reprezentację ciągu pieszego lub rzeki.

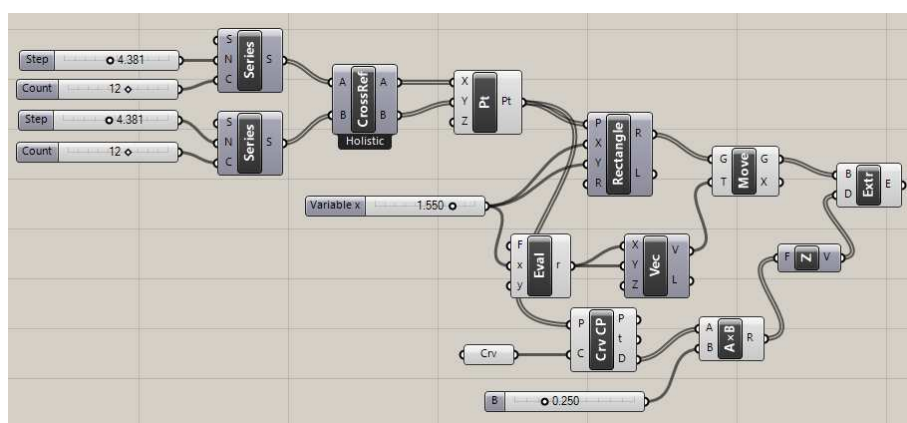
Algorytm (Rys.4.5.1a) tworzy zbiór punktów (w ilości parametr „count” dla pierwszej serii w kierunku „x” razy parametr „count” dla drugiej serii w kierunku „y”; tu 12x12) oddalonych od siebie o zadaną odległość (parametr „step”). Zadając w obu kierunkach dwuwymiarowej przestrzeni tą samą ilość punktów oraz tą samą odległość między nimi, uzyskano równomiernie usytuowane punkty na planie kwadratu.

W następnym kroku, w każdym punkcie umieszczono kwadrat. W przestrzeni płaskiej, w której zlokalizowano powyższy zbiór kwadratów umieszczono dowolną, przykładową krzywą. Dla każdego środka kwadratu obliczono odległość od najbliższego punktu na zadanej krzywej, oraz na taką odległość (tu pomnożoną przez zadany parametr „B”=0.250) wyniesiono każdy z kwadratów, generując prostopadłościany.

Wysokość każdego w prostopadłościanów zależy tym samym od odległości od zadanej krzywej.

¹¹ <https://www.museumportal-berlin.de/> 03.2022

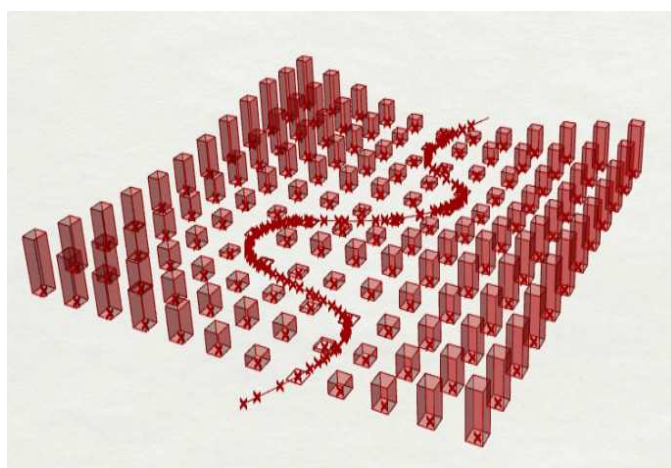


**Rys.4.5.1a:**

Algorytm postępowania przy generowaniu zbioru prostopadłościanów o zróżnicowanej wysokości, uzależnionej od odległości od zadanej krzywej

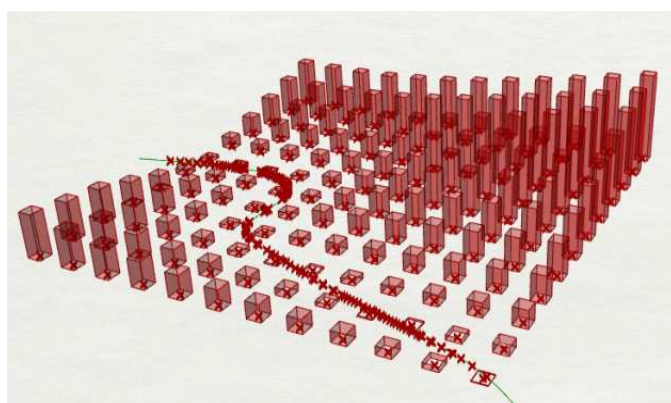
źródło: własne

Poniższe grafiki obrazują działanie algorytmu dla zadanych (rysowanych odręcznie, swobodnie) dwóch różnych krzywych. Podczas zmiany geometrii krzywej, algorytm automatycznie przelicza odległości środków prostokątów od najbliższego punktu krzywej i tworzy prostopadłościany o wysokości h , będącej wynikiem określonej na podstawie tej odległości funkcji.

**Rys.4.5.1b:**

Efekt wizualny działania algorytmu generowania zbioru prostopadłościanów o zróżnicowanej wysokości, uzależnionej od odległości od zadanej krzywej

źródło: własne

**Rys.4.5.1c:**

Efekt wizualny działania algorytmu generowania zbioru prostopadłościanów o zróżnicowanej wysokości, uzależnionej od odległości od zadanej krzywej

źródło: własne

4.5.2. Generowanie wyniesienia zbioru form na podstawie bitmapy

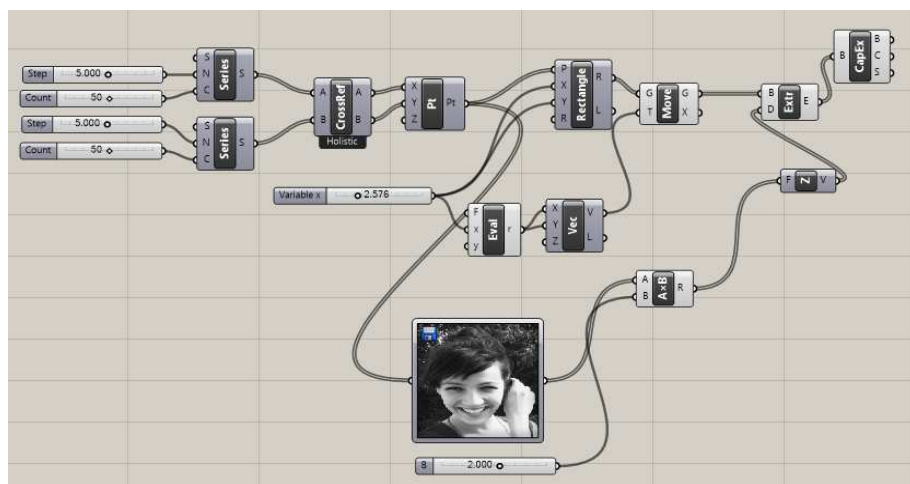
Kolejnym zadaniem były próby uzyskiwania analogicznego do powyższych zbioru prostopadłościów o zróżnicowanej wysokości, tym razem na podstawie nakładania na cały ich dwuwymiarowy zakres przestrzenny czarno-białej płaskiej bitmapy, która wykorzystuje gradient szarości do wynoszenia w górę odpowiadających danej lokalizacji na bitmapie form (Rys.4.5.2a).

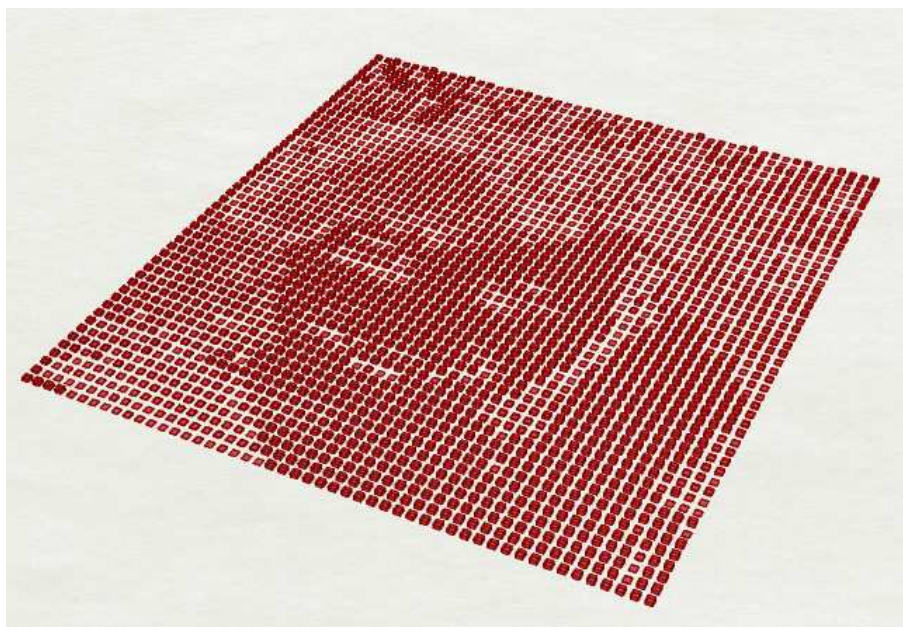
Pracując na utworzonym w poprzednim zadaniu zbiorze kwadratów, dla uzyskania wyraźniejszego efektu zwiększono ich ilość do 50x50. Z zagadnienia usunięto krzywą, aby w inny sposób wytworzyć zbiór docelowych prostopadłościów.

Na cały zakres przestrzeni dwuwymiarowej zawierającej kwadraty nałożono czarno-szaro-białą, płaską przykładową bitmapę. Wielkość wyniesienia dla każdego z uzyskanych prostopadłościów jest zdwojoną wartością odpowiadającą skali szarości bitmapy. W miejscach najjaśniejszych są one najwyższe, a w najciemniejszych najniższe (Rys.4.5.2b).

Rys.4.5.2a:
Algorytm postępowania przy wynoszeniu zbioru form na podstawie bitmapy

źródło: własne





Rys.4.5.2b:
Efekty graficzne
uzyskane przy
wynoszeniu zbioru
form na podstawie
bitmapy

źródło: własne

4.6. Obłe elewacje modułowe

Projekt obejmuje podział dowolnej obłej przestrzennej powierzchni na zadaną ilość podpowierzchni i zlokalizowanie w każdej z nich dowolnego elementu tak, aby był zorientowany zgodnie z kierunkiem wektora normalnego do danej podpowierzchni¹² (Rys.4.6a). Efekty wizualne dla przykładowej obłej powierzchni przestrzennej trójwymiarowej ukazano przy pomocy wypełnienia jej za pomocą kul i stożków (Rys.4.6b).

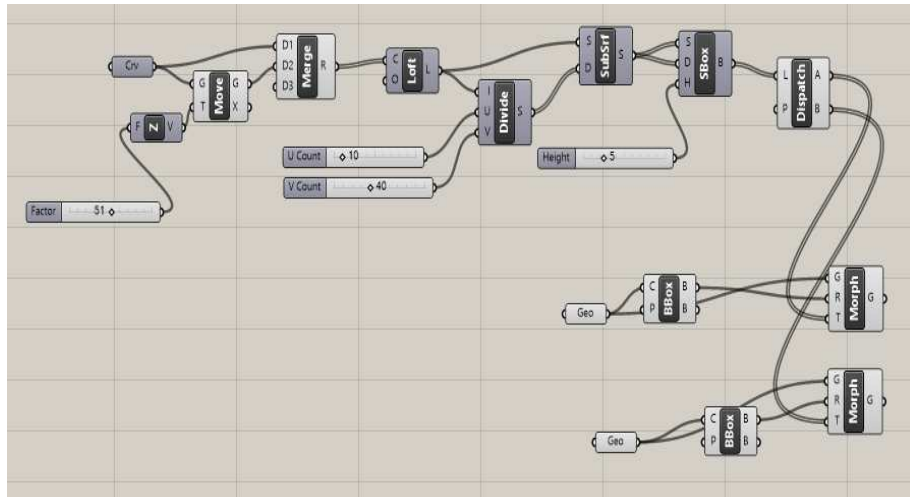
Analogiczny algorytm wykorzystano przy pracy nad projektem konkursowym *Centum Plaza*, gdzie dla konkretnych powierzchni elewacyjnych opracowano optymalne moduły ich architektonicznej kompozycji i rozlokowano w odpowiednio wskazanych miejscach.

¹² Gabriele Rinchi, Tutorial Grasshopper facade roof 1, dostęp: youtube.com 03.2022



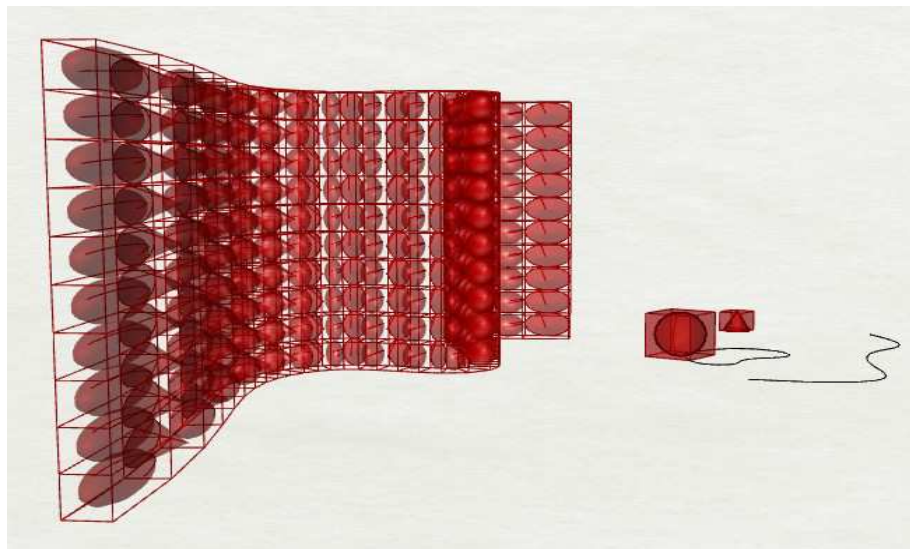
Rys.4.6a:
Procedura postępowania przy podziale fragmentu przestrzeni trójwymiarowej i wypełnianiu jej zadanymi figurami geometrycznymi

źródło: własne



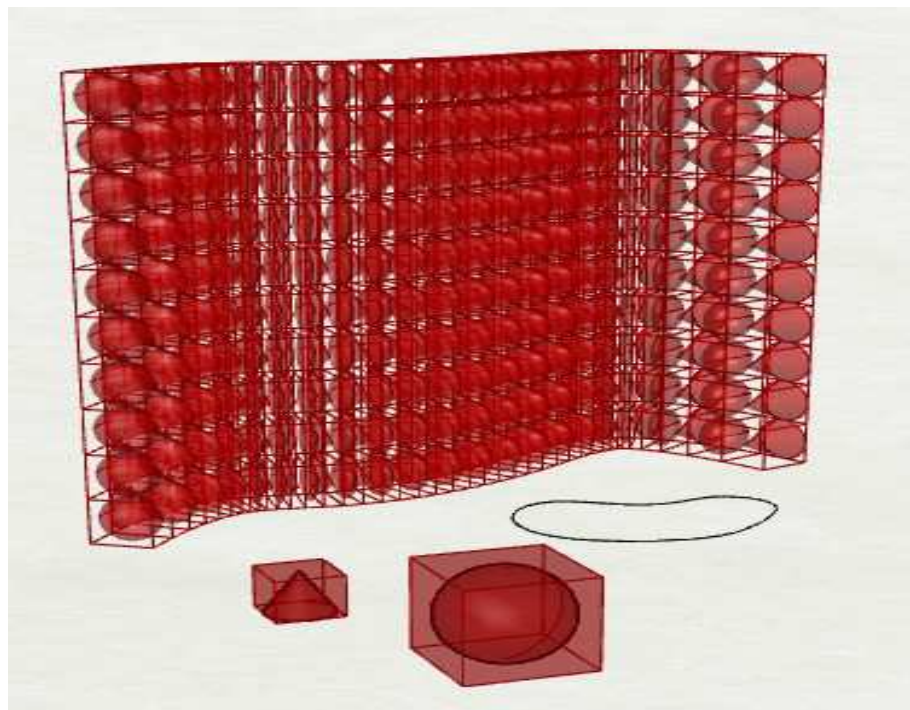
Rys.4.6b:
Efekty wizualne dla przykładowej obłej powierzchni przestrzennej trójwymiarowej ukazano przy pomocy wypełnienia jej za pomocą kul i stożków

źródło: własne



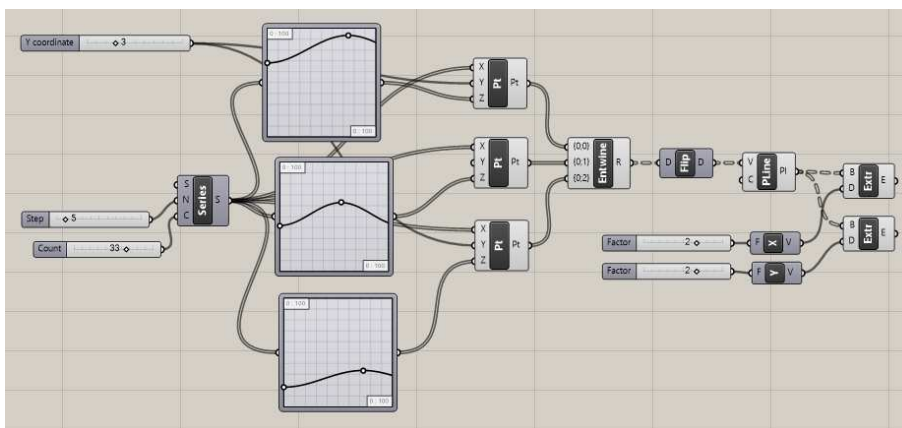
Rys.4.6c:
Efekty wizualne dla przykładowej obłej powierzchni przestrzennej trójwymiarowej ukazano przy pomocy wypełnienia jej za pomocą kul i stożków

źródło: własne



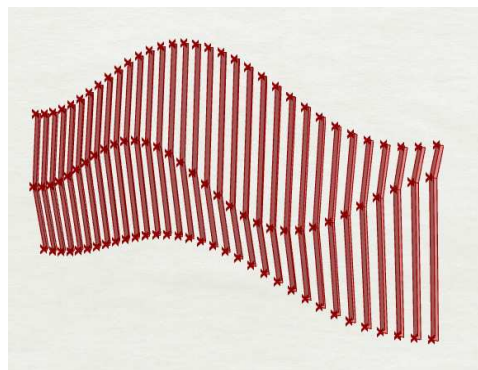
4.7. Krzywoliniowe systemy elewacyjne przy użyciu mapowania wykresem i odwróconych macierzy danych

Algorytm tworzy formę przestrzenną (możliwy system fasadowy) generując 3 serie punktów za pomocą określonych funkcji (mapowanie grafowe, mapowanie wykresem). Następnie odwraca macierz otrzymanych punktów w przestrzeni trójwymiarowej w celu możliwości połączenia ze sobą n-tego punktu z każdej z 3 serii¹³.



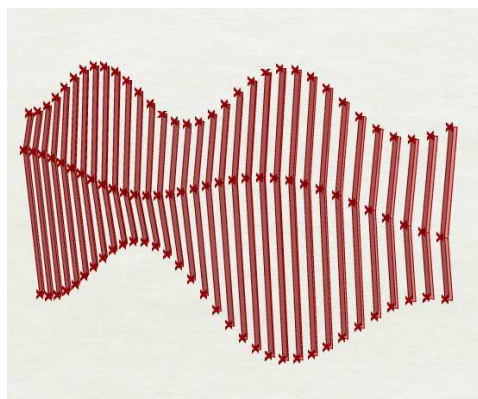
Rys.4.7a: Procedura postępowania przy krzywoliniowych systemach elewacyjnych przy użyciu mapowania grafowego i odwróconych macierzy danych

źródło: własne



Rys.4.7b: Uzyskane efekty graficzne dla krzywoliniowych systemów elewacyjnych przy użyciu mapowania grafowego i odwróconych macierzy danych

źródło: własne



Rys.4.7c: Uzyskane efekty graficzne dla krzywoliniowych systemów elewacyjnych przy użyciu mapowania grafowego i odwróconych macierzy danych

źródło: własne;

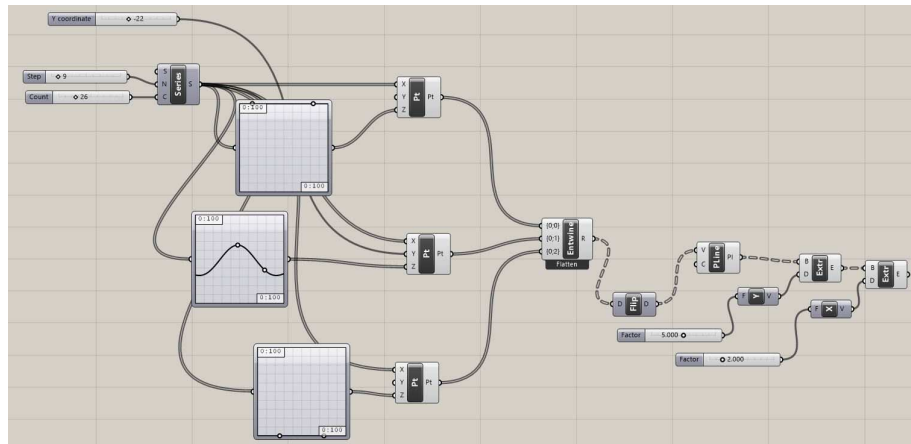
¹³ Opracowane na podstawie problemu projektowego Studia EvolveLAB, *Push Grasshopper geometry into Revit*, dostęp youtube.com 03.2022



Edycja parametrów oraz krzywych na wykresach odpowiedzialnych za rozlokowanie w przestrzeni kolejnych punktów początkowych, pośrednich i końcowych dla serii powtórzeń formy podstawowej (Rys.4.7a, 4.7d) pomaga uzyskać różnorodne efekty (Rys.4.7b,c).

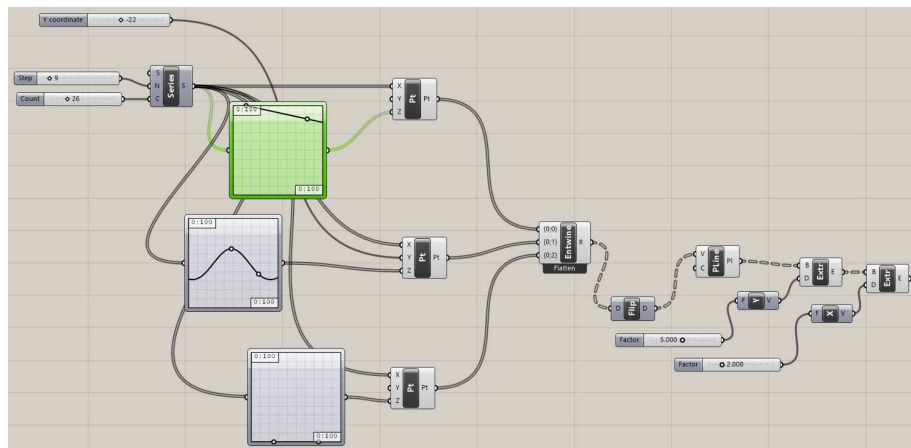
Rys.4.7d:
Edycja wykresów przy krzywoliniowych systemach elewacyjnych przy użyciu mapowania grafowego i odwróconych macierzy danych

źródło: własne;

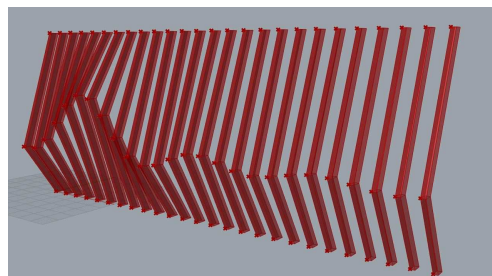


Rys.4.7e:
Uzyskane efekty graficzne dla wypłaszczenia krzywych odpowiedzialnych za rozlokowanie punktów początkowych i końcowych formy podstawowej

źródło: własne

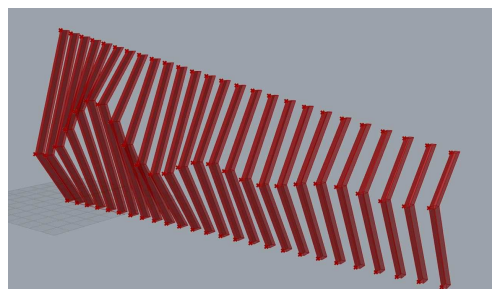


Rys.4.7f:
Edycja wykresów przy krzywoliniowych systemach elewacyjnych
źródło: własne

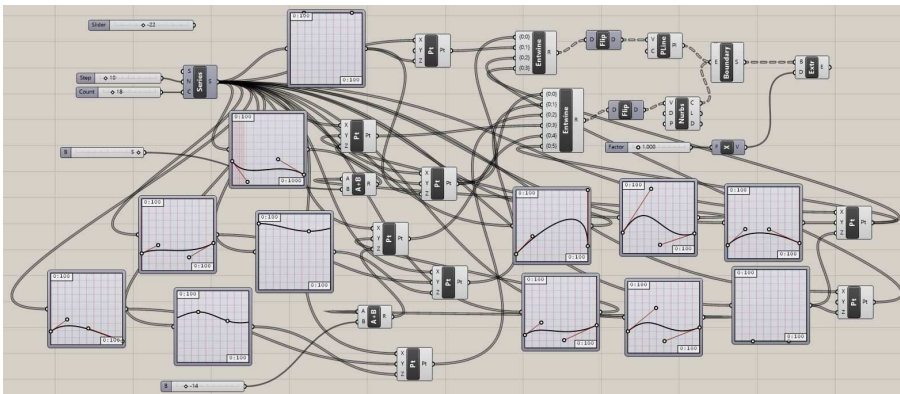


Rys.4.7g:
Uzyskane efekty graficzne przy skosie prostoliniowym dla punktów początkowych formy podstawowej

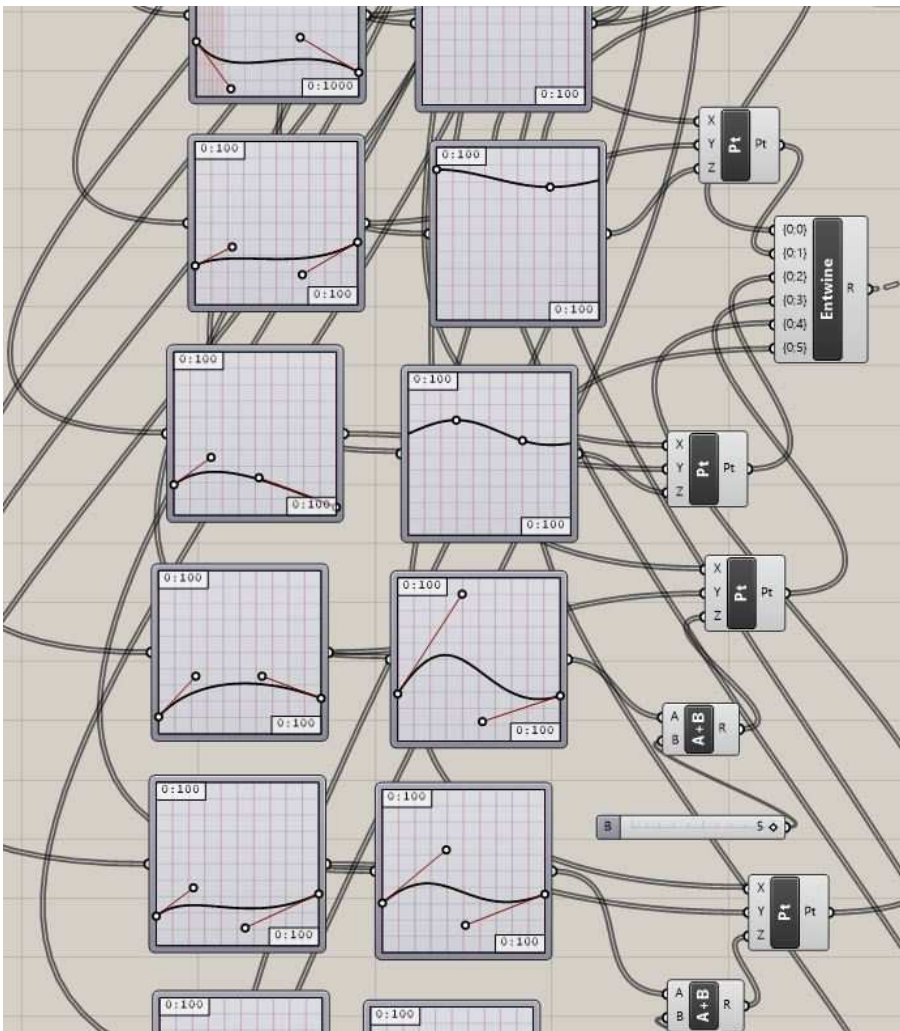
źródło: własne



W kolejny kroku skonstruowano bardziej zaawansowany, jednak opierający się na analogicznej zasadzie jak w poprzednim przypadku, algorytm tworzący obte formy elewacyjne. W tym przypadku znacznie zwiększono ilość punktów przegięcia, z których interpolacji uzyskano krzywe.



Rys.4.7h: Procedura postępowania przy krzywoliniowych systemach elewacyjnych przy użyciu mapowania grafowego i odwróconych macierzy danych dla większej ilości punktów przegięcia interpolacji krzywych



źródło: własne

Rys.4.7i: Zbliżenie na wykresy rozlokowujące kolejne punkty przegięcia dla opisywanego algorytmu

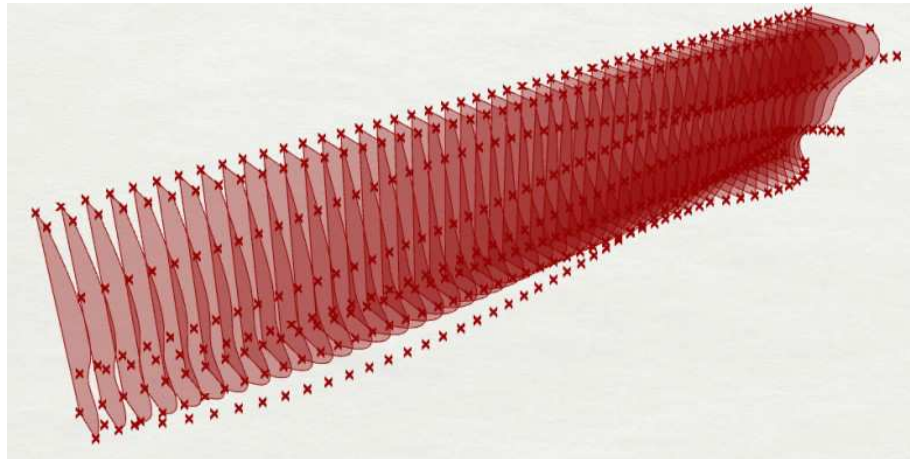
źródło: własne



Efekty działania powyższego skryptu ilustrują poniższe grafiki. Krzyżkami oznaczono punkty. Dla krzywych są to punkty wykorzystywane przy interpolacji.

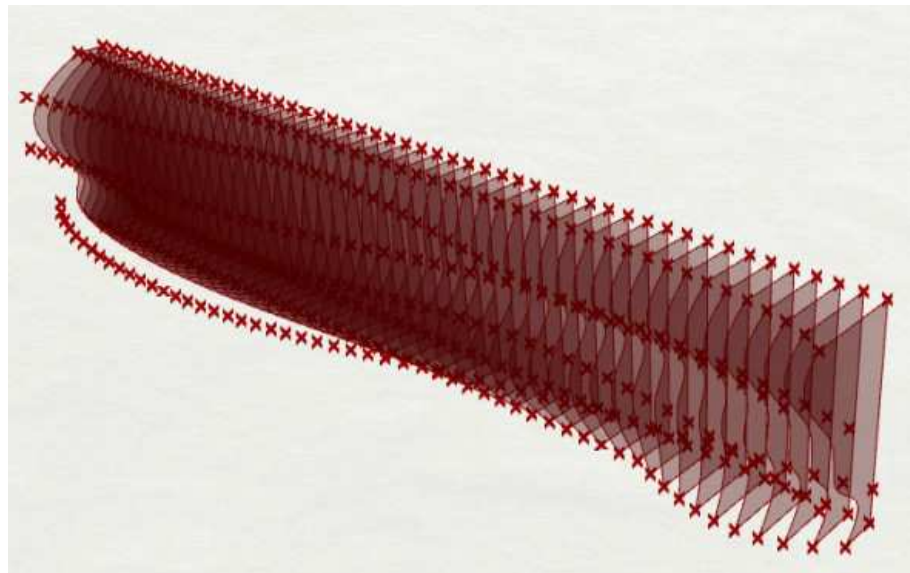
Rys.4.7j:
Uzyskane efekty graficzne dla krzywoliniowych systemów elewacyjnych dla zwiększonej ilości punktów użytych do interpolacji krzywych frontowych

źródło: własne



Rys.4.7k:
Uzyskane efekty graficzne dla krzywoliniowych systemów elewacyjnych dla zwiększonej ilości punktów użytych do interpolacji krzywych frontowych

źródło: własne



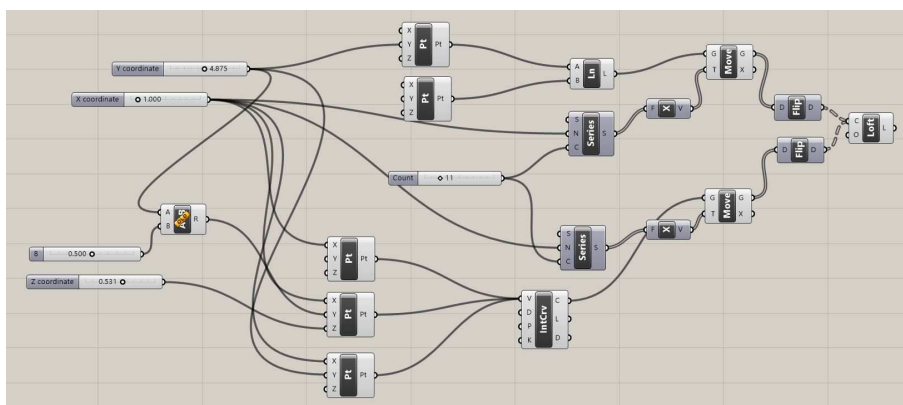
4.8. Zróżnicowane paraboliczne serie powierzchni przestrzennych na bazie prostej i łuku

Kolejny eksperyment polega na wygenerowaniu serii powierzchni przestrzennych na bazie prostej i łuku tak, aby zróżnicować parabolicznie wysokość najwyższego punktu każdego łuku, w zależności od jego odległości od danego punktu¹⁴.

¹⁴ Opracowany algorytm opiera się na problemie projektowym autorstwa Emerjestudio, *Grasshopper Tutorial: Variable Facade Openings*, dostęp youtube.com 03.2022



W pierwszym kroku tworzona jest forma podstawowa, którą będziemy powtarzać i każdą edytować o odmiennie wartości zadanej funkcji. Na osi Y formujemy linię prostą (o sparametryzowanej długości y), a w zadanej odległości (parametr x), w płaszczyźnie równoległej do płaszczyzny definiowanej przez oś Y i Z układu współrzędnych, generujemy krzywą za pomocą interpolacji zadanych trzech punktów. Pierwszy z tych punktów stanowi wartość $(x,0,0)$ na osi X, końcowy stanowi punkt o współrzędnych $(x,y,0)$, a pomiędzy umieszczamy punkt (x,y,z) – wysokość najwyższego punktu krzywej.



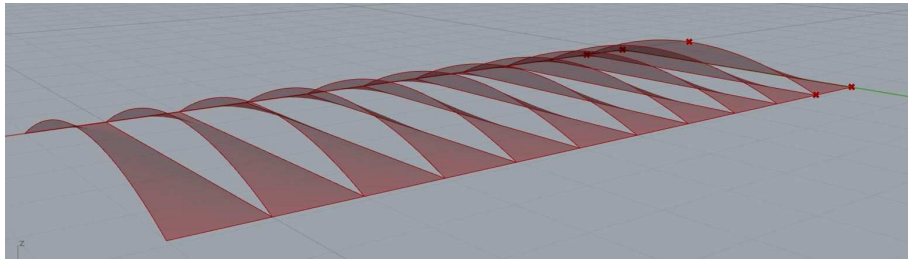
Rys.4.8a: Zapis matematyczny serii przemieszczeń dla prostej i krzywej o powiązanych danych wejściowych (x,y,z) i utworzenie z nich powierzchni w przestrzeni 3d

źródło: własne

Następnie tworzymy serię przemieszczeń w kierunku osi X, zarówno dla linii, jak i dla krzywej, o równą ilość powtórzeń. W celu umożliwienia wygenerowania z powyższych powierzchni w przestrzeni trójwymiarowej, należy odwrócić macierze danych dla linii i dla krzywej (zamienić rzędy z kolumnami macierzy). Zapis matematyczny dotychczasowych zabiegów przedstawia powyższy skrypt (Rys. 4.8a), a jego efekt graficzny przedstawiono poniżej (Rys. 4.8b).

Rys.4.8b:

Efekt graficzny serii przemieszczeń dla prostej i krzywej o powiązanych danych wejściowych (x,y,z) i utworzenie z nich powierzchni w przestrzeni 3d

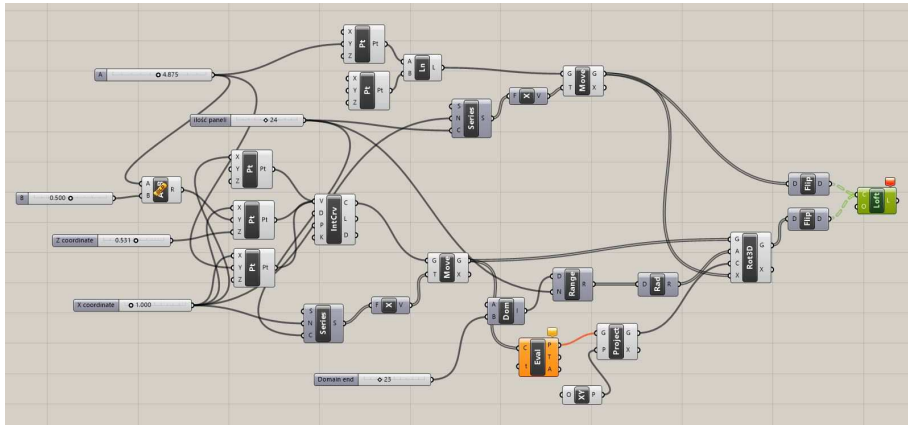


źródło: własne

W kolejnym kroku podjęto dwie próby. Pierwsza polega na zebraniu współrzędnych dla najwyższych punktów krzywych, dla każdej serii powtórzeń ich przemieszczeń i edytowaniu wartości x według wzoru na parabolę w trójwymiarze. Druga próba, polega na rozszerzeniu pierwszej również o edycję parametru x, dla każdego „panela” podstawowego w serii.

Rys.4.8c:

Zapis matematyczny przy wykorzystaniu macierzy współrzędnych dla zróżnicowania parabolicznego najwyższego punktu serii krzywych przy edycji współrzędnych x i z

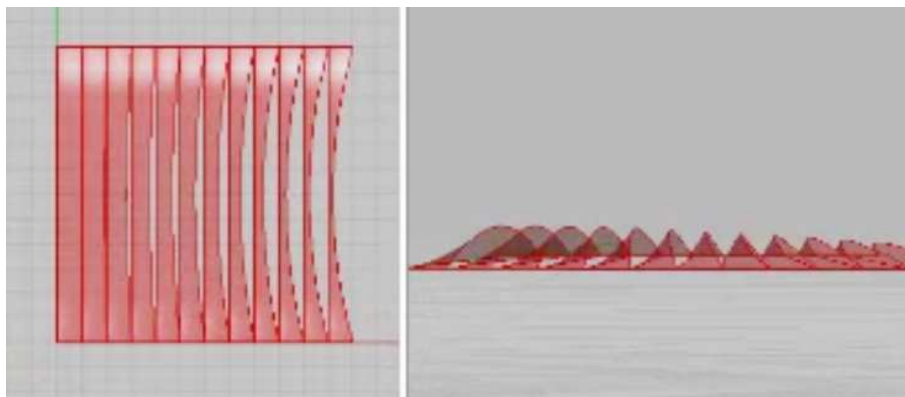


źródło: własne

Powstała forma, która może pełnić rolę rozwiązania elewacyjnego lub świetlika dachowego, stanowi odpowiedź na hipotetyczne dostosowanie formy do zadanych warunków, np. w korelacji ze źródłem wiania wiatrów lub dostosowaniem do kierunku padania promieni słonecznych. W szerszym kontekście, taki sposób myślenia odnosi się do obserwacji form zastanych w przyrodzie (np. roślin) i ich dostosowywania się do zastanego środowiska naturalnego.

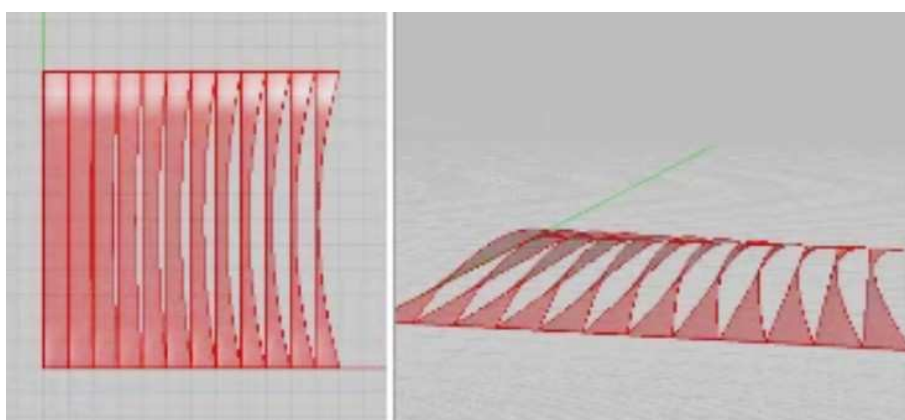


Na analogicznej zasadzie działają algorytmy, w których geometryczna forma dąży do punktu zbiegu, jak opisano to w rozdziale *CoDeFa*, w części dotyczącej współczesnej cyfrowej interpretacji fasady z gontów.



Rys.4.8d:
Efekt graficzny wykorzystywania macierzy współrzędnych dla zróżnicowania parabolicznego najwyższego punktu serii krzywych przy edycji współrzędnych x i z

źródło: własne



Rys.4.8e:
Efekt graficzny wykorzystywania macierzy współrzędnych dla zróżnicowania parabolicznego najwyższego punktu serii krzywych przy edycji współrzędnych x i z

źródło: własne



5. ZASTOSOWANIE METOD MATEMATYCZNYCH W PROCESIE PROJEKTOWANIA NA PRZYKŁADZIE KONCEPCJI KONKURSOWEJ CENTUM PLAZA

Poniższe studium przypadku koncentruje się na projekcie „Centum Plaza” - koncepcji konkursowej zaprojektowanej w 2020 roku przez konsorcjum firm Arup Polska, Roark Studio i Designbotic. Konkurs został zorganizowany przez Allcon Osiedla w Gdyni. W skład zespołu projektowego wchodził: Jakub Bladowski, Marcin Hennig, Kacper Radziszewski, Krzysztof Pietras, Marta Mokrzycka, Martyna Ferlin, Paulina Lehmann, Anna Czech.

5.1. Wytyczne projektowe | Idea projektowa

Przedmiot konkursu

Przedmiotem konkursu było stworzenie koncepcji architektoniczno-urbanistycznej dla zespołu zabudowy mieszkaniowej oraz biurowej z usługami towarzyszącymi w obszarze zbiegu ulic Kieleckiej i Drogi Gdyńskiej w Gdyni.

Cel konkursu

Celem konkursu było wyłonienie pracy, która spełni szereg wymagań narzucanych w miejscowym planie zagospodarowania przestrzennego oraz pod względem architektonicznym, funkcjonalnym i eksploatacyjnym najkorzystniej odniesie się do wytycznych organizatora. Wybrana praca miała stanowić rzetelną podstawę do zlecenia opracowania wielobranżowego projektu budowlanego i wykonawczego przy realizacji inwestycji.

Oczekiwano unikatowej, rozpoznawalnej w północnej Polsce zabudowy, oraz podkreślano chęć osiągnięcia



5.2 | CENTUM PLAZA

prestżowego jej charakteru. Wedle zapisów miejscowego planu zagospodarowania przestrzennego dla terenu inwestycji, zespół planistów zdecydował, że aby można było usytuować w omawianej lokalizacji dominantę wysokościową, należy rozpisać konkurs architektoniczny.

Kryteria oceny prac konkursowych

Najwyżej ocenianymi kryteriami w procedurze wyłaniania zwycięskiej koncepcji były walory architektoniczno-urbanistyczne, funkcjonalność i ekonomia przyjętych rozwiązań. W kontekście pierwszego kryterium oczekiwano nowatorskiego podejścia do wyrazu architektonicznego, atrakcyjnego wyrazu urbanistycznego przestrzeni kompleksu, czytelności i estetyki, pomysłowości.

Pod kątem ekonomii narzucono optymalizacyjne podejście pod względem rozwiązań funkcjonalno-przestrzennych, konstrukcyjnych, technologicznych, materiałowych, walorów eksploatacyjnych oraz efektywność współczynników stosunku powierzchni użytkowej mieszkalnej lub usługowej (PUM lub PUU), powierzchni użytkowej biurowej (GLA) do powierzchni całkowitej oraz do powierzchni użytkowej netto całego obiektu.

Funkcjonalność obejmowała realizację wytycznych i założeń programowo-przestrzennych, optymalne rozwiązania części mieszkaniowej, realizację zadanej struktury mieszkań, minimalizację komunikacji pionowej i tej w obrębie mieszkań, atrakcyjne rozmieszczenie

jednostek mieszkalnych względem stron świata oraz widoków na Zatokę Gdańską, port, las witomiński i miasto. Ponadto oczekiwano elastyczności w tworzeniu części biurowej, przy małych i dużych powierzchniach pod wynajem.

Idea projektowa

Ze względu na prestiżową lokalizację, konkurs zyskał uwagę znaczących międzynarodowych pracowni architektonicznych. W przypadku przedstawianej koncepcji, znaczną część zespołu projektowego stanowili Gdynianie, co pomogło wykreować myśl przewodnią projektu, aby na stulecie miasta zaproponować koncepcję kładącą nacisk na miejsce oddające ducha awangardowego, silnie rozwijającego się miasta. Jako współczesne stadium awangardy w projektowaniu określono zastosowanie metod matematycznych w celu podniesienia jakości projektu w kontekście ekologicznego podejścia, przyjazności dla mieszkańców i użytkowników przestrzeni oraz odniesienia do struktury miasta.

Sama architektura miała być odważna, miała odzwierciedlać postęp technologiczny zauważalny w mieście, a zarazem miała nawiązywać do tradycji „miasta z morza i marzeń”.

Reagując na zmiany klimatyczne na świecie, w celu ograniczenia negatywnego wpływu na środowisko naturalne, postawiono na projektowanie zrównoważone, skupiając się na zwiększeniu żywotności zabudowy oraz zadbanie o komfort użytkowników przestrzeni.

Wizualizacje konkursowe przedstawiono na poniższych grafikach (Rys.5.1a,b,c).



5.4 | CENTUM PLAZA



Rys.5.1a:
Wizualizacja
koncepcji konkursowej
Centum Plaza

źródło:
Roark Studio



Rys.5.1b,c:
Wizualizacje
koncepcji konkursowej
Centum Plaza

źródło:
Roark Studio



5.2. Proces projektowy, a słońce – komfort użytkowania przestrzeni.

Układ urbanistyczny został w dużej mierze zdeterminowany poprzez określenie zapotrzebowania na dostępność do promieni słonecznych, zarówno w przestrzeniach publicznych i półpublicznych zewnętrznych, jak i na elewacjach projektowanych form przestrzennych.

Analizie poddano reakcję na światło słoneczne zarówno dla zabudowy sąsiedniej, występującej w obszarze oddziaływania zamierzenia budowlanego (w szczególności dominanty wysokościowej), jak i projektowane przestrzenie, w zależności od ich przeznaczenia funkcjonalnego. Pod uwagę wzięto zarówno potrzebę dostępności światła dziennego, jak i zapobieganie nadmiernemu przegrzewaniu się pomieszczeń.

5.2.1. Nastonecznienie

Zapewnienie wymaganego czasu nastonecznienia dla pokoi mieszkalnych

Na potrzeby wykazania spełnienia wymogów płynących z warunków technicznych jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie, zarówno dla zabudowy sąsiadującej o funkcji mieszkaniowej, (znajdującej się w obszarze oddziaływania projektowanej zabudowy), jak i dla nowo projektowanych części mieszkalnych, wykonano szczegółową analizę nastonecznienia kompleksu zabudowy w dniach równonocy (Rys.5.2.1c,d,e).

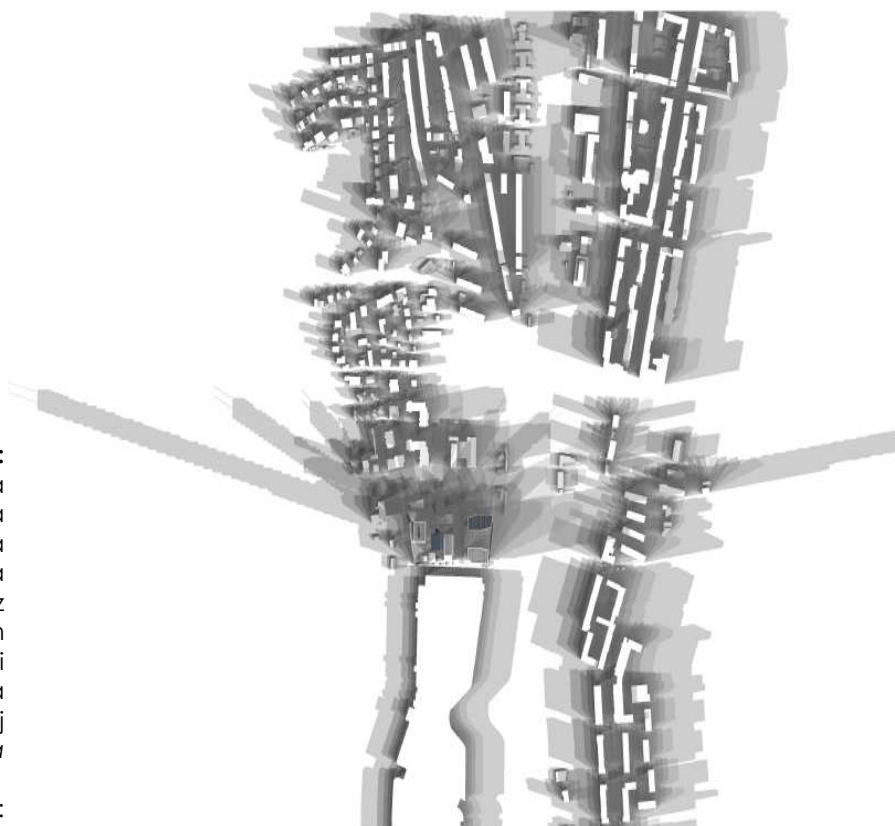


5.6 | CENTUM PLAZA

Jej znacznie dokładniejsze efekty zestawiono i porównano z również opracowaną na potrzeby konkursu tradycyjną dwuwymiarową „linijką słońca” (Rys.5.2.1a,b).

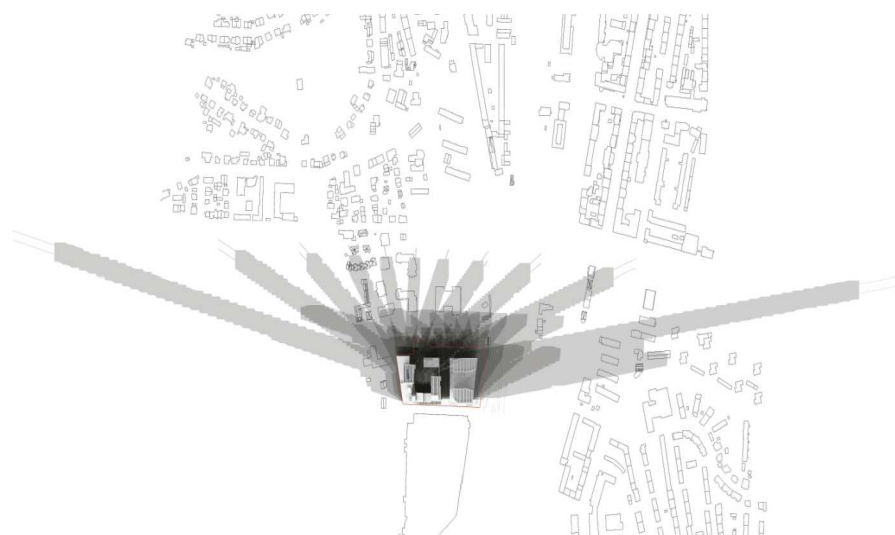
Rys.5.2.1a:
Dwuwymiarowa tradycyjna linijka słońca opracowana na potrzeby określenia nasłonecznienia z uwzględnieniem zabudowy istniejącej i projektowanej dla koncepcji konkursowej *Centum Plaza*

źródło:
Roark Studio



Rys.5.2.1b:
Dwuwymiarowa tradycyjna linijka słońca opracowana na potrzeby określenia nasłonecznienia wyłącznie dla zabudowy nowo projektowanej dla koncepcji konkursowej *Centum Plaza*

źródło:
Roark Studio



Do tego celu wykorzystano metodologię Building Information Modelling, opierającą się na pracy na modelach trójwymiarowych. Symulacja komputerowa tej analizy nasłonecznienia (Rys.5.2.1c,d,e) obliczała ilość godzin bezpośredniego nasłonecznienia fasad z dokładnością do 0,5 metra kwadratowego. Proces ten udało się zredukować do 7-10-dniowych iteracji dla kolejnych wstępnych układów urbanistycznych, dzięki przygotowaniu odpowiednich metod wymiany danych. Ten sam model pracy przyjęto dla obliczeń czasu bezpośredniego nasłonecznienia dla przestrzeni pomiędzy budynkami.



Rys.5.2.1c:
Efekty graficzne wykorzystania metodologii Building Information Modelling w badaniu nasłonecznienia w obszarze zabudowy sąsiadującej, znajdującej się w obszarze oddziaływania inwestycji dla koncepcji konkursowej Centum Plaza

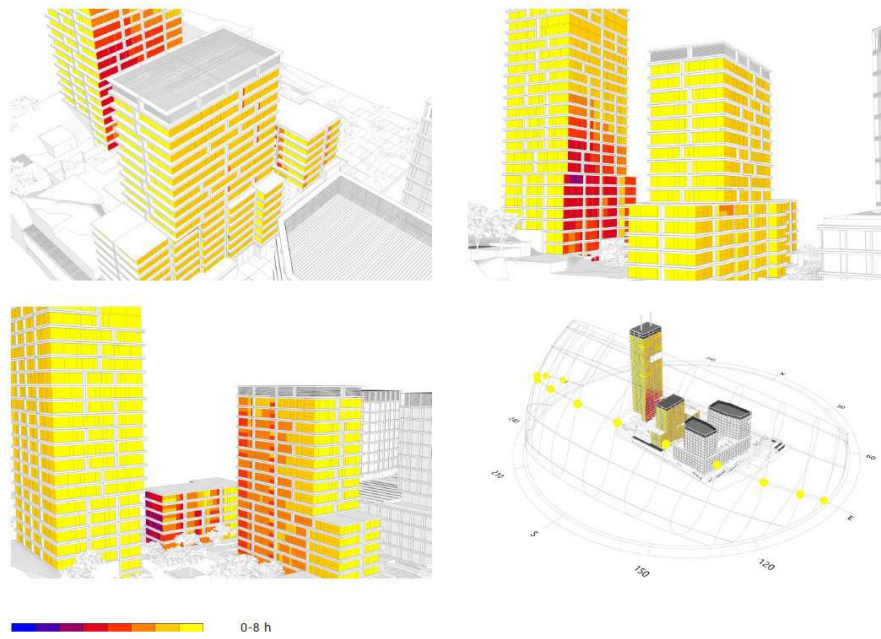
źródło:
Designbotic



5.8 | CENTUM PLAZA

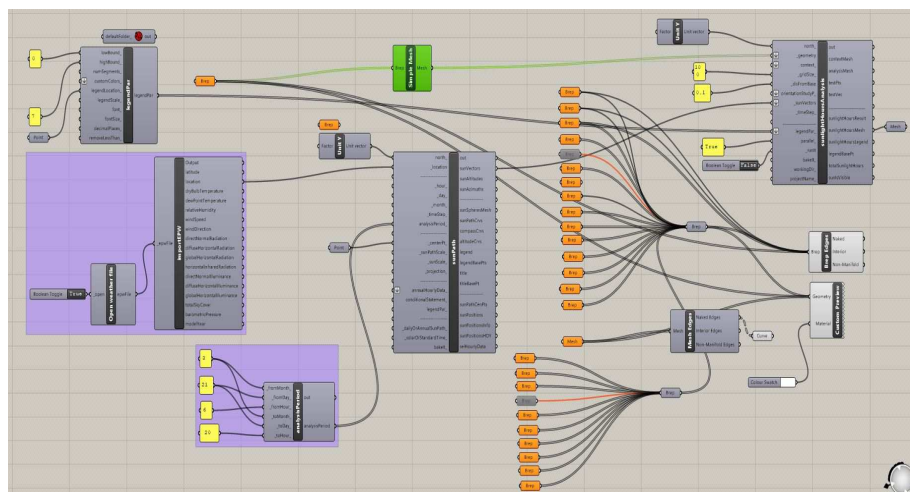
Rys.5.2.1d:
Efekty graficzne wykorzystania metodologii Building Information Modelling w badaniu nasłonecznienia dla projektowanych pokoi mieszkalnych dla koncepcji konkursowej Centum Plaza

źródło:
Designbotic



Rys.5.2.1e:
Graficzne przedstawienie algorytmu procedur przy symulacji nasłonecznienia i radiacji użyte w projekcie konkursowym Centum Plaza

źródło:
Designbotic



5.2.2. Radiacja

Analizie za pomocą skryptów matematycznych poddano również radiację, czyli zyski ciepła z promieniowania słonecznego (Rys.5.2.2a). Celem symulacji była maksymalizacja pasywnych zysków energii. Dokładność analiz (do obszarów o powierzchni 10cm^2) dla wybranych fragmentów powierzchni elewacji ukazała diametralne różnice przy stosunkowo niewielkich zabiegach elewacyjnych.



Rys.5.2.2a:
Efekty graficzne wykorzystania metodologii Building Information Modelling w badaniu radiacji dla koncepcji konkursowej Centum Plaza

źródło:
Designbotic

Przestrzenie półpubliczne zewnętrzne | radiacja

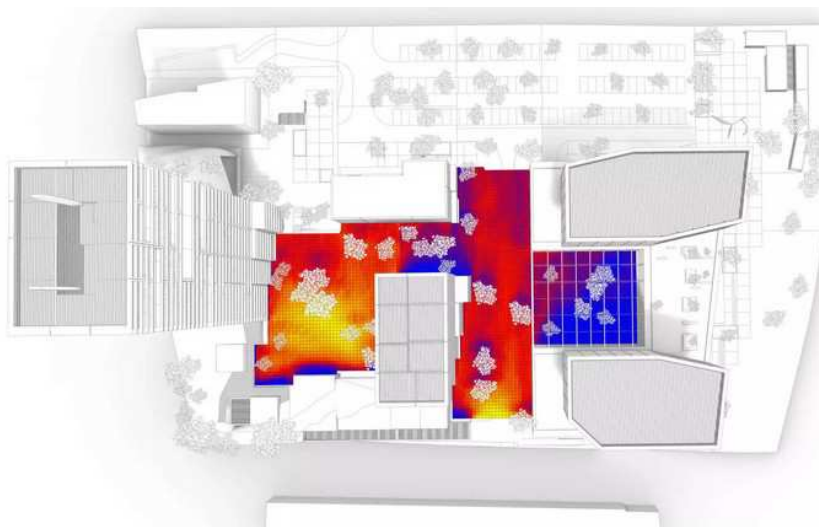
Wpływ ukształtowania projektowanych brył na ilość godzin oraz konkretne pory nasłonecznienia danych przestrzeni zewnętrznych w ciągu roku okazał się kolejnym istotnym argumentem przy podejmowaniu decyzji urbanistycznych (Rys.5.2.2b).

Ponadto po analizie ilości energii padającej na przestrzenie publiczne i półpubliczne założenia

5.10 | CENTUM PLAZA

zdecydowano się na maksymalizację współczynnika odbicia światła, aby eliminować wyspy ciepła.

Rys.5.2.2b:
Efekty graficzne wykorzystania metodologii Building Information Modelling w badaniu radiacji dla przestrzeni półpublicznych w koncepcji konkursowej Centum Plaza



źródło:
Designbotic

5.2.3. Część biurowa | Daylight Factor(DF), Spatial Daylight Autonomy(sDA)

W części biurowej podstawowymi kryteriami związanymi z zapewnieniem pracownikom komfortu wizualnego za pomocą światła dziennego były narzucone przez certyfikację (BREEAM oraz WELL) analizy Daylight Factor (DF)(Rys.5.2.3a) oraz Spatial Daylight Autonomy (sDA) (Rys.5.2.3b). Analizy należało przeprowadzać każdorazowo na nowo po edycji formy. W przedstawianym przypadku bardziej problematyczne okazało się nie tyle spełnienie minimalnych współczynników, ale minimalizacja przestrzeni, która ze względu na dostęp do słońca stwarzała niekorzystne warunki pod kątem zbyt intensywnego natężenia światła dziennego.

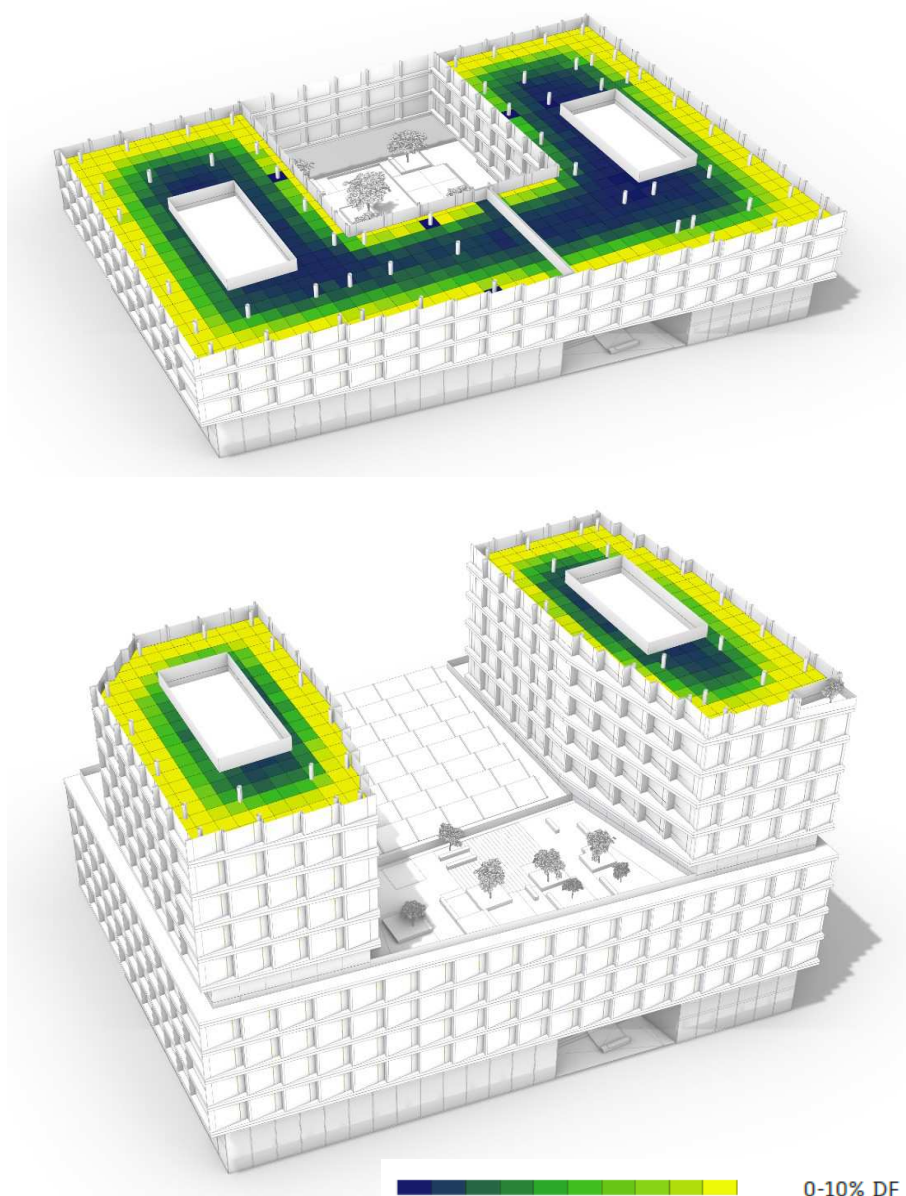
Wnioski z powyższego stanowiły nadanie elewacji wyrazu architektonicznego, którego kluczową rolę było



funkcjonalne zabezpieczenie (za pomocą formy i użytych materiałów) przed niedogodnościami z tego płynącymi.

Daylight Factor (DF)

Analiza Daylight Factor (DF) to zbadanie stosunku światła zewnętrznego, do światła wpadającego do pomieszczenia. Certyfikacja Breeam narzuca restrykcje w tej dziedzinie - należy spełnić warunek 2%. Projektowany obiekt w obrębie przestrzeni biurowej uzyskuje wynik średnio 5.5%.



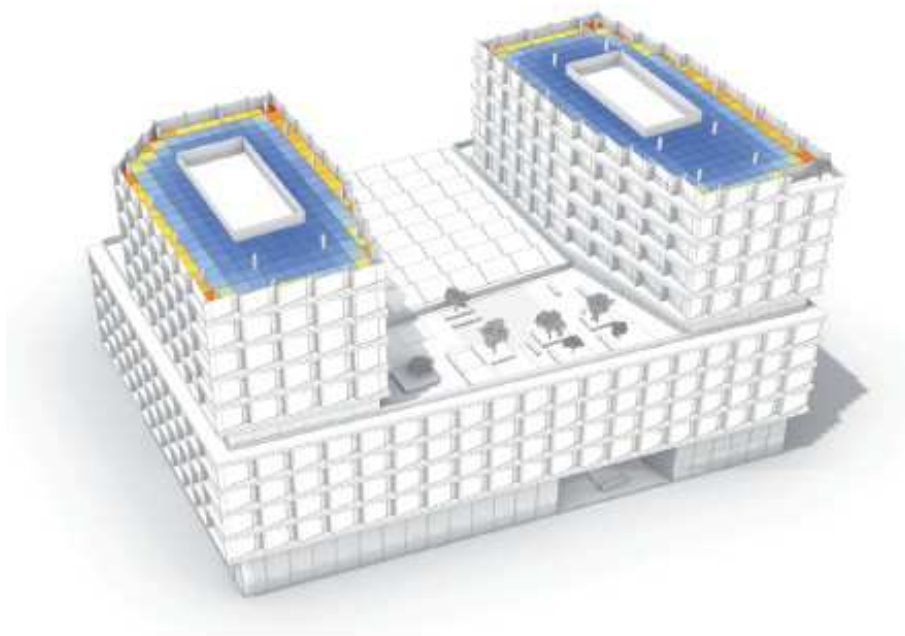
Rys.5.2.3a:
Efekty graficzne wykorzystania analizy Daylight Factor (DF) w obrębie projektowanych przestrzeni biurowych dla koncepcji konkursowej Centum Plaza

źródło:
Designbotic

5.12 | CENTUM PLAZA

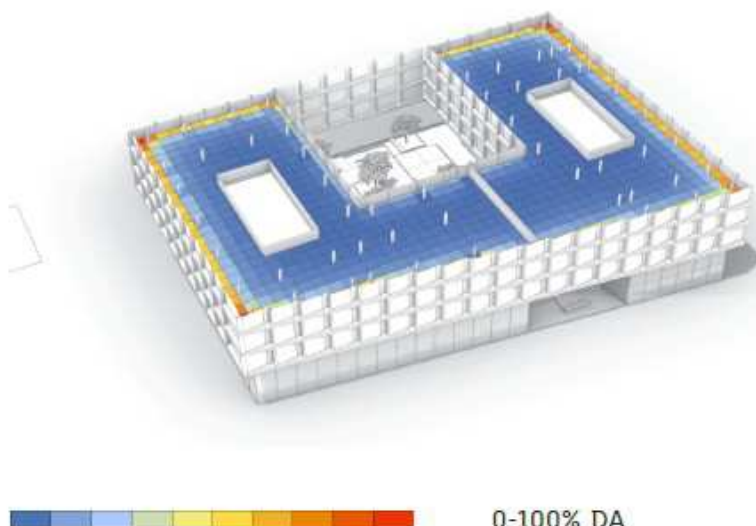
Spatial Daylight Autonomy (sDA)

Wymogiem narzuconym przez certyfikację Breeam jest również mierzona w luxach jakość światła dziennego. Analiza Daylight Autonomy wykazała spełnienie warunku oświetlenia o wartości 300 luxów przez minimum 2000 godzin w ciągu roku dla 86% (przy wymaganych minimum 80%) powierzchni biurowej.



Rys.5.2.3b:
Efekty graficzne wykorzystania analizy Spatial Daylight Autonomy (sDA) w obrębie projektowanych przestrzeni biurowych dla koncepcji konkursowej *Centum Plaza*

źródło:
Designbotic



5.3. Przewietrzanie | *outdoor airflow*

W celu zbadania wpływu ruchu mas powietrza na komfort użytkownika przestrzeni wokół projektowanych brył zastosowano symulacje tunelu aerodynamicznego (Rys.5.3a,b,c).

W klimacie Gdyni, w obrębie założenia projektowego, przy małych odległościach między budynkami i dużych płaszczyznach elewacyjnych można było zaobserwować miejsca szczególnie narażone na silne, nagłe porywy wiatru, jak i wnętrza urbanistyczne generujące ciągły jego przepływ (Rys.5.3d,e,f,g,h). Powyższe może powodować dyskomfort w użytkowaniu przestrzeni, szczególnie w konkretnych porach roku.

W trakcie procesu powstawania układu urbanistycznego trzykrotnie przeprowadzono analizy Computational Fluid Dynamics (CFD), które symulują tunel aerodynamiczny wykreowany w wirtualnym środowisku¹² opartym o model 3d założenia, rzeźby terenu oraz otoczenia (z uwzględnieniem istniejących i nowo projektowanych budynków) w obrębie 500 metrów. Dane pogodowe w postaci pomiarów prędkości wiatrów dostarczone zostały przez stacje meteorologiczne. Kalkulacje wykonano dla czterech dominujących kierunków wiania wiatru.

-
- 1 Hunt J.C.R., 1997, *Lewis Fry Richardson and his contributions to mathematics, meteorology, and models of conflict*. Annual Review of Fluid Mechanics. 30 (1): xiii–xxxvi
 - 2 Gutai M., 2014, *Trans Structures: Fluid Architecture and Liquid Engineering*, Actar Publishers, New York



Obliczeniowa dynamika płynów stanowi gałąź mechaniki płynów z wykorzystaniem analizy numerycznej i struktur danych w celu analizowania i rozwiązywania problemów związanych z przepływami płynów³. Wykonywane obliczenia dotyczą symulacji swobodnego przepływu również w interakcji cieczy i gazów z powierzchniami określonymi przez warunki brzegowe. Pochodną tego procesu są symulacje swobodnego przepływu gazów, przepływy transsoniczne lub turbulentne. Weryfikacja oprogramowania jest przeprowadzana za pomocą użycia aparatury eksperymentalnej, takiej jak tunele aerodynamiczne. CFD stosuje się w szerokim spektrum problemów badawczych i inżynierskich w wielu dziedzinach nauki, jak i w przemyśle – w tym np. w aerodynamice, symulacji pogody, czy nawet w analizie kosmicznej⁴.

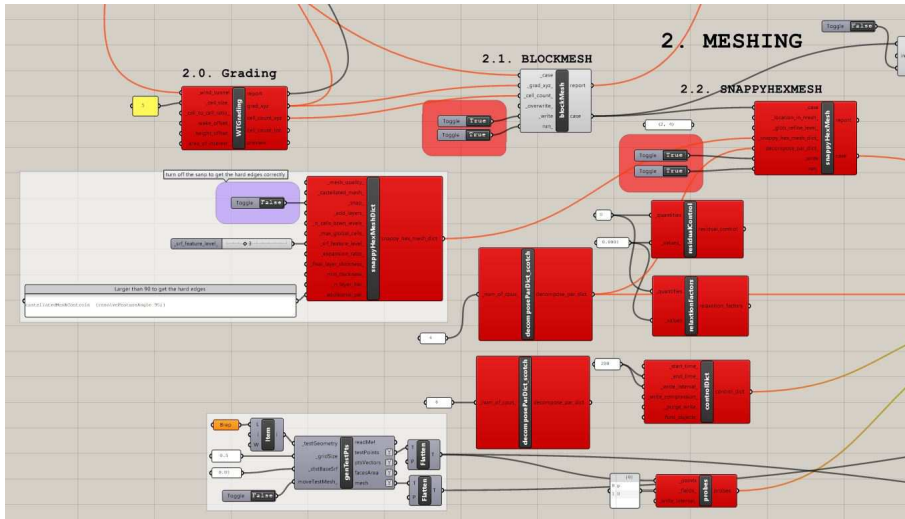
Rezultaty szybko wskazały potencjalne zagrożenia, pozwoliły na ich eliminację (a przynajmniej minimalizację), co wpłynęło na kolejne decyzje projektowe dotyczące układu urbanistycznego założenia, jako że komfort użytkowników przestrzeni znajdował się wysoko na liście priorytetów zespołu projektowego.

Obserwując prędkość wiatru w danych konfiguracjach urbanistycznych zdecydowano się na wybór takiej, która minimalizuje tę wartość w przestrzeniach półpublicznych.

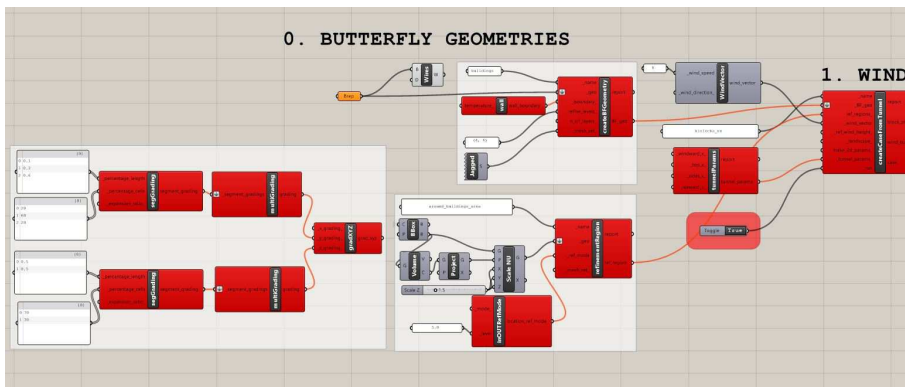
3 Richardson L. F., Chapman S., 1965, *Weather prediction by numerical process*, Dover Publications

4 Ferziger J. H., Peric M., 2002, *Computational methods for fluid dynamics*, Springer-Verlag

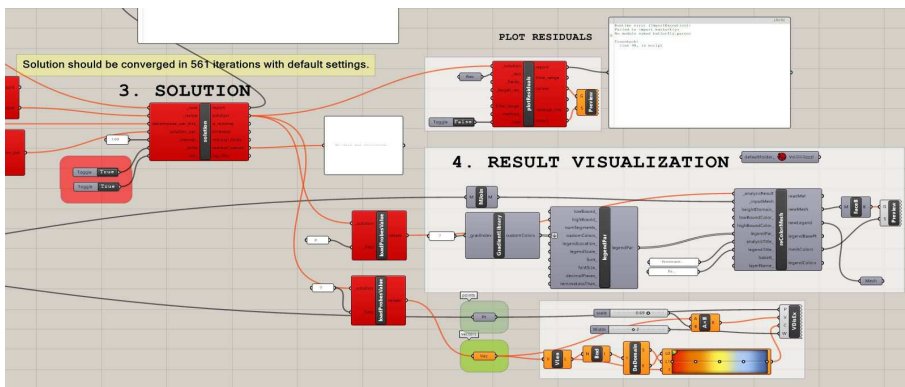




a.



b.



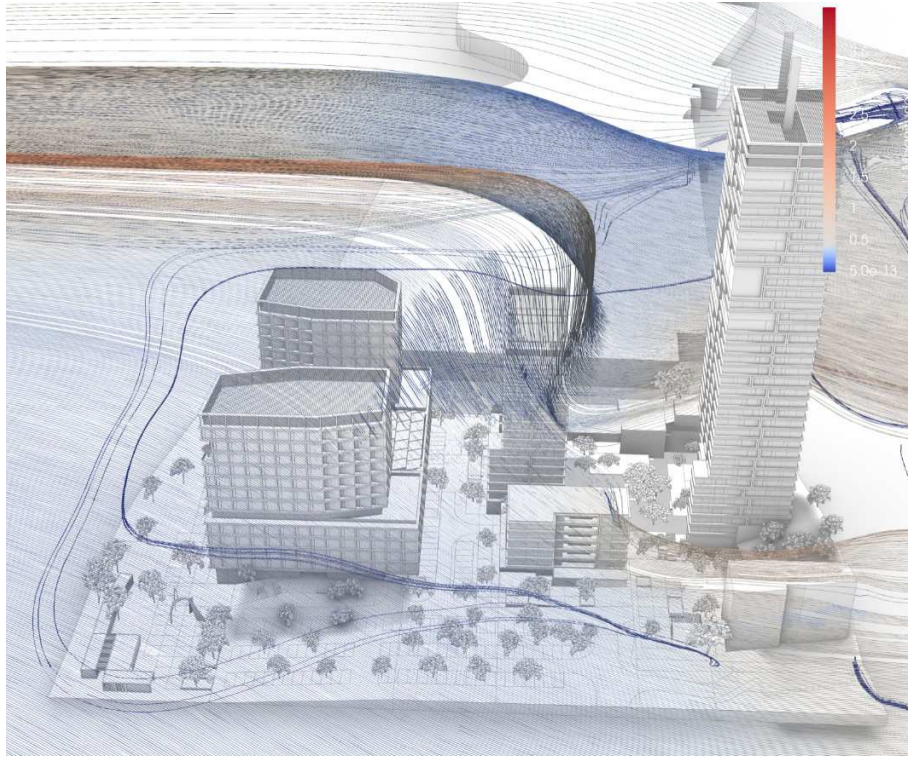
c.

Rys.5.3a,b,c: Graficzne przedstawienie algorytmu procedur przy symulacji tunelu aerodynamicznego użyte w projekcie konkursowym Centum Plaza

źródło: Designbotic

5.16 | CENTUM PLAZA

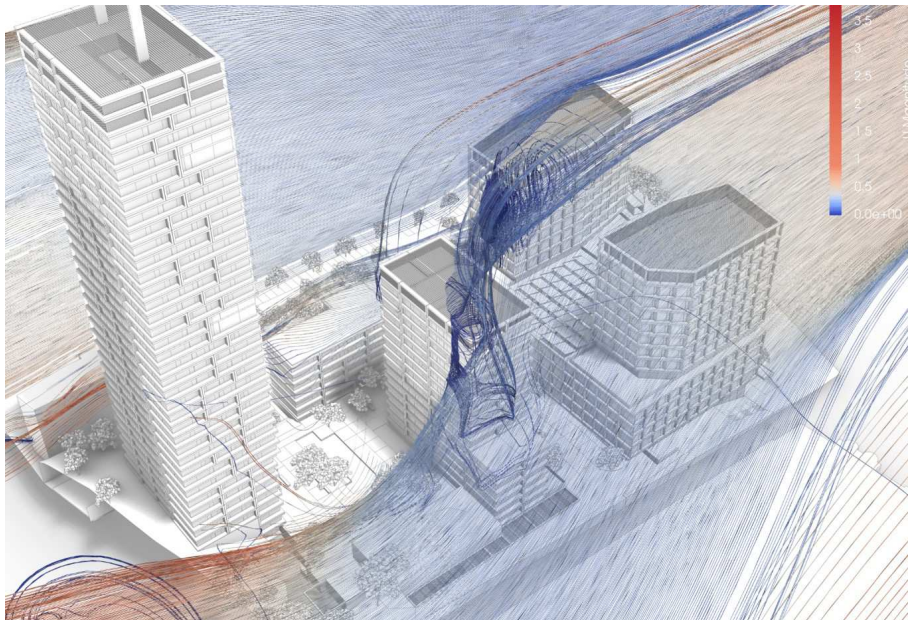
d.



e.

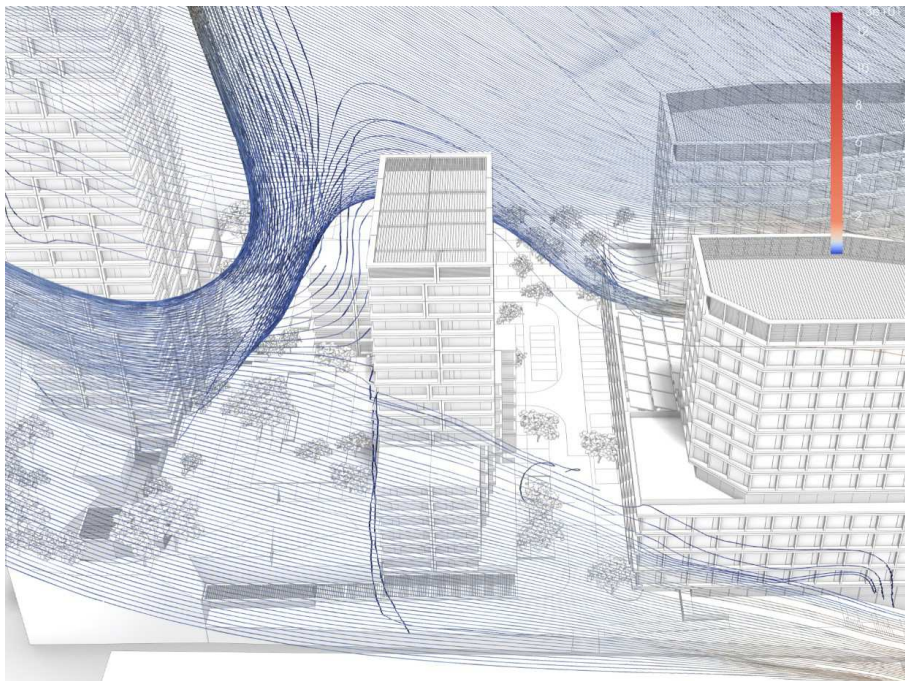
Rys.5.3d,e:
Graficzne przedstawienie efektów zauważalnych na wygenerowanym modelu 3d założenia projektowego, po przeprowadzeniu procedur dla algorytmu symulacji tunelu aerodynamicznego użyte w projekcie konkursowym Centum Plaza

źródło:
Designbotic





f.



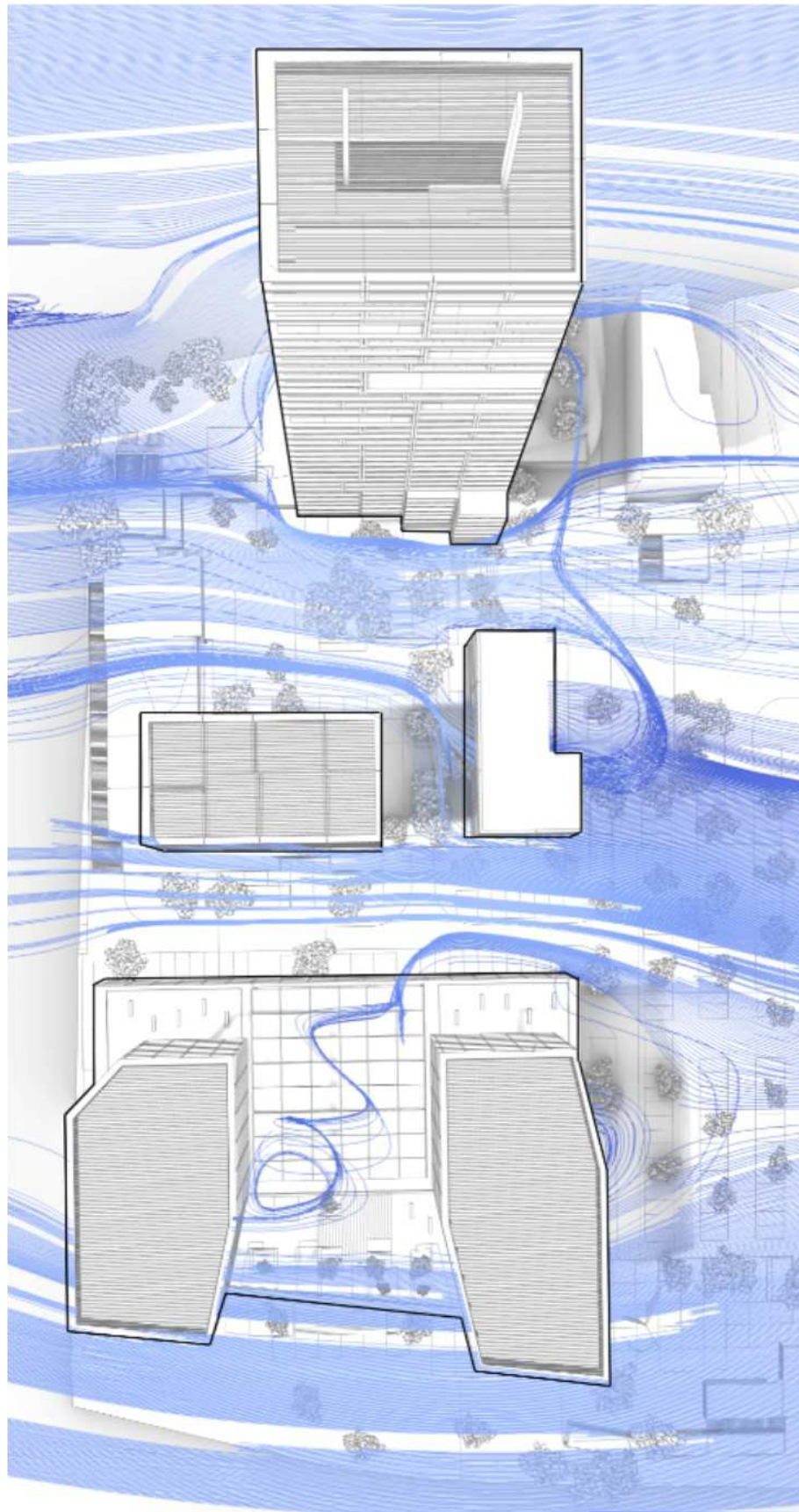
g.

Rys.5.3f,g: Graficzne przedstawienie efektów zauważalnych na wygenerowanym modelu 3d założenia projektowego, po przeprowadzeniu procedur dla algorytmu symulacji tunelu aerodynamicznego użyte w projekcie konkursowym Centum Plaza

źródło:
Designbotic



h.



Rys.5.3h:
Graficzne przedstawienie efektów zauważalnych na wygenerowanym modelu 3d założenia projektowego, po przeprowadzeniu procedur dla algorytmu symulacji tunelu aerodynamicznego użyte w projekcie konkursowym Centum Plaza

źródło:
Designbotic

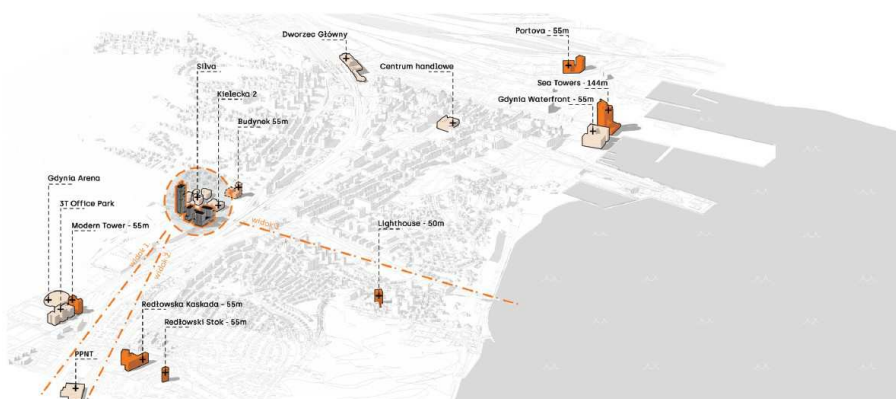
5.4. Analizy widokowe

Omawiając priorytety i cele projektowe uznano, że wartością dodaną, podwyższającą wartość projektu będzie maksymalizacja ilości mieszkań z dostępem do widoku na morze.

Kolejno należało uzyskać kompromis między jak najlepszym usytuowaniem brył w powyższym kontekście, jak również przy uwzględnieniu jak najlepszej kompozycji urbanistycznej w szerszym kontekście miasta. Nieruchomość, na której realizowane ma być zadanie konkursowe stanowi geometryczne przecięcie kilku osi widokowych Gdyni, dlatego też w tym miejscu doszukiwano się lokalizacji dominanty. Od strony południowej jej umiejscowienie miało wskazywać na zapowiedź centralnej części miasta, a od strony morza dominanta miała stanowić zwieńczenie alei Piłsudskiego.



a.



b.

Rys.5.4a,b:
Aksonometria otoczenia wraz z analizą widokową opracowana dla projektu konkursowego Centum Plaza

źródło:
Roark Studio

Jako alternatywę dla tradycyjnych analiz widokowych (Rys.5.4a,b), opracowano indywidualne narzędzie bazujące na narzędziu „Isovist”⁵⁶(Rys.5.4c,d).

W tym konkretnym narzędziu środowisko definiowane jest przez zbiór widocznych, rzeczywistych, dwuwymiarowych powierzchni w przestrzeni. Efekt stanowi zbiór wszystkich punktów widocznych z danego punktu widokowego (np. salonu w mieszkaniu) w zadanej przestrzeni, w odniesieniu do barier w postaci otaczającej zabudowy. Kształt i rozmiar zmienia się wraz z położeniem. Zaproponowano numeryczny system miar, które określają istotne cechy kształtu i rozmiaru obszaru widoczności. Metoda ta jest odpowiednia dla behawioralnych i percepcyjnych badań w architekturze, w szczególności dla obszarów kontroli widoku, prywatności, „możliwości obrony”.

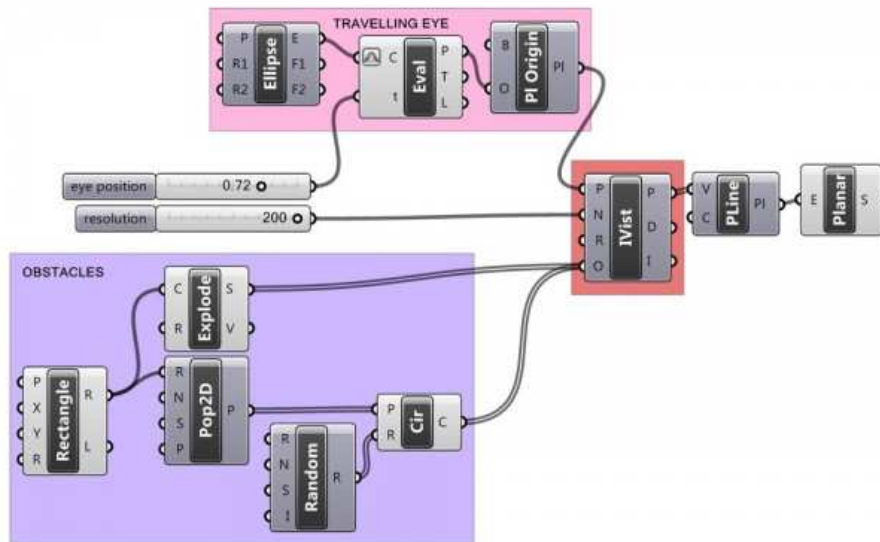
Program bazuje na modelu 3d projektowanych brył z dokładnością do wydzielonych jednostek mieszkalnych. Użyto również modelu 3d miasta w obszarze między projektem, a Zatoką Gdańską. Jako, że program zbiera dane w przestrzeniach dwuwymiarowych, należało go powtórzyć dla każdej kondygnacji.

Po przeprowadzeniu analiz zdecydowano o zmianach w geometrii budynków biurowych, które tworzyły nieporządaną barierę widoczności.

5 Benedikt M. L., 1979, *To take hold of space: isovists and isovist fields*, Environment and Planning B 6(1) str. 47–65

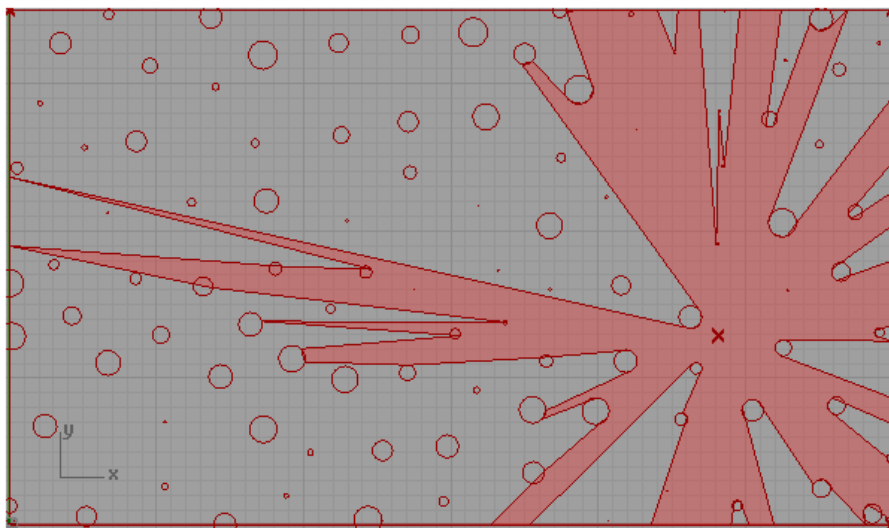
6 <https://www.designcoding.net/> 03.2022





Rys.5.4c: Graficzne przedstawienie algorytmu postępowania przy opracowywaniu badania widoczności za pomocą Isovist

źródło:
<https://www.designcoding.net/how-isovist-component-works>



Rys.5.4d: Graficzna interpretacja działania skryptu Isovist

źródło:
<https://www.designcoding.net/how-isovist-component-works>

5.5. Zabiegi elewacyjne

Na etapie kreowania elewacji nowo projektowanych brył najbardziej dało się odczuć efekty matematycznych obliczeń bezpośrednio odbijające się na końcowym wyglądzie i estetyce. Wygenerowano elewację dedykowaną pod tą konkretną lokalizację, stanowiącą wypadkową przeprowadzonych analiz.

Opisywane analizy przyczyniły się zarówno do ustalenia lokalizacji poszczególnych brył jak i ukształtowania

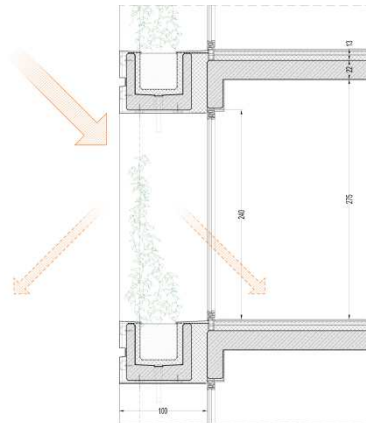
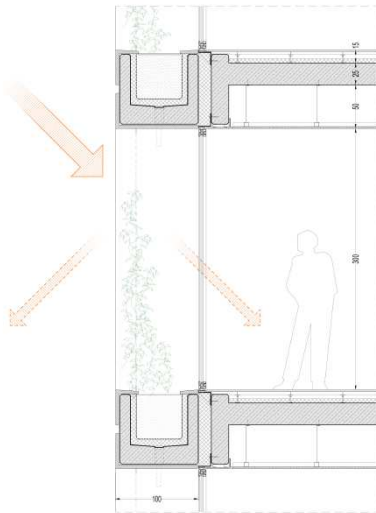


5.22 | CENTUM PLAZA

elewacji całego zamierzenia. Efekt końcowy zabiegów elewacyjnych stanowi korelację i optymalizację wytycznych związanych ze względami akustycznymi, dostępnością do światła naturalnego, pasywnym zapobieganiem nadmiernemu przegrzewaniu się pomieszczeń, szczelności powietrznej, jak i szczelności izolacji termicznej.

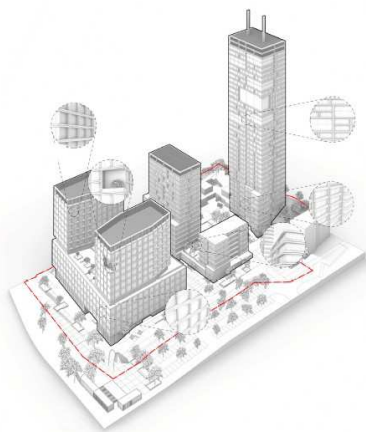
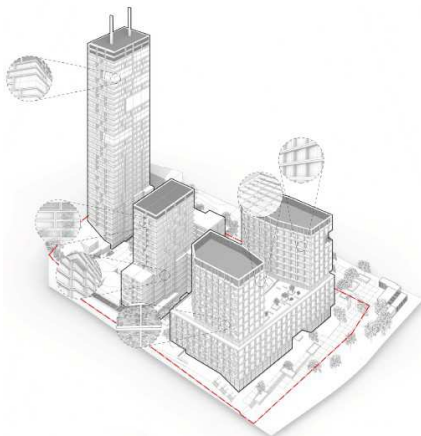
W miejscach, gdzie analiza nasłonecznienia i radiacji wykazała zwiększone nagrzewanie się pomieszczeń, zdecydowano się na zastosowanie zabiegu elewacyjnego w postaci wysunięcia gzymsów przed lico elewacji wraz z umieszczeniem na nich zewnętrznych donic z pnączami potęgujących zabezpieczenie przed promieniowaniem. Ponadto, donice rozlokowano również w przestrzeniach, gdzie analiza widokowa wykazała sąsiedztwo niekorzystnych widoków (Rys5.5a). Dla regulacji zjawiska radiacji, przy zastosowaniu wcześniej wspomnianych wysunięć gzymsów, wartość wysunięcia przed lico elewacji i jego gabaryty skoordynowano z zapotrzebowaniem wynikającym z efektów analiz. Wartość wysunięć różniła się względem stron świata i lokalizacji w obrębie założenia. Największe wartości ulokowano od strony południowej. Kolejnym zabiegiem elewacyjnym było umiejscowienie pionowych „żyłek” w elewacji, co w istocie nadało ostateczny charakter elewacji, a pod kątem funkcji również stanowiło kompromis wyników analiz dotyczących nasłonecznienia (ograniczenie wpadania promieni słonecznych do wnętrza), przewietrzania i kadrowania widoków (Rys5.5b).

Tworząc model 3d posłtkowano się skryptami pomocniczymi, takimi jak wypełnianie określonych płaszczyzn elewacji lub obrysów kondygnacji zadanymi, wynikowymi modułami elewacyjnymi. Efekt końcowy stosowania zabiegów elewacyjnych ukazał się jako elegancki i uporządkowany, lekki i różnorodny, odzwierciedlając w swoim charakterze zarówno gdyńską tradycję „białego miasta”, jak i wnosząc elementy nowatorskie (Rys.5.5c). Uznano, że dla budowy przedłużenia śródmieścia Gdyni, efekt jest zadowalający dla zespołu projektowego.



Rys.5.5a: Zabiegi elewacyjne zastosowane w koncepcji Centum Plaza po analizach dotyczących następcznienia, radiacji, daylight factor (DF) oraz spacial daylight autonomy (sDA)

źródło:
Roark Studio



Rys.5.5b: Zabiegi elewacyjne zastosowane w koncepcji Centum Plaza po analizach dotyczących następcznienia, radiacji, daylight factor (DF) oraz spacial daylight autonomy (sDA)

źródło:
Roark Studio

Rys.5.5c:
Efekt końcowy
zastosowania różnych
zabiegów
elewacyjnych w
projekcie Centum
Plaza wynikających z
analiz dotyczących
nasłonecznienia,
radiacji, daylight factor
(DF) oraz spatial
daylight autonomy
(sDA)



źródło:
Roark Studio

5.6. Wnioski

Opracowując powyższą koncepcję konkursową, wiele kluczowych decyzji podjęto w oparciu o omówione analizy i symulacje. Na podstawie uzyskanej przez nie dodatkowej warstwy informacyjnej w procesie projektowym, zdecydowano o wyborze układu urbanistycznego, jak i o końcowych efektach zabiegów elewacyjnych (Rys.5.5c).

W trakcie procesu projektowego przedstawione symulacje były kilkakrotnie powtarzane i miały wpływ na dalsze decyzje projektowe, a co za tym idzie ostateczny rezultat. Obecność dominanty, jako najtrudniejszego elementu założenia uświadamiała istotę oddziaływania wiatru i słońca w nowej przestrzeni.

Efekt finalny stanowi korelację między tradycyjnym projektowaniem, a wartościami dodanymi, jakie umożliwiły algorytmy matematyczne i symulacje. W kilku przypadkach jednak przeprowadzone obliczenia jedynie

w szybkim tempie potwierdziły przyjęte na podstawie doświadczenia i intuicji założenia projektowe.

Oprócz zapewnienia zgodności z obowiązującymi przepisami, spełnienia zadanego programu funkcjonalnego oraz wytworzenia architektury odnoszącej się do kontekstu miejsca, nadano założeniu dodatkową „warstwę”, która znacząco podnosi jego jakość.

Sprecyzowanie wymagań projektowych w języku matematyki umożliwiło odniesienie się do optymalizacji nasłonecznienia, radiacji, Daylight Factor, Spatial Daylight Autonomy, przewietrzania, dostępności i kadrowania widoków oraz zabiegów elewacyjnych.



6. ZASTOSOWANIE METOD MATEMATYCZNYCH W PROCESIE PROJEKTOWANIA NA PRZYKŁADZIE STUDIALNO - IDEOWEJ KONCEPCJI KONKURSOWEJ NA PROJEKT ZABUDOWY I ZAGOSPODAROWANIA GŁÓWNEJ OSI KOMPOZYCYJNEJ GDYNI – PIRS PRZYSZŁOŚCI | SKWER KOŚCIUSZKI I MOLO POŁUDNIOWE

Poniższe studium przypadku koncentruje się na projekcie studialno - ideowej koncepcji konkursowej na projekt zabudowy i zagospodarowania głównej osi kompozycyjnej Gdyni – Pirs Przyszłości (Skwer Kościuszki i Molo Południowe) zaprojektowanej w 2021 roku przez Roark Studio i Designbotic. Konkurs został zorganizowany przez Gminę Miasta Gdyni. W skład zespołu projektowego wchodził: Jakub Bładowski, Kacper Radziszewski, Robert Juchnevic, Anna Modrzejewska, Ada Kowalska, Anna Czech.

6.1. Wytyczne projektowe

Przedmiot konkursu

Przedmiotem konkursu było opracowanie projektu zabudowy i zagospodarowania terenu stanowiącego autorską propozycję wizji najważniejszej osi kompozycyjnej Gdyni – Skweru Kościuszki, Alei Jana Pawła II oraz Mola Południowego.

Cel konkursu

Projekt powinien prezentować propozycję przekształcenia obszaru objętego konkursem na poziomie studialno - ideowym, określać relacje z otoczeniem, mieć na uwadze wartości historyczne, rozwiązania kompozycyjne, funkcjonalne, relacje krajobrazowe oraz zasady kształtowania wartościowych przestrzeni publicznych.



6.2 | PIRS PRZYSZŁOŚCI – SKWER KOŚCIUSZKI I MOŁO POŁUDNIOWE

Celem konkursu było uzyskanie inspirujących rozwiązań odzwierciedlających ambicje i tradycję Gdyni jako odważnego, nowoczesnego miasta.

Rozwiązania te mają posłużyć określeniu kierunków przemian, które pozwolą wykorzystać potencjał przestrzeni. Dodatkowo mają posłużyć za podstawę stworzenia adekwatnych współcześnie zapisów Miejscowego Planu Zagospodarowania Przestrzennego dla obszaru.

Kryteria oceny prac konkursowych

Prace konkursowe zostały poddane ocenie według następujących kryteriów:

- identyfikacja tożsamości przestrzeni urbanistycznej i architektonicznej miasta i na tym tle oryginalności i atrakcyjność proponowanej wizji poszczególnych rozwiązań*
- ocena stopnia w jakim proponowane rozwiązania przyczynią się do kreowania / wydobywania tożsamości i atrakcyjności miejsca*
- sposób wpisania w otaczający kontekst i układ kompozycyjno - przestrzenny miasta*
- walory użytkowe koncepcji w aspekcie funkcjonalnym, społecznym, ekologicznym i technicznym*
- szczególne walory warte podkreślenia.*

6.2. Problemy projektowe

Analizując aktualne problemy miast, procesy gospodarcze oraz decyzje polityczne odnoszące się do zmian klimatycznych, zauważono konflikt na tle urbanistycznym w postaci mierzenia jakości gospodarek za pomocą wzrostu wskaźnika PKB¹ z koniecznością wprowadzania tzw. zielonej energii². Zdecydowano, aby do problemu projektowego podejść, jako do próby dostarczenia odpowiedzi na pytania dotyczące potrzeb społeczeństwa oraz zapewnienia dobrostanu mieszkańców wraz z poszanowaniem środowiska.

Konieczność zwrócenia uwagi na zagadnienie nadmiernego zużycia zasobów naturalnych oparto na raporcie Komisji Europejskiej podkreślającym, że budynki odpowiadają za 40% światowego zużycia energii oraz 36% emisji gazów cieplarnianych³. W powyższych danych liczbowych zawiera się oprócz etapu użytkowania budynku również ich wznoszenie oraz utylizacja.

Kolejnym aspektem był problem minimalizacji indywidualnej komunikacji samochodowej. W urbanistyce, konsekwencja ograniczania ruchu kołowego za pomocą promowania komunikacji pieszej, rowerowej i transportu zbiorowego przyczynia się do redukcji zużycia paliw kopalnianych.

Zespół projektowy przeanalizował dane dotyczące zmian klimatu wywołanych ludzką aktywnością mające

1 <https://worldhappiness.report/03.2022>

2 Komisja Europejska, "Komunikat komisji do parlamentu europejskiego, rady europejskiej, rady, komitetu ekonomicznospołecznego i komitetu regionów", Bruksela 2019

3 Komisja Europejska – Departament: Energia, „Efektywność energetyczna budynków”, Bruksela 2020



6.4 | PIRS PRZYSZŁOŚCI – SKWER KOŚCIUSZKI I MOLO POŁUDNIOWE

oddziaływanie lokalne w Gdyni. Sklasyfikowano podstawowe aspekty w postaci: długich okresów bez opadów atmosferycznych, fali upałów i gorących dni, nagłych porywów wiatru, nawalnych deszczy, nagłych powodzie miejskich (typu flash flood) oraz silnych burz. W przypadku braku dostosowania przestrzeni miejskiej do powyższych gwałtownych warunków, najbardziej narażone na wykluczenie z przestrzeni są osoby starsze, niepełnosprawne, dzieci oraz bezdomni⁴. Za użytkowników przestrzeni miasta uznano również obserwowane tu gatunki roślin oraz zwierząt.

Zespół projektowy podsumował Przestrzeń Skweru Kościuszki i Mola Południowego, jako relikwiny minionych czasów, który aktualnie nie jest w stanie sprostać podkreśleniu walorów głównej osi kompozycyjnej modernistycznego założenia na styku miasta i morza i którego organizacja nie odpowiada współczesnym potrzebom mieszkańców.

Za cel obrano stworzenie projektu konkursowego, jako modelowej, wielofunkcyjnej przestrzeni publicznej na styku z wodą, odnoszącej się do prób rozwiązania problemów współczesnych miast w zgodzie z dziedzictwem historycznym i potrzebami mieszkańców.

4 "Plan Adaptacji miasta Gdyni do zmian klimatu do roku 2030", <https://bip.um.gdynia.pl/programy-w-2020-roku,8228/planadaptacji-miasta-gdyni-do-zmian-klimatu-do-roku-2030,541418>, Gdynia 2019 03.2022

6.3. Idea projektowa

Idea projektowa została oparta na próbie lokalnej odpowiedzi na globalne problemy miast, przy uwzględnieniu charakterystyki Gdyni, jako awangardowego miasta na styku lądu i morza, będącego symbolem odważnych, nowatorskich rozwiązań projektowych i przyszłościowego myślenia.

Jako użytkownicy tej przestrzeni, zespół projektowy odczuwa jej potencjał jako przestrzeń możliwości – obszar stanowiący tło dla miejskich aktywności, różnorodny, wielofunkcyjny i angażujący możliwie najwięcej grup społecznych (Rys.6.3a).



Rys.6.3a:
Konkursowy plan zagospodarowania przestrzennego Skweru Kościuszki i Mola Południowego według Roark Studio

źródło:
Roark Studio

Relacja z dziedzictwem historycznym

Relacja napięć projektowanej zabudowy z tkanką zastaną często jest przyczyną sporów w rozważaniach o poszanowaniu dziedzictwa historycznego przy wprowadzaniu nowych form.

Aby temu zapobiec w projekcie należało dokonać ewaluacji przestrzeni. Za esencję Skweru Kościuszki i Mola Południowego uznano: modernistyczną oś kompozycyjną, nieco zapomniane, lecz kluczowe otwarcie na wodę oraz nieodczuwalną już współcześnie awangardę

6.6 | PIRS PRZYSZŁOŚCI – SKWER KOŚCIUSZKI I MOLO POŁUDNIOWE

technologiczną. Koncepcję oparto na uwypukleniu powyższych, ochronie „świadków historii” (w postaci budynku Akwarium oraz Róży Wiatrów) oraz na wprowadzeniu nowych, współczesnych, awangardowych rozwiązań w duchu Nowego Urbanizmu.

Analizy widokowe

Kolejnym ważnym celem projektu była maksymalizacja kadrowania widoków na wodę oraz inne istotne elementy sąsiedztwa. W tym celu wykonano szereg analiz programem „Isovist”⁵⁶ (zasady działania skryptu opisano uprzednio w rozdziale dotyczącym projektu *Centum Plaza*). Na jego podstawie zbadano, określono i uwypuklono przestrzenie z najlepszymi kadrami, aby w kolejnym etapie, tworząc nową zabudowę nie ograniczać walorów widokowych, a je potęgować.

W stronę wody

Największym atutem Skweru Kościuszki i Molo Południowego jest bezpośrednie sąsiedztwo Zatoki Gdańskiej. Uwypuklenie tego aspektu powinno stanowić dominujący przekaz projektu. Odnowienie tej relacji, przestrzeni z wodą, zwrócenie się w jej stronę, jest nieodzownym elementem odżywienia i uporządkowania przestrzeni pirsu.

Środowisko

Zespół projektowy uznał, że dojazd samochodowy do funkcji znajdujących się na Molo Południowym (marina

5 Benedikt M. L., 1979, *To take hold of space: isovists and isovist fields*, *Environment and Planning B* 6(1) str. 47–65

6 <https://www.designcoding.net/03.2022>



jachtowa, planowany aparthotel, Akwarium Gdyńskie) powinien zostać ograniczony do minimum, a komunikacja zbiorowa w postaci autobusów/trolejbusów elektrycznych powinna zostać rozbudowana. Ponadto zwrócono uwagę na rodzaj i stan nawierzchni pokrywającej przestrzeń, gdzie zbyt duży jej procent jest nieprzepuszczalny oraz zbyt znaczna część zawiera bariery niemożliwe do pokonania dla osób z trudnościami w poruszaniu się.

Podjęto rozważania na temat adaptacji, uelastycznienia i przedłużenia cyklu życia istniejących budynków w terenie. Z duchem „re-use” zaplanowano nowe, współcześnie potrzebne funkcje w Akwarium Gdyńskim, Róży Wiatrów i w pawilonach przy Darze Pomorza.

Przy omawianiu projektowania nowych form, analizowano zwrócenie się w kierunku budynków zero-energetycznych oraz neutralnych węglowo, których cykl życia jest kontrolowany na każdym jego etapie. Zaplanowano zielone dachy z możliwością retencji i wykorzystania wód opadowych.

Wprowadzenie dużych ilości zieleni (w postaci zieleni wysokiej wedle wytycznych Ogrodnika Miasta, zielonych dachów, ogrodów deszczowych czy łąk kwietnych) potraktowano jako wsparcie lokalnego ekosystemu, jako miejsce gniazdowania ptactwa, czy źródło nektaru dla owadów.

Mieszkańcy

W projekcie sklasyfikowano czynniki dobrostanu i zdrowia mieszkańców, które leżą w kompetencjach planistów i projektantów. Przeanalizowano rozwiązania dotyczące



6.8 | PIRS PRZYSZŁOŚCI – SKWER KOŚCIUSZKI I MOLO POŁUDNIOWE

ochrony pieszych przed ruchem kołowym, przed przemocą⁷, jak również niekorzystnymi zjawiskami sensorycznymi w postaci wiatru, deszczu, śniegu, chłodu, upału, zanieczyszczenia, pyłów, hałasu, czy ośnienia.

Awangarda Technologiczna

Odpowiedź na postawione problemy projektowe wymagała zastosowania nowoczesnych narzędzi informatycznych, takich jak symulacje i analizy komputerowe.

Dodatkowe dane

W opisie projektu zasugerowano władzom Gdyni używanie dodatkowej warstwy informacyjnej za pomocą sieci czujników dotyczących temperatury, prędkości wiatru, wilgotności, jakości powietrza, ilości odpadów, liczby osób poruszających się w przestrzeni oraz innych istotnych mierzalnych parametrów, których kontrola pozwoliłaby reagować na dostosowywanie miasta do pożądaných warunków.

Zespół projektowy odniósł się w kontekście urbanistycznym do Prawa Amara⁸, brzmiącego: „Przeceniamy wpływ technologii w krótkim okresie i nie doceniamy wpływu w długim okresie”, rozważając wpływ narzędzi i technologii stosowanej współcześnie na cykl życia nie tylko budynku, a fragmentu miasta. Koszty

7 Z pomocą skryptu Isovist zwrócono uwagę na minimalizację obszarów w przestrzeni publicznej Skweru, gdzie komuś mogłoby dziać się krzywda, a byłoby to niezauważalne dla innych użytkowników w pobliżu

8 Roy Amara – amerykański naukowiec, futurolog. Do 1991 roku był prezesem Institute for the Future, niezależnego komitetu doradczego zajmującego się przewidywaniem długoterminowych trendów



realizacji inwestycji w tak kluczowych, wielowymiarowych obszarach śródmieścia należy rozpatrywać łącznie z zyskami ze zmniejszonego zużycia energii i zasobów, ze zmniejszoną emisją gazów cieplarnianych, jak również ze zwiększonym dobrostanem życia mieszkańców i napływem nowych inwestycji w dobrze zagospodarowanej tkance miejskiej.

Praca konkursowa ma w zamiarze otwarcie dyskusji na temat transformacji myślenia o mieście, zasobach i potrzebach ludzkich.

Praca badawcza skupia uwagę na istocie obecności zapisu matematycznego w realizacji powyższych idei.

6.4. Forum Morskie z Laguną | minimalizacja prędkości wiatru w przestrzeni, przy maksymalizacji widoków

Końcowy fragment Molo Południowego został zakwalifikowany jako idealny główny plac miejski dla Gdyni. W tym miejscu postanowiono zlokalizować Forum Morskie (lub Forum Kultury) (Rys.6.4a,b). Wcześniejszy projekt konkursowy dla Gdyni autorstwa zespołu Stanisława Fiszera z 2008 roku zakładał w tym celu przestrzeń obecnego Parku Rady Europy, jednak nie doczekał się realizacji. Funkcja ta w zamyśle projektu Roark Studio miałaby być przestrzenią wymiany myśli, poglądów i różnorodnych aktywności.

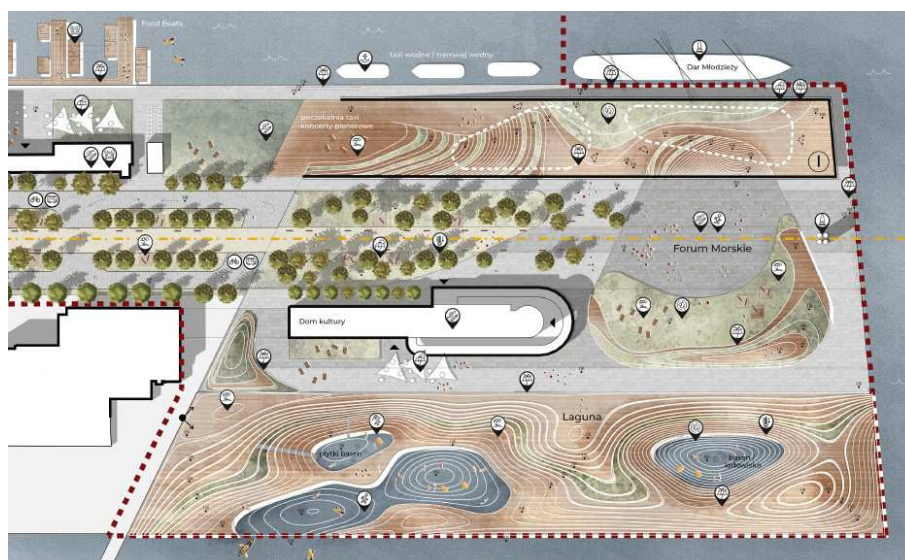


Rys.6.4a:
Wizualizacja Forum Morskiego zlokalizowanego na końcowym fragmencie Molo Południowego

źródło:
Roark Studio
wizualizacja:
Bitlens

Rys.6.4b:
Plan zagospodarowania końcowego fragmentu Moło Południowego w koncepcji konkursowej

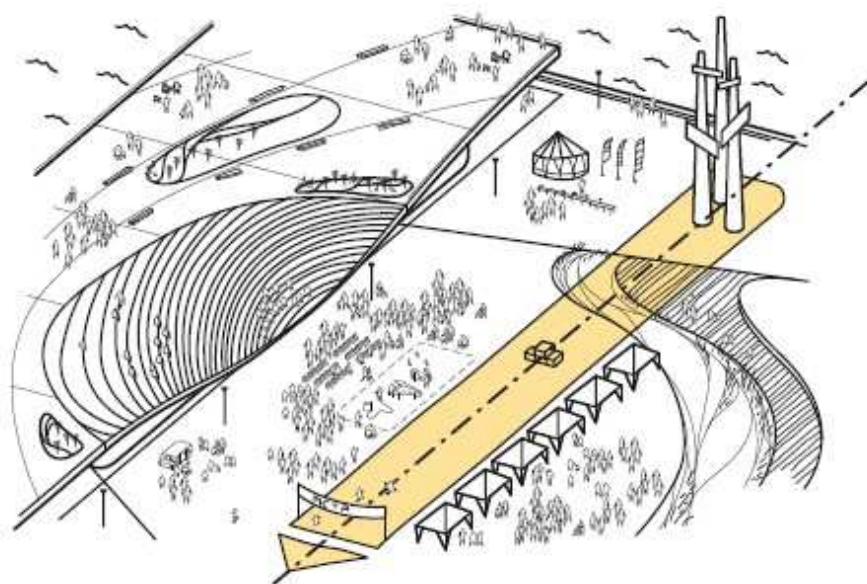
źródło:
Roark Studio



Schemat obrazujący różnorodne możliwości wykorzystania Forum Morskiego przedstawia poniższa grafika (Rys.6.4c).

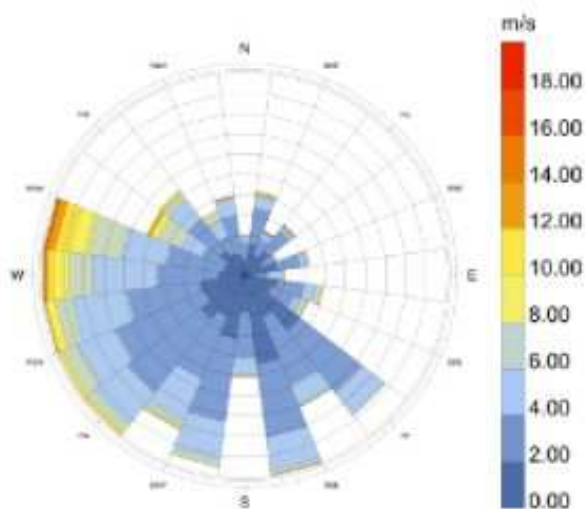
Rys.6.4c:
Schemat wizualizujący możliwości wykorzystania Forum Morskiego

źródło:
Roark Studio



W trakcie prac nad koncepcją konkursową wielokrotnie wykonywano analizy tunelowe dotyczące rozwiązań ochrony przed wiatrem, jako że ten problem jest najczęściej podkreślaną niewygodą użytkowników Moło Południowego.

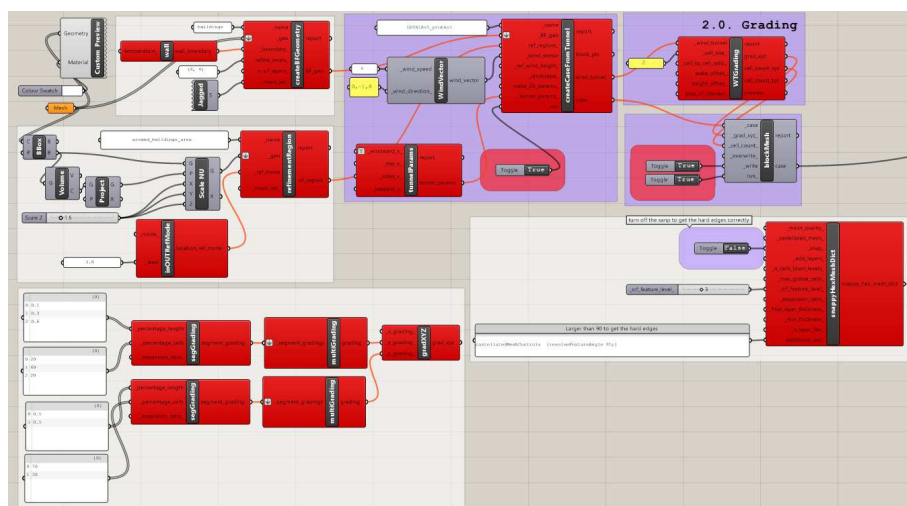
Na potrzeby obliczeń posłużono się poniższym wiatrogramem, obrazującym rozkład kierunków i częstotliwość wiania wiatrów dla Gdyni na przestrzeni jednego roku (Rys.6.4d).



Rys.6.4d: Wiatrogram obrazujący rozkład kierunków i częstotliwość wiania wiatrów dla Gdyni na przestrzeni jednego roku

źródło: Designbotic

Na jego podstawie opracowano skrypt badający zachowanie powiewów wiatru w obrębie Moła Południowego (Rys.6.4e,f). Zasady działania analogicznego skryptu omówiono uprzednio w rozdziale poświęconym projektowi *Centum Plaza*.

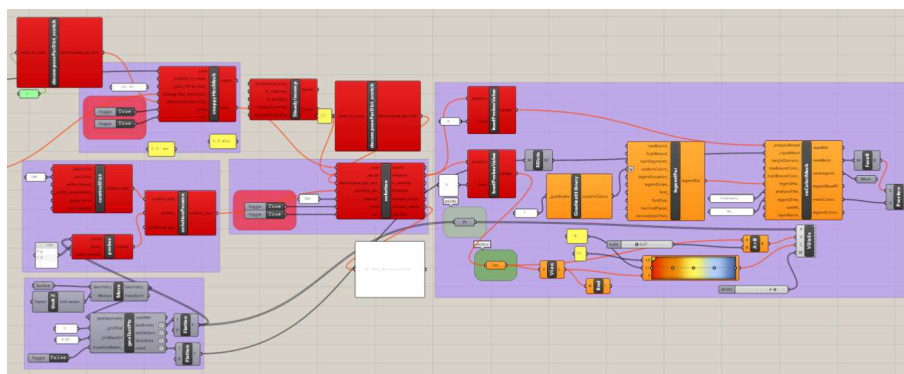


Rys.6.4e: Graficzne przedstawienie algorytmu procedur przy symulacji tunelu aerodynamicznego użyte w projekcie konkursowym *Pirs Przyszłości*

źródło: Designbotic

Rys.6.4f:
Graficzne przedstawienie algorytmu procedur przy symulacji tunelu aerodynamicznego użyte w projekcie konkursowym Pirs Przyszłości

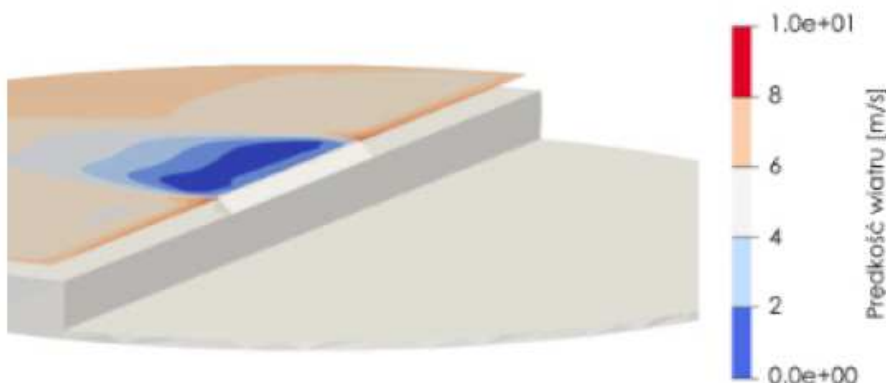
źródło:
Designbotic



Na podstawie obserwacji symulacji tunelu aerodynamicznego w tym obszarze podjęto decyzję o miejscowych zastosowaniach „wałów” o wysokości 1m wzdłuż krawędzi pirsu. Pochylenie w kierunku nawietrznej elementu w postaci „wałów” skutkuje obniżeniem średniej prędkości wiatru do 0 m/s na odcinku 5 m oraz o obniżenie prędkości wiatru o 70% w odległości aż 40 metrów. Powyższe zależności zobrazowano na schemacie (Rys.6.4g).

Rys.6.4g:
Schemat obrazujący obniżenie prędkości wiatru przy zastosowaniu „wałów” o wysokości 1m w obszarze Molo Południowego

źródło:
Designbotic



Wnioski z tej obserwacji przyczyniły się do najodważniejszej decyzji projektowej dotyczącej koncepcji konkursowej - rozbudowy południowej strony obrysu Molo Południowego o sztuczną „Lagunę” (Rys.6.4h), której forma ma za zadanie potęgować komfort warunków wiatrowych zarówno w obrębie jej samej, jak i na Forum

Morskim. Jej zarys stanowi urbanistyczne dopełnienie szerokości obrysu Molo, przede wszystkim jednak, geometria laguny została tak wygenerowana, że optymalnie chroni przestrzeń Forum Morskiego przed wiatrem.



Rys.6.4h:
Wizualizacja „Laguny”,
której forma chroni
przestrzeń Forum
Morskiego przed
wiatrem

źródło:
Roark Studio
wizualizacja:
Bitlens

Struktura laguny powstała na planie trapezu o powierzchni 16 tysięcy metrów kwadratowych. Została matematycznie wygenerowana jako zbiór warstw, który zawiera obniżenia terenu wypełnione oczyszczoną wodą w postaci basenów rekreacyjnych oraz sztuczne zatoczki dla pływaków i kajakarzy, których kształt zmienia się wraz z poziomem wody w Zatoce Gdańskiej. Liczne stopnie i poziomy Laguny przeznaczone są do wypoczynku, opalania, zabawy i integracji mieszkańców przy bezpośrednim udziale wody w tej przestrzeni.

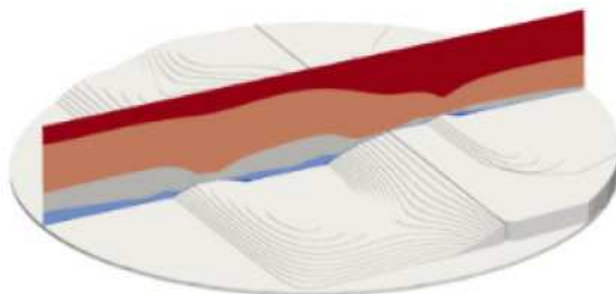
Rozmieszczenie „warstw” laguny obniża prędkość wiatru trzykrotnie, eliminuje niebezpieczeństwo gwałtownego przyspieszania wiatru wzdłuż dotychczasowej krawędzi pirsu oraz wznosi wiatr nad płaszczyznę Forum Morskiego, czyniąc go znacznie mniej odczuwalnym dla użytkowników przestrzeni.

Porównanie warunków wiatrowych w obrębie południowej krawędzi Molo Południowego

6.14 | PIRS PRZYSZŁOŚCI – SKWER KOŚCIUSZKI I MOLO POŁUDNIOWE

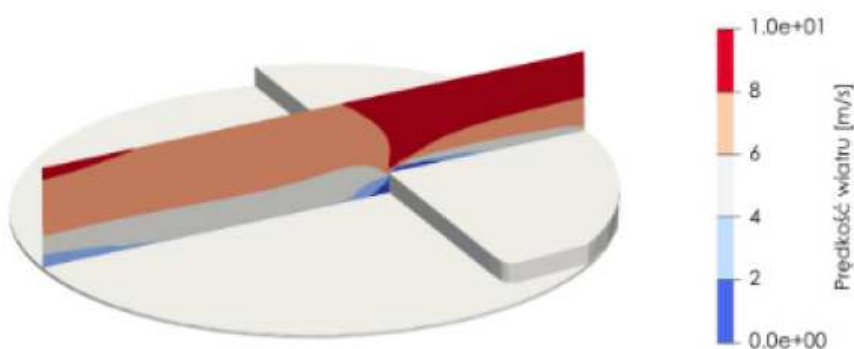
z uwzględnieniem nowo projektowanej Laguny oraz stan obecny przedstawiają poniższe wykresy (Rys.6.4i,j).

i.



j.

Rys.6.4i,j:
Wykresy porównujące zachowanie wiatru w obrębie południowej krawędzi Moła Południowego z uwzględnieniem nowoprojektowanej Laguny (i) oraz bez niej, w stanie obecnym (j)



źródło:
Designbotic

Ważnym celem projektowym było ponadto takie uformowanie Laguny, aby stanowiła przedpole widokowe dla Forum Morskiego dla oglądających je widzów z Bulwaru Nadmorskiego.

W obrębie północnej ściany Forum Morskiego natomiast, projekt proponuje jednokondygnacyjny obiekt, bez precyzowania jego funkcji (Rys.6.4k).

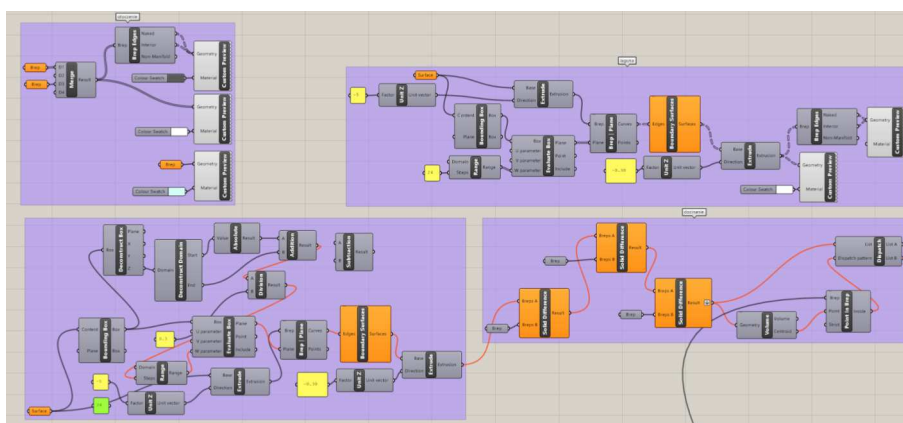
Rys.6.4k:
Fragment wizualizacji konkursowej – budynek Forum Kultury

źródło:
Roark Studio

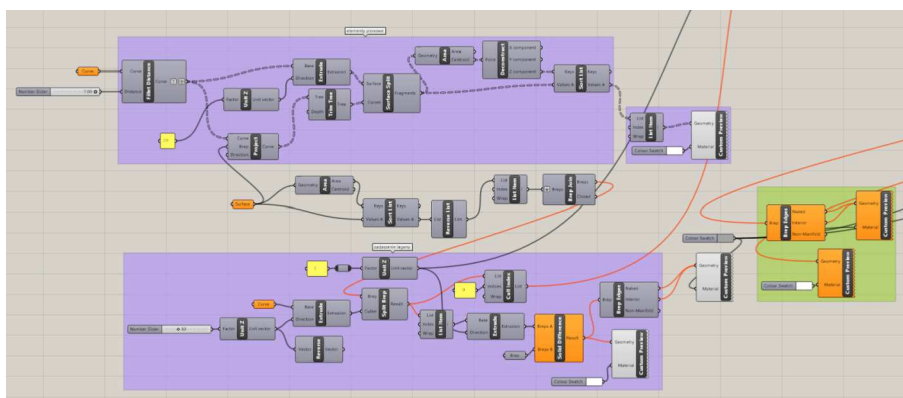


Celem usytuowania w tym miejscu budynku było umiejscowienie funkcji przyciągającej zarówno mieszkańców jak i odwiedzających, jednak tworząc formę obawiano się niepotrzebnej przystony widokowej. Dlatego poszukano bryły z wymyślnym zadaszaniem, która nie będzie odbierana jak ściana wnętrza urbanistycznego, a będzie kontynuacją jego podłogi. Wprowadzenie użytkownika na dach formy wytworzy więcej punktów widokowych, w tym skadruje widoki na inne nowo projektowane formy w postaci sceny letniej na wodzie, „foot boatów”, czy laguny. Pochylenie dachu w stronę Forum sprawia, że zaciera się granica między placem, a budynkiem, co było celem nadrzędnym zespołu projektowego.

Poniżej przedstawione zostały skrypty generujące formy w obrębie Forum Morskiego (Rys.6.4l,m,n).

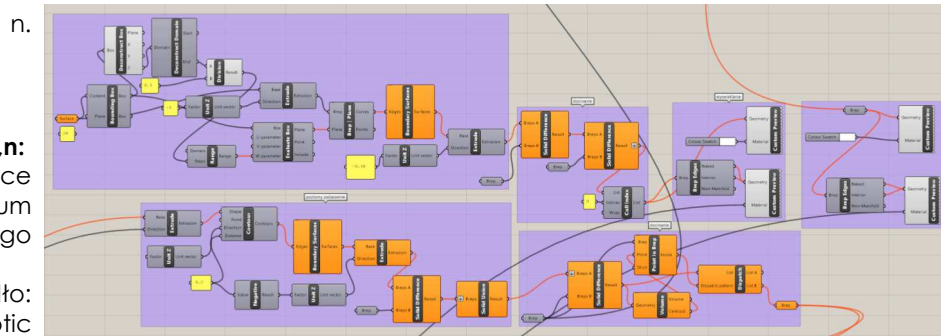


i.



m.

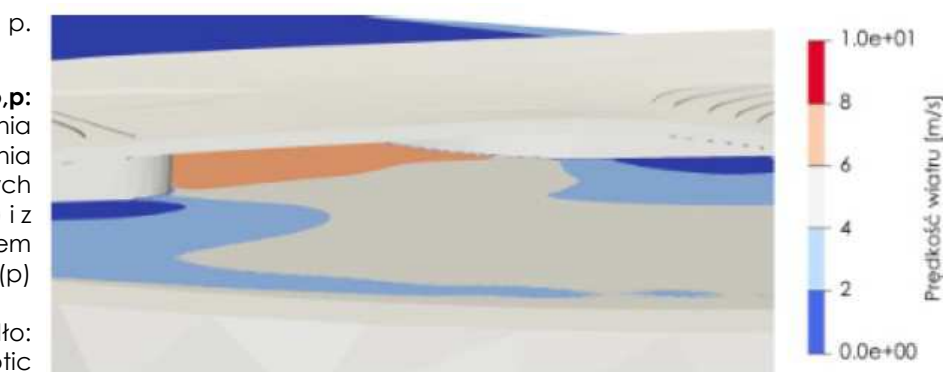
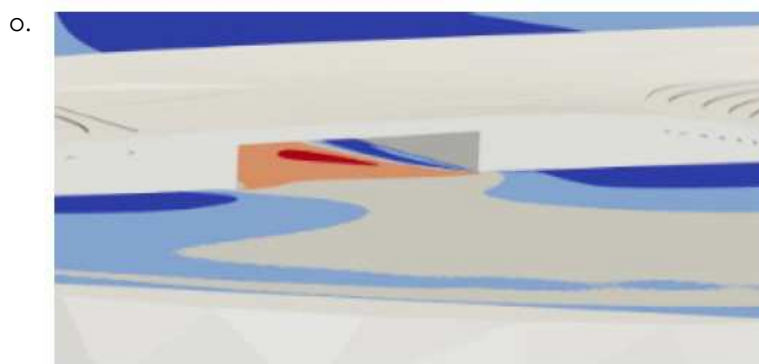




Rys.6.4l,m,n:
Skrypty generujące
formy w obrębie Forum
Morskiego

źródło:
Designbotic

Kolejną zaobserwowaną zależnością między budowaniem formy architektonicznej, a prędkością wiatru w jej otoczeniu jest stosowanie zaokrąglonych narożników (eliminacja ostrych kątów w bryle). Taki zabieg architektoniczny wedle obliczeń eliminuje gwałtowne przyspieszanie wiatrów w ich obrębie. Przeprowadzone symulacje na podstawie projektowanego budynku Forum Morskiego wskazały, że przy wyobleniu narożników prędkość wiatru zmalała o 8 m/s w obszarze 3 metrów (Rys.6.4o,p).

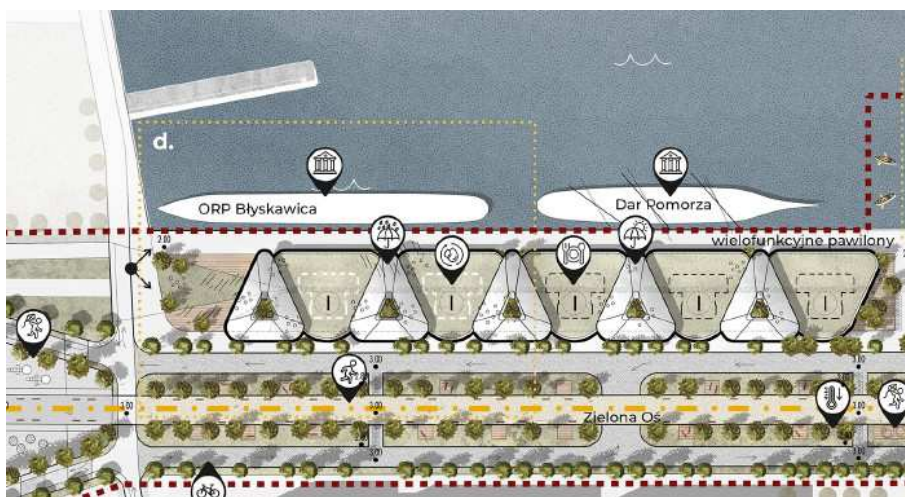


Rys.6.4o,p:
Zmiana zachowania
wiatru bez stosowania
zaokrąglonych
narożników (o) i z
uwzględnieniem
zaokrąglenia (p)

źródło:
Designbotic

6.5. Wielofunkcyjne pawilony | regulacja nasłonecznienia

W sąsiedztwie dwóch statków - symboli Gdyni – Daru Pomorza i ORP Błyskawica, zgodnie z duchem „re-use” projekt poddaje przekształceniu istniejące pawilony usługowe, rozbudowując je zgodnie z analizami dotyczącymi kadrowania widoków na najważniejsze punkty sąsiedztwa (Rys.6.5a).



Rys.6.5a:
Fragment zagospodarowania terenu ukazujący obszar projektowanych wielofunkcyjnych pawilonów

źródło:
Roark Studio



Rys.6.5b:
Wizualizacja wielofunkcyjnych pawilonów

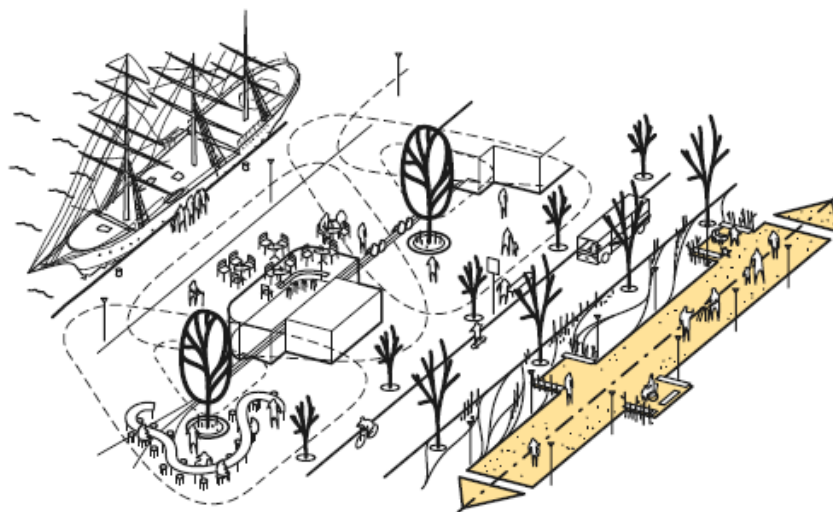
źródło:
Roark Studio
wizualizacja:
Bitlens

W przestrzeni pawilonów zdecydowano się na umieszczenie funkcji gastronomicznej, funkcji społecznych, czy związanych z pobliskim muzeum „Dar Pomorza” (Rys.6.5c). Aby funkcje te zyskały silne zintegrowanie z Basenem Prezydenta, aby mogły być użytkowane i w pełni wykorzystywane o wszystkich porach roku i w różnych warunkach atmosferycznych, zdecydowano

się na wprowadzenie form modelowanych parametrycznie inspirowanych meduzami (Rys.6.5b).

Rys.6.5c:
Szkic ukazujący
użytkowanie przestrzeni
wokół
wielofunkcyjnych
pawilonów

źródło:
Roark Studio

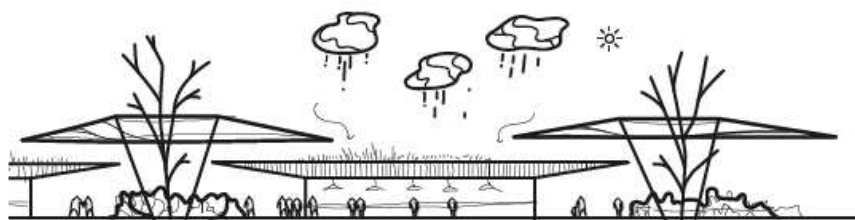


Zaczerpnięte ze świata natury komputerowe meduzy - parasole stanowią system zadaszeń spinający estetycznie i kompozycyjnie istniejące i nowo projektowane pawilony, w poszanowaniu wniosków z analiz preferowanych kadrów widoczności.

Na wzór meduz parasolom nadano półprzezierną powłokę, która chroni przed nadmiernym przegrzewaniem, ale przepuszcza światło słoneczne. Geometria powłoki została tak wyprofilowana, aby zbierać wodę i ukierunkowywać jej spływ na niższe, sąsiednie zadaszzenia pawilonów w postaci dachów z zielenią ekstensywną (Rys.6.5d).

Rys.6.5d:
Schemat obrazujący
spływ wód
deszczowych z parasoli
na zielone dachy

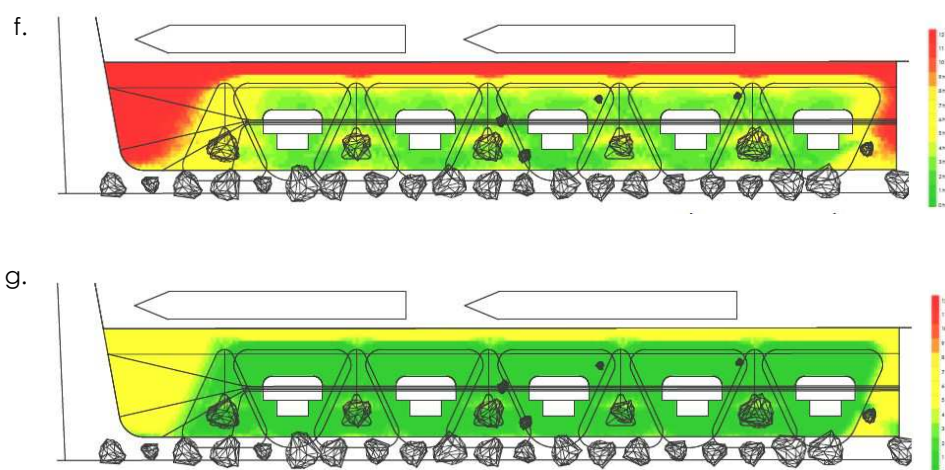
źródło:
Roark Studio



przestrzeń pozwalającą na obniżenie odczuwalnej temperatury latem. Zaprojektowana geometria zadaszeń parasoli - meduz w godzinach między 10 a 14 obniża odczuwalną temperaturę generując półcień (Rys.6.5f). Przestrzeń nie jest bezpośrednio nastoneczniona, jednak w ciągu całego dnia uzyskuje dostęp do światła dziennego (Rys.6.5g). Zapewnienie takiej osłony przed intensywnym promieniowaniem słonecznym sprzyja użytkownikom (a zarówno zwierzętom i roślinom).

Rys.6.5f,g:
Efekty graficzne zastosowania algorytmów badających nastonecznienie w obrębie wielofunkcyjnych pawilonów.

źródło:
Designbotic



6.5. Wnioski

W odniesieniu do spełnienia wytycznych projektowych, zapis matematyczny obecny był na etapie ustalania relacji krajobrazowych z otoczeniem w postaci analiz widoczności, budowania rozwiązań kompozycyjnych i funkcjonalnych w obszarze Forum Moskiewskiego z Laguną oraz wielofunkcyjnych pawilonów. Przyczynił się do uzyskania inspirujących, ambitnych, odważnych rozwiązań w szczególności za pomocą Laguny.

Szczególnie zauważalny był w kontekście prób rozwiązania problemów przestrzeni związanych z silnymi wiatrami oraz falą upałów.

Wały, warstvice i inne zabiegi służące wyniesieniu wiatru ponad przechodnia okazały się być kluczowymi formami projektu. Symulacje dostarczyły dokładnych informacji, na podstawie których można było sprawdzić zasadność konkretnych wartości wyniesień geometrii.

Część danych otrzymanych z analiz i symulacji określono jako oczywiste potwierdzenie założeń projektowych wynikających z doświadczenia i intuicji projektantów (jak na przykład, że zadaszenie w postaci półprzeziernych parasoli – meduz poprawi komfort użytkowania przestrzeni w gorące dni), jednak dopiero analiza nasłonecznienia i radiacji całej geometrii zadaszeń i pawilonów ukazała dostęp do światła dziennego wokół pawilonów o określonych porach.

Analizy widokowe w większości miejsc wykazały również dość intuicyjne rezultaty, ale ponadto przyczyniły się do zwiększenia bezpieczeństwa projektowanej przestrzeni, pozwalając sprawnie wyeliminować przestrzenie z ograniczoną widocznością.



7. ZASTOSOWANIE METOD MATEMATYCZNYCH W PROCESIE PROJEKTOWANIA I CYFROWEJ PRODUKCJI NA PRZYKŁADZIE PROJEKTU ARMADILLO VAULT PREZENTOWANEGO PODCZAS BIENNALE W WENECJI W 2016 ROKU

Armadillo Vault stanowił centralny punkt wystawy „Beyond Bending – Learning from the past to design the better future¹” na piętnastej Międzynarodowej Wystawie Architektury – Biennale w Wenecji w 2016 roku.

Poniższe studium przypadku koncentruje uwagę na zastosowaniu metod matematycznych w procesie projektowania i produkcji cyfrowej sklepienia, którego struktura inspirowana była skórą pancernika.

Na potrzeby tego rozdziału, aby uzyskać szersze rozeznanie w zastosowaniach matematyki w procesie projektowym, nawiązano kontakt z Edytą Augustynowicz, która w ramach Block Research Group, ETH Zurich, Institute of Technology in Architecture była członkiem zespołu projektowego i badawczego opracowującego temat Armadillo Vault².

Autorami koncepcji są Philippe Block, John Ochsendorf oraz David Escobedo.

W skład zespołu opracowującego projekt *konstrukcyjny i architektoniczny* w ramach Block Research Group wchodził: Matthias Rippmann, Tom Van Mele, Mariana Popescu, Edyta Augustynowicz, Tomas Mendes Echenagucia, Cristian Calvo Barentin, Ursula Frick, Philippe

-
- 1 Tłumaczenie według autora: „Ponad wyginanie” - ucząc się z przeszłości, aby projektować lepszą przyszłość
 - 2 Block P., Rippmann M., Van Mele T., Popescu M., Augustynowicz E., Echenagucia T., Barentin C., Frick U., 2016. *The Armadillo Vault. Computational Design and Digital Fabrication of a Freeform Stone Shell*, Advances in Architectural Geometry



7.2 | ARMADILLO VAULT

Block z ETH Zurich, Institute of Technology in Architecture. Za inżynierię budowlaną odpowiada Ochsendorf DeJong & Block w składzie: John Ochsendorf, Matthew DeJong, Philippe Block oraz Anjali Mehrotra. Za produkcję i budowę odpowiada The Escobendo Group³.

7.1. Wytyczne projektowe

Przedmiot opracowania

Przedmiotem opracowania była forma sklepienia o podwójnej krzywiznie (Rys.7.1a), wykonana z bloczków wapiennych. Sklepienie to nie zawiera w sobie zaprawy (między bloczkami kamiennymi), utrzymuje się jedynie dzięki sile ścisku, mimo że zajmuje powierzchnię aż 75 m².



Rys.7.1a:
Armadillo Vault
zaprezentowany
w Corderie
dell'Arsenale podczas
Biennale Architektury w
Wenecji, w 2016 roku

źródło:
Block Research Group,
ETH Zurich, Institute of
Technology in
Architecture

Cel projektu

Celem projektu było zaprezentowanie dzieła w tematyce „Ponad wyginanie - ucząc się z przeszłości, aby projektować lepszą przyszłość”, godnego Międzynarodowej Wystawy Architektury w 2016 roku.

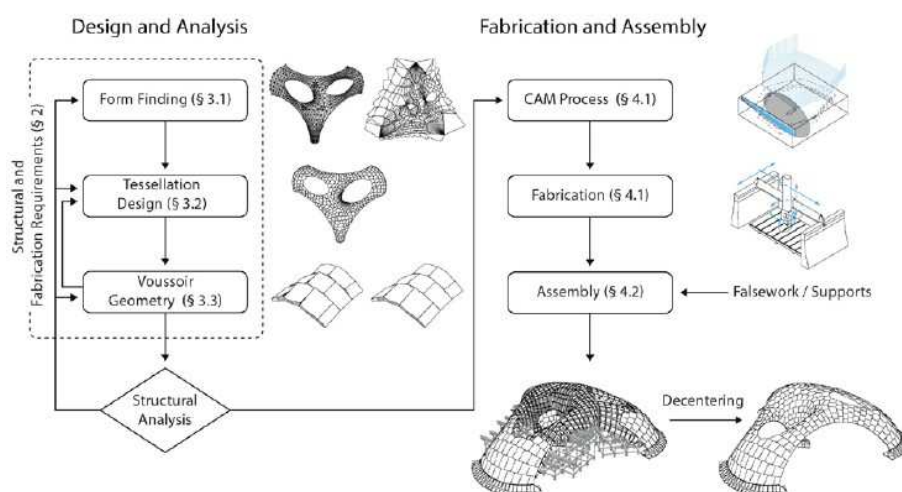
3 <http://www.armadillovault.com> 03.2022



7.2. Problemy projektowe

Projekt sklepienia (oraz jego poszczególnych elementów) był wedle zespołu projektowego całkowicie uzależniony od wielu ograniczeń, które wynikały z wymogów architektonicznych, konstrukcyjnych, procesu wytwarzania, jak również harmonogramu i ekonomiki.

Koordinacja procesu projektowego w odniesieniu do powyższych, stanowiła największe wyzwanie i przebiegała wedle poniższego schematu (Rys. 7.2a)⁴.



Rys.7.2a: Schemat obrazujący koordynację procesu projektowania, analizy i produkcji sklepienia

źródło:
Block Research Group,
ETH Zurich, Institute of
Technology in
Architecture

Dodatkowym utrudnieniem było niedopuszczenie mechanicznych połączeń z podłogą w miejscu montażu obiektu.

7.3. Idea projektowa

Odkrywanie form poprzez ograniczenia

Projekt odnosi się do stwierdzenia, że na przestrzeni dziejów mistrzowie budowlani odkrywali oryginalne, wyraziste formy POPRZEZ ograniczenia ekonomiczne,

⁴ <https://vimeo.com/167868985> – dokumentacja filmowa obrazująca proces powstawania Armadillo Vault 03.2022



ograniczenia wydajności, a nie wbrew tym ograniczeniom. Odwołuje się do czerpania z wcześniej ukształtowanych zasad architektonicznych i konstrukcyjnych, metod projektowania, analizy oraz logiki konstrukcyjnej, umiejscawiając powyższe w kontekście geometrii obliczeniowej i wytwarzania cyfrowego. Opowiada się za logiką form wyłączenie kompresyjnych (utrzymujących się jedynie przy pomocy sił ściskających), nie tylko ze względu na prezentowaną ekspresyjną estetykę, ale również ze względu na potencjał osiągnięcia efektywności i stabilności poprzez geometrię⁵.

Matematyczne pancerniki

Idea projektowa opiera się ponadto na podpatrywaniu z natury geometrii form pancerza ssaków łżyskowych z rzędu pancernikowców i matematycznego przeniesienia jej na strukturę projektowanego obiektu.

7.4. Forma, jako wynik koordynacji matematycznego zapisu wytycznych konstrukcyjnych, architektonicznych oraz produkcyjnych

W rozdziale skoncentrowano uwagę na zazębianiu się zastosowania zapisu matematycznego w procesie poszukiwania kształtu i formy geometrii sklepienia, dyskretyzacji⁶ powierzchni oporowej, metodach obliczeniowych opracowanych w celu wygenerowania

-
- 5 Block P., Rippmann, M., Van Mele, T., 2015. *Structural Stone Surfaces: New compression shells inspired by the past*, AD Architectural Design - A. Menges (editor) - Material Synthesis: Fusing the Physical and the Computational, 85(5): strony 74-79. London, John Wiley & Sons.
- 6 Dyskretyzacja jest pojęciem dotyczącym procesu transformacji modeli i równań funkcji ciągłych na ich dyskretne odpowiedniki. Stosuje się ją w początkowych fazach przygotowywania modeli i równań do ewaluacji numerycznej i w celu implementacji cyfrowej.



teselacji⁷, modelowania komputacyjnego, optymalizacji geometrii bloczków oraz w procesie obróbki.

W przypadku opisywanej złożonej geometrii i skomplikowanego procesu wytwórczego, względy technologiczne mają bezpośrednie przełożenie na decyzje architektoniczne. Powiązanie ze sobą projektu konstrukcyjnego z wydźwiękiem architektonicznym następowało w poniższych, kolejnych krokach.

Po pierwsze powierzchnię oporową (traktowaną jako środkową powierzchnię przekroju sklepienia) należało zaprojektować w procesie znajdowania kształtu formy. Kolejno, kamienie należało rozlokować zgodnie z wzorcem teselacji, biorąc pod uwagę specyfikę produkcji jak i montażu. Wreszcie, stabilność tak powstałej dyskretnej geometrii można było zweryfikować w różnych warunkach obciążenia na podstawie modelowania elementów dyskretnych.

Projektowanie występowało zatem wedle kolejnych podetapów: projekt powierzchni oporowej, projekt teselacji oraz projekt geometrii każdego z bloków kamiennych.

7.4.1. Poszukiwanie formy | projekt powierzchni oporowej

Forma podwójnie zakrzywionego sklepienia składa się z 399 oddzielnych bloczków wapiennych (kamieni w kształcie klina używanych do budowy łuku) o grubości od 5 do 12 cm. Sklepienie utrzymuje się za pomocą ścisku, zajmuje powierzchnię 75 m² i rozciąga się na ponad 15 m

⁷ Teselacja polega na podziale wygenerowanych wielokątów na mniejsze, aby dokładniej odwzorować zadaną geometrię.



7.6 | ARMADILLO VAULT

w czystej kompresji, bez zaprawy między blokami, ani innych połączeń konstrukcyjnych, poza trzema podporami liniowymi wzdłuż granicy i jedną podporą pośrodku. Konstrukcja w rzucie ma mniej więcej trójkątny kształt. Niepodparte krawędzie między podporami ograniczającymi tworzą otwory, które zapewniają dostęp do przestrzeni pod spodem. Umieszczone w centrum przestrzeni wystawienniczej kamienne sklepienie rozciąga się nad centralnym przejściem między dwoma wejściami i owija się wokół istniejących kolumn. Kolumny wnikają w powierzchnię konstrukcji przez dwa duże otwory, z których jeden jest częściowo podparty⁸.

Zaprojektowanie formy, która utrzymuje się jedynie poprzez siły nacisku jej elementów na siebie wymagało znalezienia odpowiedniego jej kształtu, który umożliwiłby utrzymanie się bez zaprawy. Strome nachylenia podwójnej krzywizny całej struktury zapewniły stabilne stany naprężeń ściskających w ciasnej kamiennej powłoce we wszystkich warunkach obciążenia (ciężar własny, obciążenia punktowe, obciążenia związane z trzęsieniami ziemi itp.). Aby zapobiec nadmiernemu gromadzeniu się ciężaru na środkowej podporze, ogólny kształt sklepienia musiał być względnie płytki.

Kształt sklepienia wynika z procesów opartych na analizie sieci oporowej⁹. Wstępne alternatywy projektowe zostały

8 Block P., Rippmann M., Van Mele T., Popescu M., Augustynowicz E., Echenagucia T., Barenin C., Frick U., 2016. *The Armadillo Vault. Computational Design and Digital Fabrication of a Freeform Stone Shell*, Advances in Architectural Geometry

9 Block, P. & Ochsendorf, J., 2007. *Thrust network analysis: a new methodology for three-dimensional equilibrium*. Journal of the international association for shell and spatial structures, 48(3), strony. 1–8.



naszkicowane przy użyciu RhinoVAULT¹⁰. Uzyskano pierwotny wzór siatki, którą następnie udoskonalono w oparciu o względy funkcjonalne i estetyczne. Przekształcona siatka posłużyła jako dane wejściowe dla procedury „najlepszego dopasowania¹¹”, która znajduje najbliższą możliwą sieć sił ściskających pod określonymi obciążeniami.

Podczas poszukiwań formy brano pod uwagę jedynie ciężar własny sklepienia. Odpowiedni rozkład grubości został obliczony na podstawie doświadczenia, względów estetycznych i zdrowego rozsądku. Podpory mające na celu możliwie równomierne rozłożenie ciężaru obciążeń sklepienia na posadzkę Corderie dell'Arsenale (gdzie nie dopuszczono mechanicznych połączeń z podłogą wewnątrz chronionego budynku) wykonano z płyt stalowych o grubości 20mm. System stalowych cięgien łączy podpory i pochłania napór poziomy sklepienia, jako że bez nich struktura nie byłaby stabilna.

Rozkład kierunków sił dla naporu poziomego w sieci został wyprowadzony z cech geometrycznych i strukturalnych trójwymiarowej geometrii docelowej i przedstawiony w postaci wykresu (Rys.7.4.1a(a)). Zastosowano algorytm najlepszego dopasowania, aby znaleźć konkretny rozkład sił wzdłuż tych kierunków, które odwzorowują trójwymiarową sieć możliwie najbliższej celu

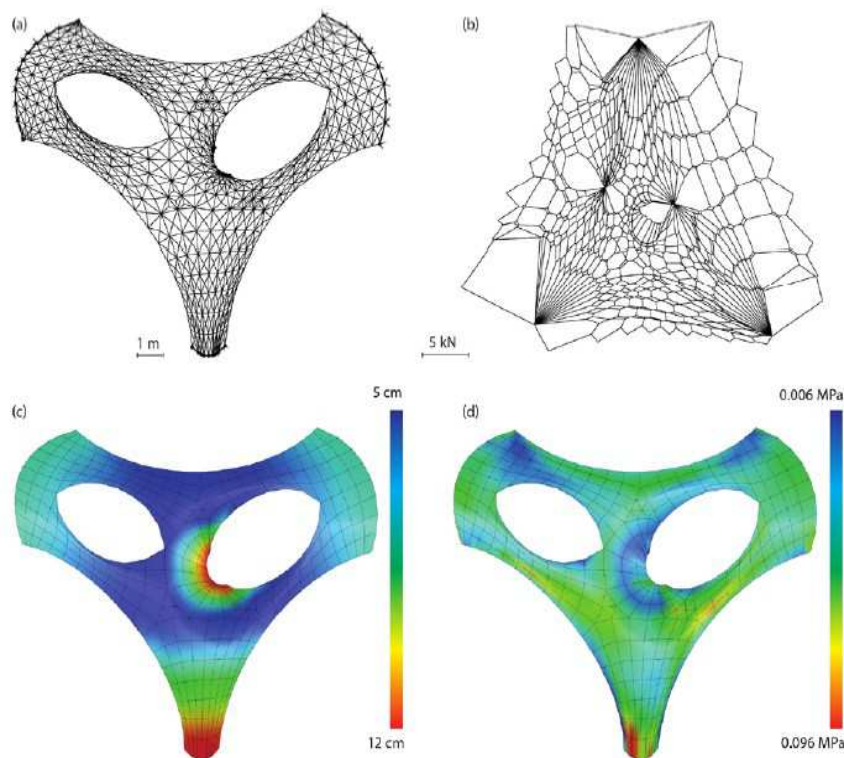
10 Rippmann M., Lachauer L., Block P., 2012. *Interactive Vault Design*. *International Journal of Space Structures*, 27(4): pp 219-230. Multi-Science Publishing.

11 Van Mele T., Panozzo D., Sorkine-Hornung O., Block P., 2014. *Best-fit Thrust Network Analysis - Rationalization of freeform meshes*. In S. Adriaenssens, P. Block, D. Veenendaal, C. Williams (editors) *Shell Structures for Architecture: Form Finding and Optimization*. Routledge.



7.8 | ARMADILLO VAULT

geometrycznego. Podczas tego procesu, aby móc znaleźć rozwiązania, które lepiej rozkładają naprężenia wzdłuż podpór i wprowadzają więcej podwójnej krzywizny zdecydowano się na zaktualizowanie celu geometrycznego. Wykres siły na rysunku Rys.7.4.1a(b) jest ostatecznym „najlepiej dopasowanym” rozkładem. Rysunek 7.4.1a(d) jest wizualizacją skupionych naprężeń w węzłach. Pokazuje, że naprężenia są niezwykle niskie, to znaczy trzy rzędy wielkości poniżej wytrzymałości na ściskanie wybranego kamienia (wapień o wytrzymałości na ściskanie 22 MPa). Na koniec uzyskaną sieć sił parcia można następnie przekształcić w siatkę, która po podziale i wygładzeniu stanowi reprezentację środkowej powierzchni kamiennej obudowy sklepienia.



Rys.7.4.1a:

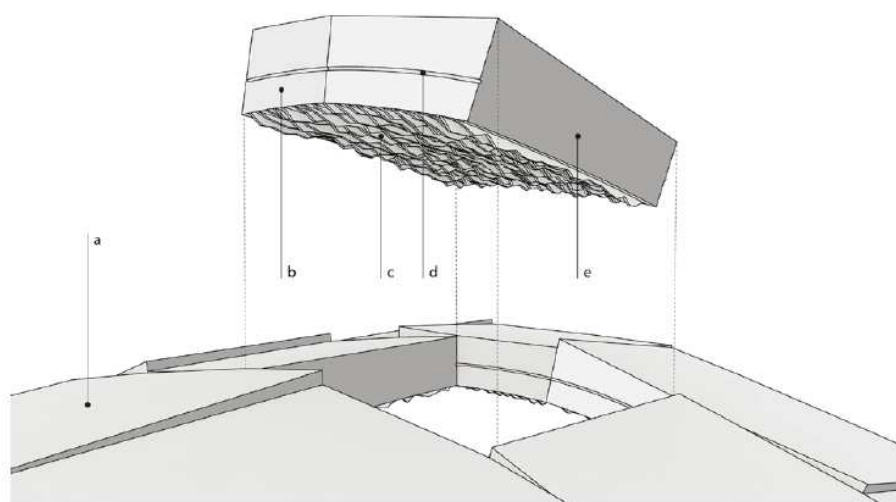
Wykresy ukazujące:
a) kierunki sił poziomych trójwymiarowej sieci
b) wielkości sił wzdłuż każdego z kierunków
c) rozkład grubości
d) naprężenia powierzchniowe wynikające z rozkładu sił i grubości

źródło:

Block Research Group,
ETH Zurich, Institute of
Technology in
Architecture

7.4.2. Teselacja formy | modularyzacja

Podział wygenerowanych podczas tworzenia modelu 3d wielokątów na mniejsze, w celu dokładniejszego zobrazowania geometrii, był wynikiem wymogów konstrukcyjnych i produkcyjnych, przy uzyskaniu kompromisu na temat rozważania estetyki tektoniki i rytmu. Zdecydowano się na naprzemienny rozkład kamieni, tak aby się one wzajemnie blokowały oraz aby odpowiednio wyrównać przepływy sił. Należało szczególnie zapobiec uszkodzeniom ślizgowym wzdłuż niepodpartych granic. Bloczki zostały rozmieszczone w układzie naprzemiennym (Rys.7.4.2a), dlatego też dwie płaskie powierzchnie boczne (e) nie biorą udziału w przenoszeniu obciążeń.



Rys.7.4.2a:

Pojedynczy bloczek hipotetycznie uniesiony ponad konstrukcję sklepienia:
 a) płaska powierzchnia zewnętrzna
 b) powierzchnia przenosząca obciążenia
 c) zakrzywiona, ryflowana powierzchnia wewnętrzna
 d) nacięcia rejestracyjne
 e) płaska powierzchnia boczna, nieprzenosząca obciążeń

Projektowanie wzoru teselacji rozpoczęto od zdefiniowania linii torów (przebiegów) na powierzchni oporowej. Powierzchnia oporowa jest reprezentowana przez siatkę czworokątów (Rys.7.4.2b(a)), której powierzchnie są wyrównane z układem sił określonych podczas wcześniej opisanego procesu wyszukiwania kształtu. Siatka ta daje pierwsze wskazówki dotyczące

źródło:
 Block Research Group,
 ETH Zurich, Institute of
 Technology in
 Architecture



orientacji, charakteru i odstępów w układzie linii przebiegów. Rzeczywisty projekt przebiegów utworzono ręcznie z zestawu krzywych geodezyjnych na powierzchni oporowej. Zastosowano niestandardowe narzędzia projektowe i monitorujące, aby pomóc kontrolować wstępnie zdefiniowane minimalne i maksymalne odstępy między torami, tak aby na przykład nie została przekroczona dopuszczalna waga średniego bloczka kamiennego na rząd, przy jednoczesnym zachowaniu lokalnego wyrównania z przepływem siły, czego efekt przedstawiono na Rys.7.4.2b(b). Następnie wygenerowano zestaw linii pionowych na przebieg zgodny z przepływem siły. Linie te definiują nacięcia obok siebie, skutkujące szorstkimi krawędziami po wewnętrznej stronie struktury. Szczególnym wyzwaniem było wyrównanie linii cięcia w przechodzeniu z jednego kursu do drugiego w taki sposób, aby przepływ sił stał się widoczny globalnie (w perspektywie całej powierzchni wewnętrznej, a nie tylko jednego bloczka) (Rys.7.4.2b(c)). Trzeba było wziąć pod uwagę ograniczenia dotyczące szerokości ostrza oraz minimalnej i maksymalnej dopuszczalnej szerokości zrywania. Ciągłość linii cięcia została osiągnięta poprzez przeniesienie punktów końcowych w jednym kursie do punktów początkowych w następnym. Biorąc pod uwagę zróżnicowaną geometrię sklepienia i wyżej wymienione ograniczenia, opracowano strategię stopniowego wstawiania lub usuwania dodatkowych linii cięcia. Następnie zdefiniowano początkową topologię teselacji, wybierając mniej więcej równomiernie rozmieszczone pionowe linie

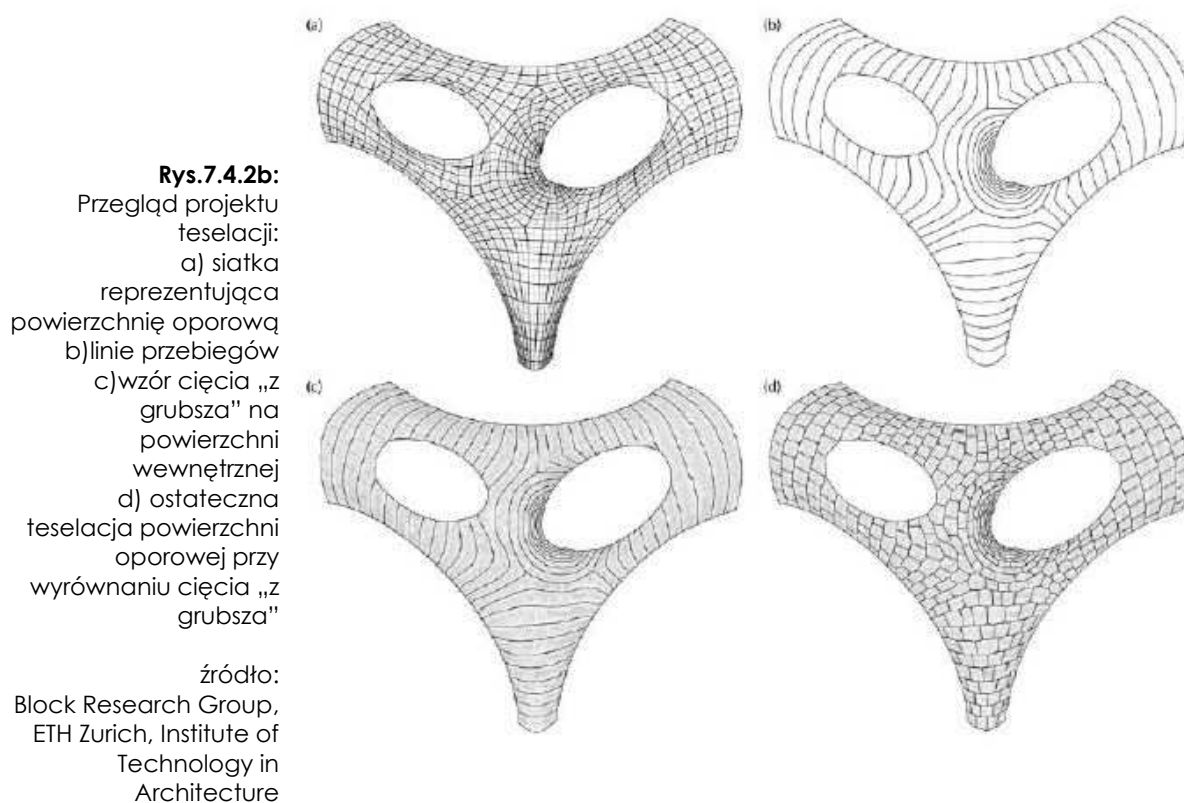
z wzorca opracowanego z grubsza. Zastosowanie zmiennych warunków brzegowych dla sąsiednich torów gwarantowało początkową konfigurację naprzemienną. Lokalnie, szczególnie blisko punktów szczególnych, ta topologia teselacji została dodatkowo zmodyfikowana ręcznie. Na tym etapie zastosowano algorytm, który maksymalizuje odległości między połączeniami sąsiednich pól teselacji (analogiczny w zasadzie działania do przedstawionego w rozdziale Research by design: Diagram Woronoja/ Tesselacja Dirichleta), co skutkowało osiągnięciem bardziej zbalansowanego rozkładu naprzemiennego, z większym nakładaniem się bloczków między sobą. Idealny przypadek nakładania się sąsiednich pól określono jako przesuniętych o połowę długości jednego względem drugiego¹²¹³. W tej iteracyjnej procedurze rozwiązywania linie złączy zostały automatycznie dopasowane do lokalnego wzoru opracowanego z grubsza. Ostateczną geometrię teselacji utworzono, czyniąc wszystkie powierzchnie wypukłymi (Rys.7.4.2b(d)). Udało się to osiągnąć poprzez skalowanie pionowych linii połączeń w oparciu o współczynnik skali zdefiniowany przez użytkownika i proporcjonalnie do wysokości przebiegu. W ostatecznym rezultacie stopień wypukłości wzrasta ku górze, aby przejścia między poszczególnymi elementami były jak najbardziej płynne.

12 Rippmann M., Block P., 2013. Rethinking Structural Masonry: Unreinforced, cut-stone Shells. *Proceedings of the ICE - Construction Materials*, 166(6): strony 378-389

13 Rippmann, M., 2016. *Funicular Shell Design: Geometric Approaches to Form Finding and Fabrication of Discrete Funicular Structures*. Ph. D. thesis, ETH Zurich, Department of Architecture



7.12 | ARMADILLO VAULT



7.4.3. Geometria bloczków kamiennych | planaryzacja

Geometria każdego z użytych bloczków kamiennych wynika z wzorca dyskretyzacji powierzchni oporowej (rozdział 7.4.1) oraz teselacji (rozdział 7.4.2), które określają rzędy i przebiegi kamieni.

Aby uszanować zadane ograniczenia obciążeniowe posadzki powierzchni wystawienniczej, grubość powłoki należało zredukować do absolutnego minimum. Graniczną wartość grubości kamieni określono na 5cm, aby uniknąć odpryskiwania i zapewnić odpowiednią ilość nacięć. Całkowita waga sklepienia wynosi około 23,7 ton, czyli porównywalnie mniej niż obciążenie ze względu na tłum ludzi, który mógłby się znajdować w strefach wykluczonego dostępu wokół podpór.



Geometria każdego z zastosowanych bloczków kamiennych została wygenerowana na podstawie teselacji powierzchni oporowej i wybranego rozkładu grubości. Każda z powierzchni bloczka (to znaczy powierzchnia zewnętrzna i wewnętrzna sklepienia, powierzchnie boczne przenoszące obciążenia i powierzchnie boczne nieprzenoszące obciążenia) została określona przez ograniczenia procesu produkcyjnego i ograniczoną ilość czasu w których musiały być one produkowane.

Każdy bloczek jest wypukły i ma płaską powierzchnię zewnętrzną sklepienia. Powierzchnie boczne nieprzenoszące obciążenia (to znaczy powierzchnie poprzeczne do linii przebiegów) są również płaskie. Powierzchnia wewnętrzna jest zawsze zakrzywiona, jako że całe wnętrze sklepienia jest zakrzywione. Wnętrze to zostało utworzone z równoległych cięć przez okrągłe ostrze, pozostawiając płetwy, które zostały ręcznie odkute. Pierwotnie powierzchnie przenoszące obciążenia (powierzchnie wyrównane z liniami przebiegów) były liniowane, ponieważ były wycinane za pomocą cylindrycznego narzędzia do profilowania, które tworzy (męskie i żeńskie) nacięcia.

Ponieważ powierzchnia sklepienia ma obszary z ujemną krzywizną Gaussa (co znaczy, że w niektórych obszarach jest antyklasyczna¹⁴), nie było możliwe utworzenie połączonej płaskiej dyskretyzacji części zewnętrznych

14 Promienie krzywizn w powierzchni antyklasycznej, o ujemnej krzywiznie Gaussa usytuowane są po jednej i drugiej jej stronie, jak na przykład w powierzchni siodłowej – Jurczykiewicz S., 2017, *Dachy Membranowe, Nowoczesne Hale*



sklepienia tylko z wypukłymi ścianami¹⁵¹⁶¹⁷. Dlatego też powierzchnia zewnętrzna każdego z bloczków została indywidualnie planaryzowana, tworząc rozłęczną dyskretyzację zewnętrznej strony sklepienia.

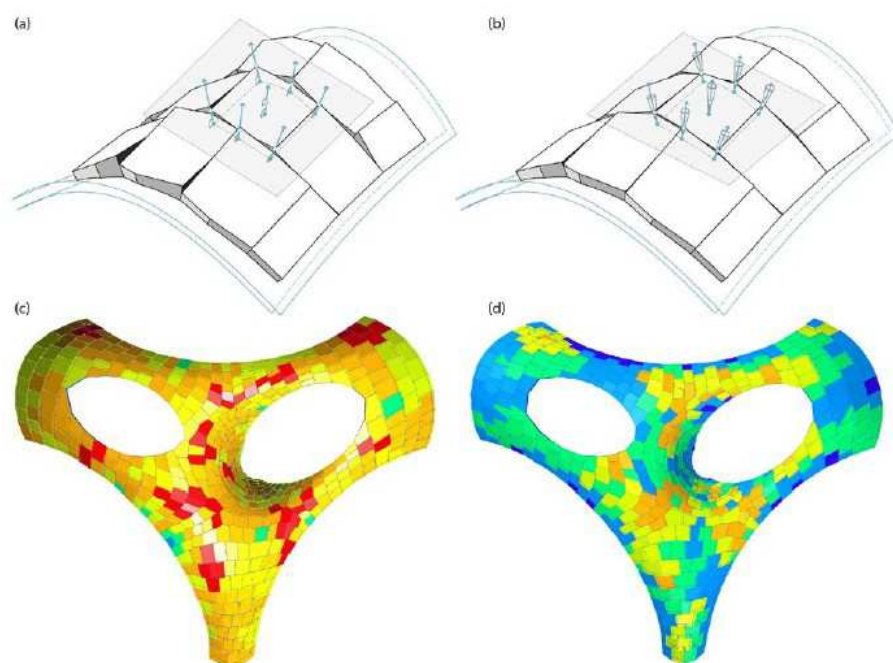
Proces planaryzacji podsumowano na rysunku 7.4.3a. Po pierwsze, rozłęczne powierzchnie planarne oparto na normalnej do środka ciężkości oryginalnej, gładkiej powierzchni zewnętrznej. Wykorzystano wektory normalne na analogicznej zasadzie działania, jak opisano to w rozdziale Research by design, w podrozdziale dotyczącym obłych elewacji modułowych, jednak nie odniosło to pożądanego skutku. Należy zauważyć, że zastosowanie takiego zabiegu odnoszącego się jedynie do wektorów normalnych podpowierzchni, na bardzo skomplikowanej geometrii stworzyło w tym przypadku nieakceptowalne, za duże, nieregularne i nieestetyczne odchylenia (Rys.7.4.3a(a)). Dodatkową wadą odchylen okazało się to, że znacznie zwiększały wagę sklepienia. Dlatego w drugim etapie rozszerzono działanie skryptu i umożliwiono ścianom planarnym obrót wokół normalnej w środku ciężkości oraz nieznaczne przesunięcia w górę i w dół (Rys.7.4.3a(b)). Wektorom normalnym w narożnikach również umożliwiono obrót. Podczas tej procedury teselacja części wewnętrznych była

-
- 15 Krieg O.D., Schwinn T., Menges A., Li J., Knippers J., Schmitt A., Schwieger V., 2014. *Biomimetic Lightweight Timber Plate Shells: Computational Integration of Robotic Fabrication*, Architectural Geometry and Structural Design. In P. Block, J. Knippers, N.J. Mitra, W. Wang (editors) *Advances in Architectural Geometry 2014*: strony 109-125. Springer
- 16 Li, Y., Liu, Y. & Wang, W., 2015. *Planar hexagonal meshing for architecture*. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 21(1), strony 95–106
- 17 Pottmann, H., 2015. *Architectural geometry*. *Computers and Graphics (Pergamon)*, 47(2015), strony 145–164



utrzymywana na stałym poziomie. Skutkiem powyższego, wektory łączące odpowiednie górne i dolne narożniki bloczków kamiennych nie były już idealnie wyrównane z wektorami normalnymi powierzchni oporowej. Jednak to odchylenie okazało się być ograniczone zaledwie do 5 stopni względem pierwotnego wektora normalnego. Na etapie przetwarzania końcowego, powierzchnie nieprzenoszące obciążeń zostały spłaszczony, bez zmiany geometrii powierzchni przenoszących obciążenie, oraz dodano linie nacięcia.

Po tym procesie optymalizacji, przechodząc od jednego kamienia do drugiego dało się zauważyć uskok w zakresie 2 - 5 cm. Dolna granica 2 cm została wprowadzona, aby zachować jednolity i zrównoważony wygląd całej formy. Ostateczna „chropowata” konfiguracja nadała sklepieniu nawiązanie do łuski lub pancerza, co kontrastuje z gładko zakrzywioną powierzchnią wewnętrzną.



Rys.7.4.3a:
Zasys projektu geometrii bloczków kamiennych:
a) nieestetyczne odchylenia oparte na wektorach normalnych dzielonej powierzchni
b) złagodzony efekt po umożliwieniu obrotu i przesunięć wektorów normalnych
c) odchylenia od dozwolonego minimum w pierwotnej fazie
d) odchylenia docelowe

źródło:
Block Research Group,
ETH Zurich, Institute of
Technology in
Architecture

7.4.4. Produkcja CNC, „wafłowa” podkonstrukcja i montaż

Produkcja opierała się na procesie obróbki CNC w połączeniu z praktycznymi rozważaniami na temat montażu¹⁸.

Głównym celem procesu produkcyjnego było ograniczenie średniego czasu cięcia. Dodatkowo wymagana precyzja wszystkich kamieni na zamówienie wymagała bardzo dokładnego procesu produkcyjnego. Aby przyspieszyć proces produkcyjny, należało tak zaprojektować bloczki kamienne, aby ich powierzchnia zewnętrzna była płaska.

Należało ponadto ograniczyć dopuszczalną wagę bloczków (do 45 kg w górnych partiach i 135 kg w pobliżu podpór), jako że na placu budowy nie można było używać ciężkiego sprzętu (kamieniarze wspomagani byli jedynie przez lekkie podnośniki montowane na rusztowaniach). Wykonanie i montaż sklepienia z ciosanego kamienia było wynikiem połączenia metod tradycyjnych z cyfrowymi, w celu wybudowania zaprojektowanej geometrii z możliwie wysoką precyzją. Geometria każdego z bloczków kamiennych została przetworzona cyfrowo i za pomocą dedykowanego oprogramowania CAM, po zaimportowaniu geometrii cięcia bloczków z Rhinoceros, wygenerowany został odpowiedni kod do obróbki CNC. Importowana geometria zawierała powierzchnie, które określały kształt bloczka oraz dodatkowe elementy geometryczne używane do definiowania ścieżek cięcia.

¹⁸ Block P., Rippmann M., Mele T., Escobedo D., 2017, The Armadillo Vault: Balancing computation and traditional craft, Fabricate, UCL Press



Sklepienie zostało zmontowane w podobny sposób, jak tradycyjne sklepienia murowane. Każdy bloczek kamienny był w pełni podtrzymywany przez wykonaną na zamówienie ramę. Rusztowania do montażu podtrzymywały cztery konstrukcje „wafłowe” ze sklejki, po jednej dla każdego wspornika sklepienia (Rys.7.4.4a).



Rys.4.4.4a:
„Wafłowa”
podkonstrukcja ze
sklejki

źródło:
Block Research Group,
ETH Zurich, Institute of
Technology in
Architecture

Aby zminimalizować ilość wymaganego materiału, „gofry” były zaprojektowane na osobnych, prostopadłych siatkach wyrównanych do głównych kierunków każdej sekcji nośnej. Elementy w podłużnych kierunkach podparcia zostały umieszczone jak najbardziej prostopadle do bloczków kamiennych, aby zwiększyć sztywność. Rozważano nieortogonalne, geometrycznie złożone „gofry”¹⁹, które byłyby potencjalnie sztywniejsze i lżejsze, jednak ze względu na czas montażu i złożoność geometrii uznano je za niepraktyczne i odrzucono takie rozwiązanie.

Kamienie były osadzane na podkonstrukcji ręcznie, rozpoczynając równomiernie ze wszystkich stron na dole i zbiegając w kierunku „zworników” u góry. Wynikowe tolerancje procesu cięcia na 5-osiowej maszynie CNC wynosiły od 0,4 do 0,8 mm. Każdy z kamieni został

¹⁹ Schwartzburg Y., Pauly M., 2013. *Fabrication-aware Design with Intersecting Planar Pieces*. In I. Navazo, P. Poulin (editors) *Proceedings of Eurographics 2013*. Girona, Spain



umieszczony na „wafłu” za pomocą podkładek, co pozwoliło na korektę jego położenia i nachylenia. Pozycja każdego kamienia była kontrolowana za pomocą nacięć rejestracyjnych i oceniana poprzez weryfikację idealnego wyrównania interfejsów. Ponadto, do pomiaru czterech punktów narożnych płaskich powierzchni zewnętrznej bloczków i porównania ich z chmurą punktów pobraną bezpośrednio z modelu cyfrowego użyto tachimetrów.

Ze względu na to, że oddzielne załogi pracowały jednocześnie na różnych podporach, na górze skumulowały się niedoskonałości i tolerancje konstrukcyjne. Różnice geometryczne między sklepieniem zaprojektowanym, a powykonawczym zostały rozwiązane poprzez stworzenie „zworników”, które idealnie pasowały do zbudowanej geometrii. Niestandardowe „zworniki” zostały wycięte po umieszczeniu wszystkich innych bloczków i zmierzeniu ich prawidłowego kształtu na miejscu. Alternatywnym rozwiązaniem byłby montaż od góry do dołu, co umożliwiłoby usunięcie niedoskonałości podpór poprzez fugowanie²⁰, jednak takie rozwiązanie odrzucono ze względu na złożoność warunków podparcia.

7.5. Wnioski

Projekt Armadillo Vault zdecydowanie odniósł sukces i zrealizował swój cel podczas Biennale, prezentując wyjątkowe, zaawansowane technologicznie dzieło, obok którego trudno przejść obojętnie. Pod kątem tej pracy badawczej ukazał formę architektoniczną, jako zbiór

²⁰ Ochsendorf J., Helbig T., Fivet C., Yoon J.M., 2016. Segmented Granite vault in Cambridge. Detail Structure: 01/2016



matematycznych powiązań występujących na każdym etapie projektowania i realizacji. Sposób wzajemnego nakładania się na siebie matematycznych aspektów projektowania architektonicznego obrazuje współczesny stopień zaawansowania zastosowań technologii opartych na matematycznym zapisie. Obrazuje jak wiele założeń koncepcyjnych technologicznie udaje się przełożyć na język matematyki i w dodatku jak można wykorzystać jej obecność do dodatkowej optymalizacji formy.

Złożony proces projektowania i wytwarzania form tego pokroju jest możliwy tylko przy pomocy zintegrowanego układu obliczeniowego. Analiza danych dotyczących rozkładu ciężaru narzuciła względnie płytki wymagany kształt całego sklepienia, lecz na tyle strome nachylenia krzywizny, aby umożliwić wykonanie formy utrzymującej się całkowicie dzięki sile ścisku. Obliczenia dotyczące rozkładu naprężeń nakierowały projektantów na dostosowanie pierwotnie zakładanego celu geometrycznego.

Projekt teselacji powstał docelowo „ręcznie”, jednak obliczenia dotyczące sugerowanego przebiegu krzywych geodezyjnych stanowiły względnie dokładny punkt wyjścia do ich określenia. Wygenerowana siatka określiła orientację, charakter i odstępy, narzucając prowadzenie linii przebiegu. Opracowane narzędzia bazujące na obliczeniach matematycznych monitorowały dodatkowo konsekwencje projektowe przyjmowanych odstępów między poszczególnymi torami. Dodatkowe algorytmy wspomagały teselacje „ręczną” w obrębie punktów szczególnych.

7.20 | ARMADILLO VAULT

Efekty działania skryptu użytego do rozkładu bloczków oparte na wektorze normalnym okazały się niesatysfakcjonujące i wymagały od zespołu projektowanego rozbudowy algorytmu (pod kątem „pancernikowanej” w założeniu struktury) o dodatkowe dane, umożliwiające dodatkowe obroty i przesunięcia elementów.

Wymagania produkcyjne (i czasowe) narzuciły płaską powierzchnię zewnętrzną bloczków, co nie wpłynęło jednak negatywnie na końcowy odbiór projektu.

Precyzja procesu produkcji cyfrowej zminimalizowała błędy w znacznym stopniu, lecz ich nie wykluczyła. Ręczne regulacje kamieniarzy, oparte na ich doświadczeniu okazały się niezbędne podczas montażu.

Współpraca pomiędzy Block Research Group, ETH Zurich, Ochsendorf DeJong & Block (ODB Engineering) i The Escobedo Group na wielu etapach oparta była na dyskusjach o podłożu matematycznym. Efekt finalny w odniesieniu do idei projektowej otwiera dyskusję nad rozważaniami dotyczącymi wyrazistych, a jednak wydajnych konstrukcji, stawiając ekonomikę rozwiązań projektowych wysoko na liście priorytetów.

Rys.7.5a:
Efekt finalny
prezentowany w
Corderie dell' Arsenale

źródło:
Block Research Group,
ETH Zurich, Institute of
Technology in
Architecture



8. ZASTOSOWANIE METOD MATEMATYCZNYCH W UJĘCIU ARCHITEKTONICZNYM W PROJEKCIE BADAWCZYM CoDeFa | PARAMETRYCZNE DREWNIANE SYSTEMY ELEWACYJNE

CoDeFa, czyli w rozwinięciu *Collaborative Design of Prefabricated Façade Systems*¹ jest projektem badawczym, który zakłada powiązanie projektowania architektonicznego i procesów wytwórczych, w celu uzyskania zindywidualizowanej ekspresji fasad drewnianych przy zachowaniu efektywności ekonomicznej.

Projekt powstał przy współpracy Institute Integrative Design (obecnie ICDP), HGK FHNW i ERNE AG Holzbau². W skład zespołu badawczego wchodził: Edyta Augustynowicz, Maria Smigielska, Daniel Nikles, Thomas Werle i Heinz Wagner.

Rozdział został opracowany na podstawie materiałów otrzymanych od Edyty Augustynowicz (ERNE AG Holzbau/IID, FHNW).



Rys.8a:
Demonstracja zastosowania wyników badań projektu CoDeFa na elewacjach tymczasowego budynku biurowego

źródło:
IID, HGK, FHNW,
ERNE AG Holzbau

- 1 Wspólne projektowanie prefabrykowanych systemów elewacyjnych
- 2 Augustynowicz E., Smigielska M., Nikles D., Wehrle T., Wegner H., 2021, *Parametric design and multirobotic fabrication of wood facades*, Acadia 2021



8.1. Cel badawczy

Nadrzędnym celem projektu badawczego było podniesienie jakości środowiska zabudowanego poprzez zapewnienie wydajności produkcyjnej elementów elewacji drewnianych, bez poświęcania swobody projektowania³.

8.2. Stan badań | Wykorzystanie zapisu matematycznego w projektowaniu i produkcji prefabrykowanych fasad drewnianych

Drewniane prefabrykowane fasady są współcześnie nadal konstruowane przede wszystkim ręcznie⁴, mimo że jest to czasochłonne, generuje wysokie koszty i ogranicza projektanta do prostych, modułowych rozwiązań. W dodatku wymaga rozszerzania projektu o rysunki warsztatowe, wykonywane przez producenta, co również przyczynia się do wydłużenia procesu projektowego i często burzy zamysł architektoniczny.

Poprawy efektywności w branży budowlanej w powyższym zakresie dopatruje się we współpracy między poszczególnymi uczestnikami procesu powstawania budynku⁵.

Koncept Integrated Project Delivery⁶ (IPD) w obliczu rosnącej złożoności w branży budowlanej⁷ zyskuje na aktualności. Modelowanie informacji o budynku (BIM) nie rozwiązuje jednak problemów wszystkich uczestników

3 <https://codefacades.ch/> 03.2022

4 Koolhaas R., 2018, *Elements of Architecture*. Taschen

5 Mehrjerdi, Y. Z., 2009, *Excellent Supply Chain Management*. Assembly Automation

6 Zintegrowana realizacja projektu

7 Kolarevic B., 2009, *Towards Integrative Design*, International Journal of Architectural Computing 7 (3)



procesu budowlanego⁸ i pomija pewne aspekty organizacji cyfrowej, których koordynacja jest problematyczna^{9,10,11,12}. Podstawowe oprogramowanie BIM wymaga wprowadzenia dodatkowych narzędzi w przypadku projektowania i produkcji niestandardowych elementów budowlanych¹³.

Jako alternatywę do powyższych, w projektach akademickich, takich jak np. *BUGA Wood Pavilion*¹⁴, stosuje się niestandardowe platformy *digital-to-fabrication* dedykowane pod konkretny projekt. Późniejsze zastosowanie ich na szerszą skalę jest niemożliwe.

Montaż konstrukcji drewnianych za pomocą wielu robotów naraz jest niezbadaną dziedziną.

W analogicznych badaniach dotyczących składania metali, cięcia gorącym drutem lub nawijania włókien

-
- 8 Çıdık M.S., Boyd D., Thuraiajah N., 2017, *Ordering in Disguise: Digital Integration in Built-Environment Practices*. *Building Research and Information* 45 (6)
- 9 Dossick C., Neff G., 2011, *Messy Talk and Clean Technology: Communication, Problem-Solving and Collaboration Using Building Information Modelling*. *Engineering Project Organization Journal* 1 (2): 83–93
- 10 Harty C., 2008, *Implementing Innovation in Construction: Contexts, Relative Boundedness and Actor-Network Theory*. *Construction Management and Economics* 26 (10): 1029–41
- 11 Whyte J., Lobo S., 2010, *Coordination and Control in Project-Based Work: Digital Objects and Infrastructures for Delivery*. *Construction Management and Economics* 28 (6): 557–67
- 12 Whyte J., 2011, *Managing Digital Coordination of Design: Emerging Hybrid Practices in an Institutionalized Project Setting*. *Engineering Project Organization Journal* 1 (3)
- 13 Wang Z., 2021, *Real Design Practice, Real Design Computation*. *International Journal of Architectural Computing* 19 (1)
- 14 Alvarez M., Wagner H.J, Groenewolt A., Krieg O.D., Kyjanek O., Sonntag D., Bechert S., Aldinger L., Menges A, Knippers J., 2019, *The Buga Wood Pavilion Integrative Interdisciplinary Advancements of Digital Timber Architecture*. *Ubiquity and Autonomy - Paper Proceedings of the 39th Annual Conference of the Association for Computer Aided Design in Architecture, ACADIA 2019*, 490–500

8.4 | CoDeFa

doprowadził do zwiększenia szybkości produkcji, umożliwienia powiększenia rozmiaru budowanych obiektów oraz rozszerzenia spektrum możliwości projektowych¹⁵¹⁶¹⁷. Badania dotyczące stosowania robotów w bezpodporowych konstrukcjach przestrzennych wykonanych z metalowych prętów, cegieł czy drewna wykazały zmniejszenie ilości odpadów, zmniejszenie kosztów i czasu produkcji (dzięki rezygnacji z podbudowy), jednak wymagały bardzo skomplikowanego planowania całej produkcji¹⁸¹⁹.

8.3. Określenie problemów badawczych

Współcześnie odczuwalne jest promowanie ustandaryzowanych rozwiązań budowlanych, co jest może i bardziej opłacalne, jednak hamuje innowacyjne podejście do projektowania architektonicznego, a co za tym idzie odbija się negatywnie na jakości i specyfice wyrazu środowiska zabudowanego. Brak zapewnienia interdyscyplinarnej integracji i przepływu informacji w branży budowlanej²⁰ nie pozwala na wykorzystywanie w pełni postępu technologicznego. Rozbieżne cele

15 Saunders A., Epps G., 2016. *Robotic Lattice Smock*. *Robotic Fabrication in Architecture, Art and Design 2016*

16 Rust R., Jenny D., Gramazio F., Kohler M., 2016. *Spatial Wire Cutting : Cooperative Robotic Cutting of Non-Ruled Surface Geometries for Bespoke Building Components*. CAADRIA 2016, 21st International Conference on Computer-Aided Architectural Design Research in Asia - Living Systems and Micro-Utopias: Towards Continuous Designing

17 Parascho S., Gandia A., Mirjan A., Gramazio F., Kohler M., 2017. *Cooperative Fabrication of Spatial Metal Structures*. *Fabricate 2017*. UCL Press, 24–29

18 Parascho S., Han I.X., Walker S., Beghini A., Bruun E., Adriaenssens S., 2020. *Robotic Vault: A Cooperative Robotic Assembly Method for Brick Vault Construction*. *Construction Robotics 4* (3–4)

19 Thoma A., Adel A., Helmreich M., Wehrle T., Gramazio F., Kohler M., 2019. *Robotic Fabrication of Bespoke Timber Frame Modules*. *Robotic Fabrication in Architecture, Art and Design 2018*. Cham: Springer International Publishing



i indywidualne interesy czynią projektowanie, inżynierię i produkcję odrębnymi dyscyplinami. Architekci często mają ograniczoną wiedzę na temat procesów produkcyjnych, a wytwórcy często ustandaryzowują intencje architektów²¹. Odbija się to na obserwowaniu w urbanistyce anonimowych, typowych, niecharakterystycznych pierzei miejskich.

8.4. Idea projektowa

Projekt widzi potrzebę ścisłej konwergencji procesów projektowania architektonicznego i procesów produkcyjnych i w tej korelacji dopatruje się potencjału w osiąganiu innowacji technologicznych. Bazuje na współpracy inżynierów wyrobów drewnianych, architektów, specjalistów od robotyki i programistów. Wyznacza nowatorskie podejście do zarówno projektowania, jak i produkcji prefabrykowanych systemów elewacyjnych, jako że za równorzędne cele ustanawia uzyskanie zindywidualizowanych, jak również ekonomicznych efektów. Zakłada ułatwienie interdyscyplinarnej komunikacji w procesie projektowania, za pomocą łączenia lokalnych, tradycyjnych technik rzemieślniczych z innowacyjną technologią cyfrową. Połączenia powyższych dopatruje się w postaci zapisu matematycznego.

Innowacje, które wprowadza projekt, to wspólne podejście do projektowania (to znaczy integrację architektów, inżynierów i wytwórców), nowe cyfrowe

²⁰ Kolarevic B., 2009, *Towards Integrative Design*. International Journal of Architectural Computing 7 (3)

²¹ Correa D., Krieg O.D., Meyboom A.L., 2019, *Beyond Form Definition: Material Informed Digital Fabrication in Timber Construction*. Lecture Notes in Civil Engineering. Vol. 24



8.6 | CoDeFa

narzędzia do projektowania i wytwarzania oraz nowatorskie procesy wytwarzania za pomocą wielu robotów naraz.

W założeniu, projekt ma uczynić architektów w znacznym stopniu bardziej świadomych sposobów wytwórstwa, a co za tym idzie, efektów jakie są w stanie uzyskać. Odbywać ma się to za pomocą konceptu cyfrowego rzemiosła, jako nadrzędnej wartości w sferze przemysłu.

8.5. Metody badawcze

8.5.1. Współpraca interdyscyplinarna | warsztaty

Badania oparto na założeniu, że potrzeby klientów wpływają na procesy produkcyjne²² oraz na strategiach projektowych opartych na współpracy, których celem jest zwiększenie wkładu każdego uczestnika procesu budowlanego na wczesnym etapie projektowania²³.

W omawianym projekcie wspólne podejście objawia się w trzech obszarach:

1. Zrozumienie oczekiwań architektów wobec prefabrykowanych systemów fasadowych.

W tym zakresie zorganizowano, wykłady, dyskusje i warsztaty (składające się z praktycznych eksperymentów cyfrowych i fizycznych z pomniejszymi systemami fasad drewnopochodnych) z jedenastoma biurami architektonicznymi oraz przeprowadzono ankietę

²² Salvador F., Martin de Holan P., Piller F., 2009, *Cracking the Code of Mass Customization*. MIT Sloan Management Review 50 (3)

²³ Achten H.H., 2002, *Requirements for Collaborative Design in Architecture*. In *Proceedings of the 6th Design & Decision Support Systems in Architecture & Urban Planning Conference*, edycja: H.J.P. Timmermans H.J.P., de Vries B., 1–13. Eindhoven



online. Wnioski z powyższych pokierowały kolejnymi pracami badawczymi.

Na tym etapie nastąpiła współpraca pomiędzy zespołem badawczym, partnerami przemysłowymi oraz architektami.

2. Rozwój cyfrowego narzędzia do projektowania, na podstawie wymagań konstrukcyjnych i materiałowych.

Na tym etapie nastąpiła integracja zespołu badawczego z inżynierami drewna.

3. Wzmocnienie oczekiwań architektów za pomocą niestandardowych narzędzi do projektowania parametrycznego oraz konfrontacja z wytycznymi inżynierskimi firmy.

W tym zakresie zorganizowano warsztaty instruktażowe na temat możliwości produkcyjnych firmy Erne oraz optymalizacji materiałów i ceny.

Uczestnikami tego obszaru byli partnerzy przemysłowi i architekci.

8.5.2. Opracowane narzędzia cyfrowe

W odpowiedzi na określone problemy badawcze, zespół naukowców opracowujących projekt CoDeFa opracował cyfrowe narzędzia, których celem nadrzędnym było umożliwienie architektom swobody projektowania elewacji drewnianych, przy minimalnych zmianach w kodzie. Narzędzia przeznaczone dla architektów zostały opracowane jednak niezależnie od tych dedykowanych produkcji.



8.8 | CoDeFa

Z myślą o architektach opracowano pierwsze narzędzie, które umożliwia generowanie różnorodnych elewacji, w zgodzie z właściwościami materiałowymi drewna oraz standardami firmy ERNE AG Holzbau.

Danymi wejściowymi dla narzędzia są ściany zewnętrzne i otwory okienne i drzwiowe wprowadzane do skryptu jako płaskie krzywe wielokątne. Wpływ na projektowaną elewację mają zarówno dostępne parametry geometryczne, jak i numeryczne, czy oparte na wyborze. Charakter elewacji określany jest za pomocą takich sparametryzowanych aspektów jak kąt nachylenia listewek drewnianych, układy sekwencyjne, obramówki okienne (owijanie listew wokół otworów), wielkość szczelin między elementami, podziały belek wzdłuż długości, szerokość, głębokość, kąt ścięcia.

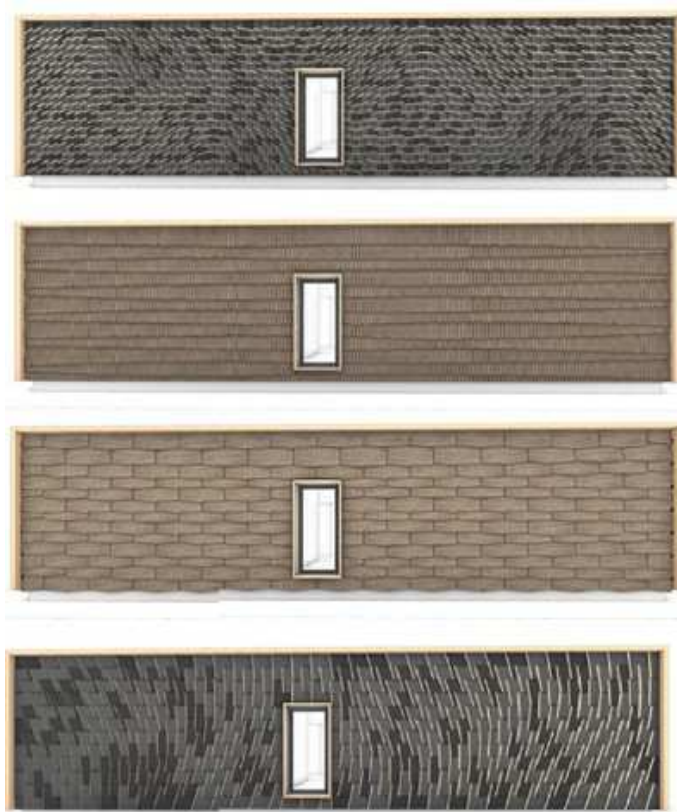
Skrypt na podstawie określenia powyższych informacji generuje osie belek i kolejno geometrię 3D-Brep, z uwzględnieniem nacięć listew w celu umożliwienia swobodnego przepływu wody. W dalszym kroku geometria podlega deformacjom wynikającym z wybranego procesu wytwarzania, np. frezowania.

Co również istotne, na tym etapie skrypt kalkuluje dane dotyczące kosztów projektowanej elewacji na m² oraz czasu potrzebnego na produkcję. Te informacje zwrotne obliczane są na podstawie objętości materiału, liczby elementów i średniego czasu montażu, jaki potrzebuje robot.

Narzędzie to umożliwia architektom podejmowanie bardziej świadomych decyzji, jest punktem wyjścia od

zamysłu projektowego, a za razem ogniwem łączącym projektowanie architektoniczne z procesem wytwórczym, jako że stanowi podstawę do dyskusji pomiędzy projektantem, a producentem. Autorzy badań organizują warsztaty przy udziale projektantów wyspecjalizowanych w projektowaniu cyfrowym, aby możliwie skrupulatnie odwzorować matematycznie estetykę proponowaną przez architektów. W idealnym scenariuszu architekci jako zawód powinni rozszerzać swoją wiedzę na temat projektowania komputacyjnego i implementować możliwości obliczeniowe opracowywanych narzędzi do swoich projektów.

Możliwe efekty zastosowań narzędzia obrazują poniższe grafiki (Rys.8.5.2a).



Rys.8.5.2a:
Różnorodność geometrii wytworzonych za pomocą generatywnych narzędzi projektowych w projekcie CoDeFa – elewacje płytowe, w których parametrami są szerokość, długość, kształt spodniej części i kierunek płyt

źródło:
IID, HGK, FHNW,
ERNE AG Holzbau



Rys.8.5.2b:

Różnorodność geometrii wytworzonych za pomocą generatywnych narzędzi projektowych w projekcie CoDeFa – elewacje belkowe, gdzie parametrami są wielkość szczelin, układ sekwencyjny, kąt, długość i szerokość listew

źródło:

IID, HGK, FHNW, ERNE AG Holzbau



Rys.8.5.2c:

Różnorodność geometrii wytworzonych za pomocą generatywnych narzędzi projektowych w projekcie CoDeFa – elewacje mieszane, gdzie jako parametr określono liczbę warstw, wzór, rytm oraz typologię elementów

źródło:

IID, HGK, FHNW, ERNE AG Holzbau



W kolejnym kroku zastosowano narzędzie obsługiwane przez przeszkolonych inżynierów, które bazuje na geometrii Brep wygenerowanej w pierwszym narzędziu i tworzy dane produkcyjne (w postaci plików .src). dla dwóch robotów. Celem narzędzia jest przygotowanie plików do produkcji zrobotyzowanej. Określa ono min. kolejność montażu, strategię zamawiania, czy dba o unikanie kolizji chwytaków.

Oba narzędzia opracowano we wtyczce Grasshopper dla Rhinoceros z niestandardowymi komponentami Pythona. Narzędzie drugie ponadto korzysta z wtyczki KUKA |Prc²⁴, która usprawnia planowanie ścieżek robotów. Elastyczność całego procesu ułatwia fakt, że dane wejściowe dla drugiego narzędzia nie muszą koniecznie pochodzić z pierwszego, mogą zastąpić je inne oprogramowania do projektowania parametrycznego.

Opracowany system wytwarzania łączył w sobie w większości zautomatyzowane procedury, uzupełniając je o kilka ręcznych operacji dla procesów przygotowawczych i końcowych.

Każdy z opracowanych przypadków wymagał innego zestawu metod do produkcji i montażu. Konfiguracja produkcji została opracowana zgodnie z logiką „elastycznej automatyzacji²⁵”.

Projekt i produkcję opracowywano równolegle, za pomocą eksperymentów i prototypów, czego rezultatem

²⁴Braumann J., 2020, *KUKA |prc. Association for Robots in Architecture*

²⁵Löfving M., Almström P., Jarebrant C., Wadman B., Widfeldt M., 2018, *Evaluation of Flexible Automation for Small Batch Production*. *Procedia Manufacturing*. Vol. 25



jest wzmocnienie dialogu pomiędzy oboma tymi płaszczyznami²⁶. Na poziom elastyczności wpłynęła świadoma rezygnacja z pełnej automatyzacji, która w wielu przypadkach skutkuje słabą wydajnością^{27,28}. System rozdziela zadania z łańcucha produkcyjnego na zautomatyzowane i ręczne procedury. Procesy zrobotyzowane poprawiają precyzję, wydajność i szybkość, jednak jakość materiału i wykończenia oparto na umiejętnościach manualnych stolarzy.

8.6. Demonstracja efektu projektu CoDeFa

W ramach demonstracji rezultatów warsztatów projektowych zaprojektowano i wykonano cztery unikatowe fasady jednokondygnacyjnego budynku biurowego. W zamyśle przód i tył tworzą obramowanie elewacji bocznych. (Rys.8.6a).

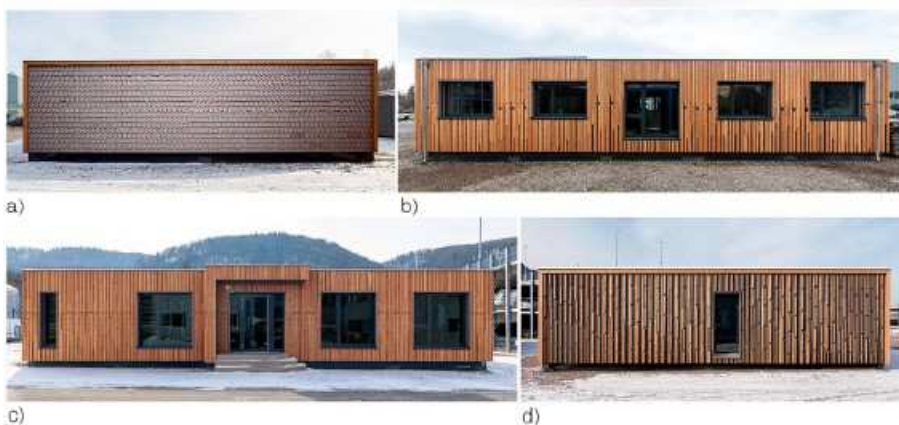
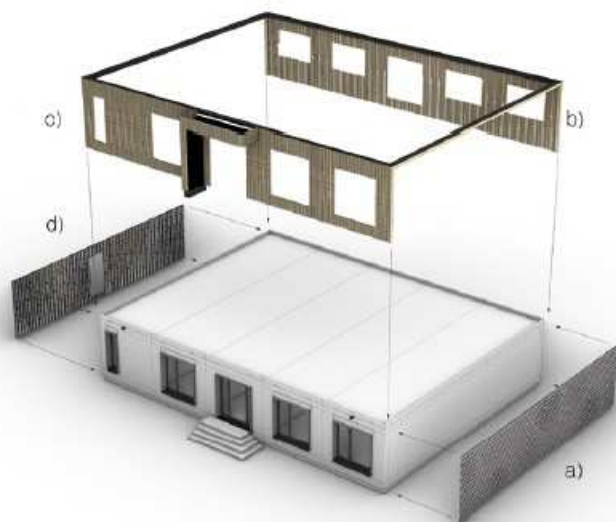
Prezentowane okładziny elewacyjne stanowią współczesną interpretację najpopularniejszych szwajcarskich typów elewacji (Rys.8.6b), tym samym prezentując różnice w logice ich konstruowania i wyzwania dla opracowywania elastycznego systemu projektowania i wytwarzania.

26 Gramazio F., Kohler M., Langenberg S., 2014, *MARIO CARPO IN CONVERSATION WITH MATTHIAS KOHLER*. *Fabricate* 2014,12-21, London

27 Endsley, 1997, *Level of Automation: Integrating Humans and Automated Systems*. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society*, 1:462-92

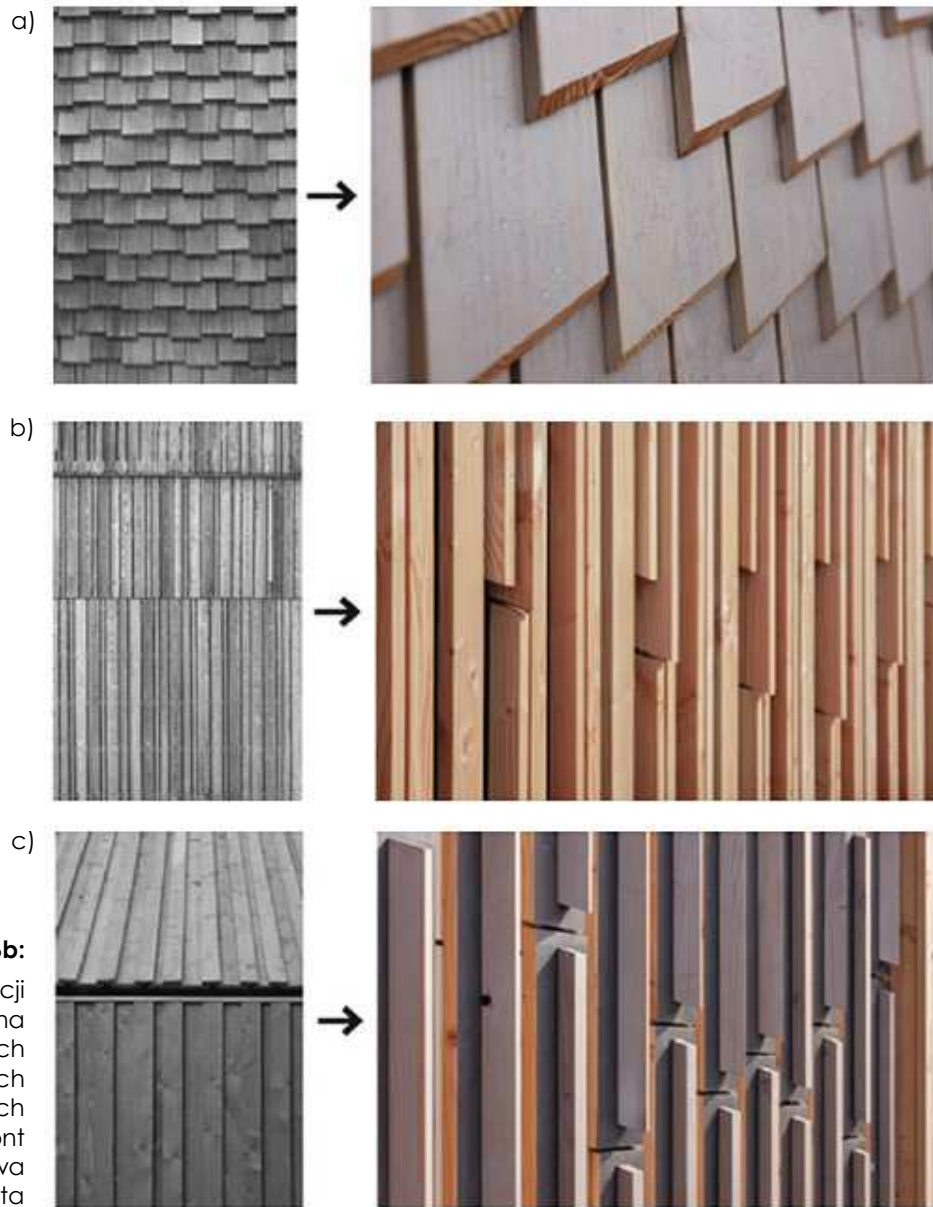
28 Endsley, Kiris, 1995, *The Out-of-the-Loop Performance Problem and Level of Control in Automation*. *Human Factors* 37 (2): 381-94





Rys.8.6a:
Koncepcja fasad
demonstrujących
efekty projektu
CoDaFe

źródło:
IID, HGK, FHNW,
ERNE AG Holzbau



Rys.8.6b:

Trzy rodzaje elewacji opartych na tradycjach szwajcarskich rozwiązań stolarskich
 a) gont
 b) fasada belkowa
 c) system deska-płyta

źródło:
 IID, HGK, FHNW,
 ERNE AG Holzbau

8.6.1. Współczesna cyfrowa interpretacja fasady z gontów

Fasadę z gontów (Rys 8.6b(a)) zinterpretowano w postaci dynamicznego wzoru opartego na atraktorze, jako punkcie zbiegu geometrii cięć dolnych krawędzi (Rys.8.6.1a). Analogiczny w zasadzie działania skrypt opracowano w rozdziale Research by design w punkcie dotyczącym zróżnicowanych parabolicznie serii powierzchni przestrzennych na bazie prostej i łuku.





Rys.8.6.a:
Zbliżenie na elewację
z gontu

źródło:
IID, HGK, FHNW,
ERNE AG Holzbau

W procesie produkcji, zastosowany robot z chwytakiem podciśnieniowym zmontował 1341 unikatowych elementów. Punktem wyjścia były płyty o wymiarach 165x500x20mm podzielone na 24 panele. Projekt wymagał indywidualnego cięcia dwustronnego dla każdej deski. Ostrze nachylono pod kątem 45 stopni. Od strony frontowej cięcie służyło estetyzacji zadanej geometrii, a od spodu zapewniało płynny spływ deszczu. Każdy gont przykręcono od spodu w czterech punktach, dwa do podkonstrukcji, a dwa do gontów poniżej. W ramach maksymalizacji wydajności zoptymalizowano ścieżkę robota, skrócono odległość między dyspozytorami a ramami i zdecydowano się na ręczne umieszczanie podkonstrukcji, przez co osiągnięto efekt 70 sekund na element.

8.6.2. Współczesna cyfrowa interpretacja fasady opartej na belkach

Na przedniej i tylnej elewacji budynku demonstracyjnego zastosowano systemy fasad belkowych.



**Rys.8.6.2a:**

Zbliżenie na elewację
opartą na systemie
belek

źródło:
IID, HGK, FHNW,
ERNE AG Holzbau

Skonstruowano je odpowiednio z 38 i 32 paneli, gdzie każdy panel składał się z czterech różnych wymiarów listewek (25x50mm, 50x25mm, 75x25mm i 25x75mm). W celach optymalizacyjnych opracowano trzy różne warianty długości dla każdego z typów, co zminimalizowało ilość odpadów. Organizacja utylizacji była w tym przypadku bardzo złożona. Podczas montażu za pomocą asymetrycznych chwytaków uzyskane tolerancje odległości pomiędzy listwami porównywalne są z wykonawstwem ręcznym i wynoszą 1-1,5 mm. Układ elementów w poziomie oparto na dziesięciocyfrowej sekwencji. Projekt zakłada ponadto nieregularne nacięcia wzdłuż listew definiujące pionowy wzór, co uzyskano za pomocą kontroli wielu zamkniętych krzywych definiujących poszczególne regiony. Występują tu przerwy pomiędzy elementami (w kilku rozmiarach) lub braki przerw.

8.6.3. Współczesna cyfrowa interpretacja fasady typu deska na płycie

Jako ostatni zaprezentowano współczesną interpretację mieszanego systemu płytowo-belkowego.



Rys.8.6.3a:

Zbliżenie na elewację typu deska na płycie

źródło:
IID, HGK, FHNW,
ERNE AG Holzbau

System składał się z trzech warstw płyt i belek, skręcanych jedna na drugą. Opracowano go w podziale na 22 panele, przy maksymalnych wymiarach płyt 2x1,5m. Zdecydowano się na dwa podtypy geometryczne (150x1600x22mm i 180x1000x20mm), a listwom (40x80x1000mm) nadano trzy rodzaje skośnego cięcia od tyłu, co zaowocowało dynamicznym wzorem światłocienia na całej elewacji. Ten rodzaj fasady określono jako najbardziej optymalny, mimo że do produkcji użyto dwóch chwytaków. Dla uproszczenia procesu produkcyjnego i optymalizacji czasu produkcji zdecydowano się na wykonanie większości powtarzalnych manipulacji geometrycznych na poszczególnych elementach ręcznie, przed przekazaniem ich robotom. Średni czas na panel wynosił 35 minut.



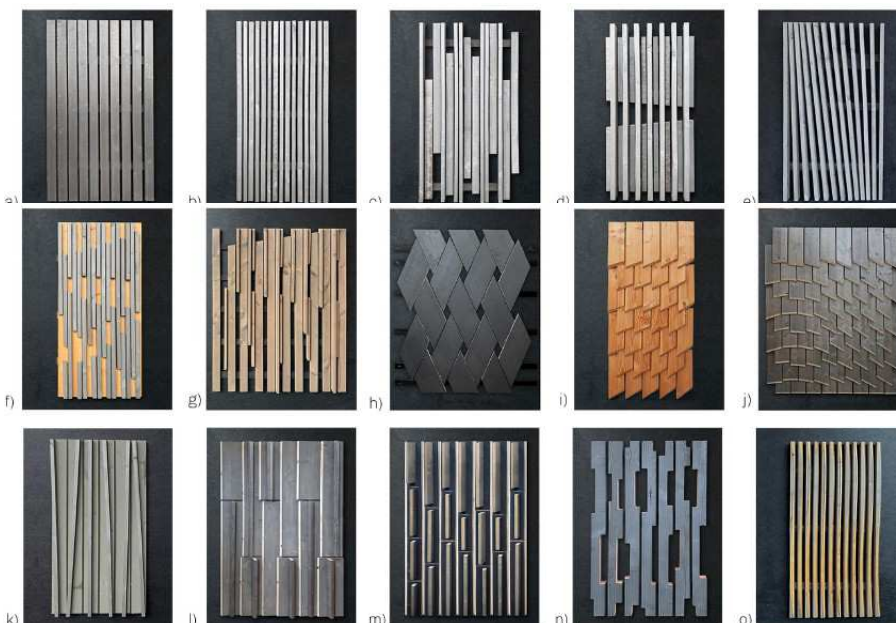
5.6.4. Ukazanie możliwości projektowych i wytwórczych | 15 makiet

Poza prezentowanym budynkiem demonstracyjnym, opracowano i wykonano 15 próbek makiet elewacji w skali 1:1 prezentujących możliwości projektowe i montażowe.

Rys.8.6.4a:

Makiety reprezentujące potencjał projektowy opracowanego procesu:

- a) nierówne odstępy między listwami,
- b) różne szerokości,
- c) niepowtarzalny wzór,
- d) różne głębokości elementów,
- e) różne orientacje,
- f) niepowtarzalny podział wzdłuż z listew,
- g) niepowtarzalna szerokość, długość i głębokość,
- h) elewacje płytowe,
- i, j) elewacje gontowe,
- k, l, m) elewacje wielowarstwowe,
- n, o) elewacje z frezowanym wzorem



8.6. Dyskusja | Wnioski | Perspektywy

źródło:
IID, HGK, FHNW,
ERNE AG Holzbau

Prezentowany projekt CoDeFa przyczynił się do umożliwienia elastyczności i adaptacyjności w kontekście zarówno projektowym jak i wytwórczym. Opisanie metody obliczeniowej zaowocowało szeroką gamą niestandardowych elewacji drewnianych w przypadkach, gdzie ręczna technika produkcji wymagałaby niestandardowych szalunków, skomplikowanej obróbki lub byłaby zwyczajnie niemożliwa. Opracowane narzędzia uczyniły takie przypadki ekonomicznie opłacalnymi. Umożliwiając realizację na bardzo szerokie spektrum możliwości, projekt odróżnia się od indywidualnych, drogich rozwiązań dostępnych na rynku.

Architekci wnieśli do projektu szereg postulatów, jednak nie wyrażali chęci przyswajania wiedzy z zakresu obsługi nowatorskich narzędzi projektowych.

Narzędzie do projektowania zatem postanowiono utrzymać na poziomie elastycznego prototypu, przeznaczonego do obsługi przez specjalistę obliczeniowego, jako że nie udało się zachować klarownego i zrozumiałego interfejsu użytkownika na skalę tak rozległej przestrzeni jego możliwości.

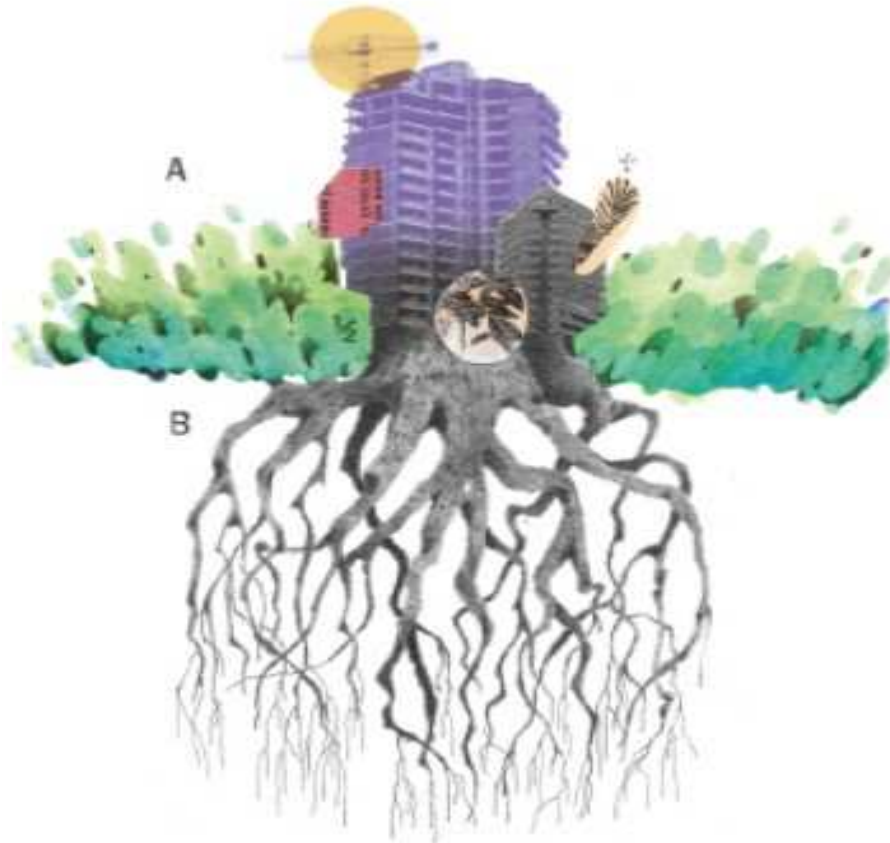
Narzędzie bezsprzecznie ułatwiło architektom zrozumienie procesu produkcyjnego i nadaje się do dalszego rozwoju.

Produkcję oparto na średnim poziomie współpracy człowieka z urządzeniem, a wyższy poziom zaangażowania robotów zagrażałby wydajności, elastyczności i bezpieczeństwu.

Aplikacyjny charakter projektu badawczego gwarantuje wdrożenie jego treści do infrastruktury firmy Erne.



9. KONKLUZJE I WNIOSKI



Rys.9a:
Interpretacja graficzna
zazębiania się
architektury,
matematyki i natury

źródło: Samuel
Castano

Obserwacje zagadnienia wpływu matematyki na proces projektowania architektonicznego wraz z upływem czasu ukazują wzrost uzależnienia efektywności projektowanych form od stopnia zaawansowania metod matematycznych. Współcześnie, matematyka stosowana odnajdywalna jest w różnorodnych dziedzinach twórczości projektowej i dowodzi istnienia wspólnych cech w procesie projektowym dla nawet skrajnie różnych gałęzi pracy twórczej.

Możliwości, jakie stwarza projektowanie przy użyciu metod matematycznych, to przede wszystkim sposobność ciągłego, elastycznego dostosowywania do zmiennych warunków, jak również optymalizacji formy. Uzależnienie od siebie za pomocą funkcji matematycznych



9.2 | KONKLUZJE I WNIOSKI

poszczególnych aspektów formy, które mogą być zapisane numerycznie czy wskaźnikowo, daje możliwość natychmiastowego dostosowania reszty parametrów przy zmianie jednego z nich. Parametryzacja i generowanie form za pomocą algorytmów umożliwia kreowanie zupełnie nowatorskich efektów. Ponadto obserwujemy transformację procesu projektowania pod postacią *generowania procesu projektowego*, w kontraście do wcześniejszego tworzenia jednorazowej formy.

Powyższe uzasadnienie obecności zapisu i metod matematycznych w projektowaniu architektonicznym nie jest współcześnie wystarczające i wymaga rozszerzenia celów projektowych o zagadnienia związane z projektowaniem proekologicznym w myśli idei równoważenia rozwoju, gdzie efekty rozwoju uzależnione są od interdyscyplinarnych zespołów (Rys.9a). Matematycy stanowią w tej strukturze ogniwo łączące specjalistów z dziedzin pokrewnych z projektantami.

Wniosek 1

Określenie wymagań dotyczących pożądaných efektów projektowych, za pomocą powiązanych ze sobą parametrów funkcji matematycznych, umożliwia generowanie form niemożliwych (lub bardzo trudnych) do zaprojektowania tradycyjnymi środkami.
--

Potwierdzenie powyższego stanowią projekty architektoniczne przedstawione w rozdziałach *Centum Plaza*, *Pirs Przyszłości*, *Armadillo Vault* i *CoDeFa* oraz rozdział *Research by design* obrazujący klasyfikację możliwości tworzenia elipsoidalnie skręconych wież, wież na planie pochodnych z rodziny elipsoid o nierównomiernym kącie obrotu, pierścieni składających się z dowolnych figur geometrycznych skręconych względem siebie, diagramów Wonoroja, gradientu kolorystycznego zbioru podwójnych łuków, wariacji na temat zespołu brył inspirowanych Pomnikiem Pomordowanych Żydów Europy w Berlinie (zarówno w przypadku zbioru prostopadłościanów o zróżnicowanej wysokości, uzależnionej od odległości od zadanej krzywej, jak i w przypadku generowania wartości wyniesienia za pomocą bitmapy), obłych elewacji modułowych wypełnionych dowolnymi kształtami (o wektorze normalnym prostopadłym do każdej z podpowierzchni), krzywoliniowych systemów elewacyjnych tworzonych za pomocą mapowania wykresem i odwróconych macierzy danych oraz zróżnicowanych paraboloidalnie serii powierzchni przestrzennych na bazie prostej i łuku.



Wniosek 2

Świadomość potrzeby oraz umiejętność określenia wymagań projektowych w postaci matematycznego procesu generowania formy, wpływa na poprawę jakości projektu architektonicznego.

Opieranie procesu projektowego na odnajdywaniu i uzależnianiu od siebie nawzajem parametrów wymusza dokładne precyzowanie celów projektowych. Dodatkowe warstwy informacyjne dla wytycznych projektowych uzyskiwane za pomocą analiz matematycznych i symulacji mają realne przełożenie na decyzje projektowe (również na szczeblu urbanistycznym) od etapu koncepcji poprzez dostosowywanie założonych celów geometrycznych, przez zabiegi elewacyjne, do sposobu realizacji. Niekiedy te analizy i symulacje w szybkim tempie są w stanie po prostu potwierdzić założenia projektowe przyjmowane przez architektów na zasadzie intuicji i doświadczenia. Efekty końcowe generowanych projektów stanowią odpowiedź na dokładnie sprecyzowane wymagania i zadane warunki początkowe dla tworzenia koncepcji urbanistyczno-architektonicznych, co wpływa na podniesienie jakości funkcjonalnej projektu. Wygenerowane formy mają zatem potencjał być „mądrzejszymi” od projektowanych tradycyjnie. O możliwościach jakości czysto estetycznej osiąganey na tej podstawie w architekturze traktuje rozdział Research by design, a części dysertacji poświęcone projektom *Centum Plaza*, *Pirs Przyszłości*, *Armadillo Vault* i *CoDeFa* dowodzą o ponad wizualnych aspektach jakości architektury.



Wniosek 3

Realne osadzenie metod matematycznych w procesie projektowania architektonicznego przyczynia się do osiągnięcia celów projektowych związanych z ideą równoważenia rozwoju i projektowania proekologicznego.

Fascynacja formami generowanymi parametrycznie za nasadzie „sztuka dla sztuki” już minęła i należy na nowo sprecyzować cele, jakie powinna sobie stawiać architektura generatywna. Przede wszystkim należy wykorzystywać możliwości jakie stwarza stosowanie metod matematycznych do osiągnięcia celów związanych z projektowaniem z poszanowaniem środowiska naturalnego i w myśli idei równoważenia rozwoju. Projektowanie generatywne w połączeniu z wytwórstwem cyfrowym ma potencjał uczynienia skomplikowanej geometrii ekonomicznie opłacalną. Nie należy zapominać, że architekci w znacznej większości nie są programistami, jednak zrozumienie procesów projektowych i wytwórczych opartych na technologii cyfrowej, w celu zapewnienia w tych procesach przynajmniej średniego poziomu współpracy człowieka z komputerem jest stanem, do którego architekci powinni współcześnie dążyć. Używanie języka matematyki, jako środka komunikacji w procesach projektowych opracowywanych metodą IPD również przyczynia się do osiągnięcia stawianych celów projektowych związanych z ideą równoważenia rozwoju i podejściem proekologicznym, czego dowodzą projekty badawcze *Centum Plaza*, *Pirs Przyszłości*, *Armadillo Vault* i *CoDeFa*.



Powyżej sprecyzowane i omówione wnioski dowodzą postawionych w dysertacji tez projektowych.

Teza nr 1:

Projektowanie architektury rozumianej jako sztuki optymalnego kształtowania form przestrzennych można udoskonalić dzięki stosowaniu metod matematycznych na wszystkich fazach procesu projektowego, od koncepcji do realizacji.

Współczesna architektura jest sztuką algorytmicznego generowania form parametrycznych, wzbogaconą o cały szereg metod matematycznych stosowanych w celu usprawnienia procesu projektowania, jak i wytwarzania.

Teza nr 2:

Ujęcie aspektów projektu architektonicznego jako zmiennych funkcji matematycznych przyczynia się do podniesienia jakości architektury pod kątem podejścia proekologicznego i idei równoważenia rozwoju w kontekście nasłonecznienia, radiacji, kryteriów takich jak Daylight Factor (DF), Spatial Daylight Autonomy (sDA), symulacji przewietrzania (Outdoor airflow), obszaru widoczności, uelastycznienia, estetyzacji i optymalizacji.

Stosowanie zapisu matematycznego i metod matematycznych we wszystkich fazach procesu projektowego precyzuje i pozwala osiągać cele jakie powinna stawiać sobie współczesna architektura, ściśle związane z poszanowaniem środowiska naturalnego.

10. SPIS TABEL I GRAFIK

1. WPROWADZENIE		
tabela nr	tytuł	źródło
1.4. Podstawowe pojęcia		
1.4a	Dziedziny matematyki stosowanej	własne

2. PROJEKTOWANIE ALGORYTMICZNE MODELOWANIE PARAMETRYCZNE PROJEKTOWANIE GENERATYWNE, JAKO WSPÓŁCZESNE STADIUM EWOLUCJI ZASTOSOWAŃ MATEMATYKI W ARCHITEKTURZE			
tabela nr	tytuł tabeli	tytuł grafiki	źródło grafiki
2.1. Poszukiwania obecności matematyki w procesie projektowym			
2.1a	Wiruwiański Złoty Podział jako prekursor idei parametryzacji	Proporcje Złotego Podziału	własne
		Złota spirala	własne
		Złoty podział w Gwieździe Pitagorejskiej	własne
		Poszukiwanie złotych proporcji w porządku doryckim frontowej fasady Partenonu w Atenach	własne zdjęcie podstawowe: https://budowle.pl
		Złoty podział w kącie nachylenia ściany piramidy Cheopsa	własne
		Logo Twittera wpisane w „Złote Prostokąty”	własne logo podstawowe: https://twitter.com
		Logo znanych marek tworzone w oparciu o Złoty Podział	http://designshack.co.uk
2.1b	Rozwój zaawansowania zapisu matematycznego w inspiracjach przy projektowaniu architektonicznym	Willa Schrödera	https://upload.wikimedia.org



10.2 | SPIS TABEL I GRAFIK

	cz.1 De Stijl Styl międzynarodowy Bauhaus		
2.1c	Rozwój zaawansowania zapisu matematycznego w inspiracjach przy projektowaniu architektonicznym cz.2 Surrealizm Dekonstrukttywizm	UFA-Palast	http://www.coop-himmelblau.at
2.1d	Rozwój zaawansowania zapisu matematycznego w inspiracjach przy projektowaniu architektonicznym cz.3 Origami Kirigami	Embedded Project	http://www.hhdfun.com
2.1e	Rozwój zaawansowania zapisu matematycznego w inspiracjach przy projektowaniu architektonicznym cz.4 Fraktale	Nagakin Capsule Tower	http://www.kisho.co.jp

3. CYFROWA NOTACJA NATURY

rys. nr	tytuł	źródło grafiki
3.1. Fraktale rekurencja iteracyjność zapowiedź optymalizacji		
3.1a	Fraktal w naturze	http://ciekawe.org
3.2. Algorytmiczne odwzorowanie struktur roślinnych		
3.2a	Przykłady struktur odwzorowujących formy roślinne za pomocą L-systemów	Prusinkiewicz P., Lindenmayer A., 1990, The Algorithmic Beauty of Plants, Springer-Verlag, New York



3.2b	Skrypt generujący wielokolorową paproć na bazie fraktala	własne
3.2c	Efekt graficzny obrazujący działanie skryptu generującego wielokolorową paproć na bazie fraktala	własne
3.3. Morpho-ecologies Bionika Biomimikra Biomimetyka		
3.3a	Model cyfrowy zróżnicowania powierzchni skóry krokodyla	Nicolas Stathopoulos i Pavel Hladik
3.3b	Fragment modelu cyfrowego obrazujący dwa poziomy hierarchii zróżnicowania formy u koralowców	Nicolas Stathopoulos i Pavel Hladik
3.3c	Iryzacja – nadawanie koloru jako funkcja kryształów fotonicznych powstałych w wyniku ewolucji naturalnej	Vukusic P., Sambles J.R., 2003, <i>Photonic structures in biology</i> , Nature Vol 424
3.3d	Elewacja Eastgate Harare w Zimbabwie powstała w oparciu o badanie kopców termitów	www.arup.com
3.3e	Efekt działania algorytmu opartego na bazie „bird-oid objects”	www.rectangleworld.com

4. RESEARCH BY DESIGN CZĘŚĆ EKSPERYMENTALNA TYPOLOGIA ALGORYTMÓW UŻYWANYCH PRZY PROJEKTOWANIU ARCHITEKTONICZNYM		
rys. nr	tytuł	źródło grafiki
4.1. Elipsoidalne skręcone wieże		
4.1.1a	Skrypt obrazujący proces powstawania wieży na planie elipsy z indukcyjną rotacją każdego piętra względem poprzedniego	własne
4.1.1b,c,d,e,f,g	Efekty działania algorytmu wieży na planie elipsy z indukcyjną rotacją każdego piętra względem poprzedniego dla zadanych różnych parametrów promieni, kąta obrotu i ilości kondygnacji	własne
4.1.1h,i,j,k	Efekty działania algorytmu wieży na planie elipsy z	własne

10.4 | SPIS TABEL I GRAFIK

	indukcyjną rotacją każdego piętra względem poprzedniego dla zadanych różnych parametrów promieni, kąta obrotu i ilości kondygnacji – widoki z góry(h,j), widok perspektywiczny (i,k)	
4.1.2a	Plan piętra typowego jako płaszczyzny wewnątrz pochodnej z rodziny elipsoid, jako krzywej stycznej do dwóch zadanych okręgów niewspółśrodkowych	https://thinkparametric.com
4.1.2b	Algorytm postępowania przy tworzeniu planu piętra typowego jako płaszczyzny wewnątrz pochodnej z rodziny elipsoid, jako krzywej stycznej do dwóch zadanych okręgów niewspółśrodkowych	własne
4.1.2c	Algorytm postępowania przy tworzeniu korpusu podstawowej oraz wysuniętych równomiernie balkonów z balustradami	własne
4.1.2d	Algorytm postępowania przy generowaniu skrętu wieży za pomocą mapowania grafem	własne
4.1.2e,f,g	Efekty działania algorytmu dla wieży na planie pochodnej z rodziny elipsoid, przy generowaniu skrętu za pomocą mapowania grafowego	własne
4.1.2h,i	Efekty niepożądane błędów w działaniu algorytmu dla wieży na planie pochodnej z rodziny elipsoid, przy generowaniu skrętu za pomocą mapowania grafowego	własne
4.2. Pierścienie składające się z dowolnych figur geometrycznych skręconych względem siebie		
4.2a	Następujące po sobie kroki zapisu matematycznego dla pierścieni składające się z dowolnych figur geometrycznych skręconych względem siebie	własne
4.2b,c,d	Efekty graficzne uzyskane za	własne

	<p>pomocą skręcania względem siebie dowolnych figur geometrycznych w obrębie dowolnych krzywych zamkniętych</p>	
4.3. Diagramy Woronoja Tesselacja Dirichleta		
4.3a	Następujące po sobie kroki zapisu matematycznego dla uzyskania diagramu Woronoja	własne
4.3b,c,d	Rozrastanie się podobszarów w wizualizacji graficznej tesselacji Dirichleta przestrzeni przy zwiększaniu parametru maksymalnego promienia wokół każdego z punktów	własne
4.3e	Próby uzyskania zasady działania tesselacji Dirichleta w przestrzeni trójwymiarowej	własne
4.3f	Efekty graficzne uzyskania zasady działania tesselacji Dirichleta	własne
4.3g	Efekty graficzne uzyskania zasady działania tesselacji Dirichleta w przestrzeni trójwymiarowej	własne
4.4. Gradient kolorystyczny zbioru podwójnych łuków		
4.4a	Algorytm postępowania przy generowaniu gradientu kolorystycznego dla zbioru podwójnych (przełamanych) łuków	własne
4.4b	Efekty przestrzenne generowania gradientu kolorystycznego dla zbioru podwójnych (przełamanych) łuków. W grafice d zauważamy spłaszczoną bryłę, uzyskaną przy zadanym punkcie przecięcia bliższym wartości 1	własne
4.4c	Efekty przestrzenne generowania gradientu kolorystycznego dla zbioru podwójnych (przełamanych) łuków	własne
4.4d	Efekty przestrzenne generowania gradientu	własne

	kolorystycznego dla zbioru podwójnych (przetamanych) łuków	
4.5. Wariacje na temat zespołu brył inspirowanego Pomnikiem Pomordowanych Żydów Europy w Berlinie		
4.5.1a	Algorytm postępowania przy generowaniu zbioru prostopadłościanów o zróżnicowanej wysokości, uzależnionej od odległości od zadanej krzywej	własne
4.5.1b	Efekt wizualny działania algorytmu generowania zbioru prostopadłościanów o zróżnicowanej wysokości, uzależnionej od odległości od zadanej krzywej	własne
4.5.1c	Efekt wizualny działania algorytmu generowania zbioru prostopadłościanów o zróżnicowanej wysokości, uzależnionej od odległości od zadanej krzywej	własne
4.5.2a	Algorytm postępowania przy wynoszeniu zbioru form na podstawie bitmapy	własne
4.5.2b	Efekty graficzne uzyskane przy wynoszeniu zbioru form na podstawie bitmapy	własne
4.6. Obte elewacje modułowe		
4.6a	postępowania przy podziale fragmentu przestrzeni trójwymiarowej i wypełnianiu jej zadanymi figurami geometrycznymi	własne
4.6b	Efekty wizualne dla przykładowej obtej powierzchni przestrzennej trójwymiarowej ukazano przy pomocy wypełnienia jej za pomocą kul i stożków	własne
4.6c	Efekty wizualne dla przykładowej obtej powierzchni przestrzennej trójwymiarowej ukazano przy pomocy wypełnienia jej za pomocą kul i stożków	własne
4.7. Krzywoliniowe systemy elewacyjne przy użyciu mapowania wykresem i odwróconych macierzy danych		

4.7a	Procedura postępowania przy krzywoliniowych systemach elewacyjnych przy użyciu mapowania grafowego i odwróconych macierzy danych	własne
4.7b	Uzyskane efekty graficzne dla krzywoliniowych systemów elewacyjnych przy użyciu mapowania grafowego i odwróconych macierzy danych	własne
4.7c	Uzyskane efekty graficzne dla krzywoliniowych systemów elewacyjnych przy użyciu mapowania grafowego i odwróconych macierzy danych	własne
4.7d	Edycja wykresów przy krzywoliniowych systemach elewacyjnych przy użyciu mapowania grafowego i odwróconych macierzy danych	własne
4.7e	Uzyskane efekty graficzne dla wyłuszczenia krzywych odpowiedzialnych za rozlokowanie punktów początkowych i końcowych formy podstawowej	własne
4.7f	Edycja wykresów – skos prostoliniowy przy krzywoliniowych systemach elewacyjnych przy użyciu mapowania grafowego i odwróconych macierzy danych	własne
4.7g	Uzyskane efekty graficzne przy skosie prostoliniowym dla punktów początkowych formy podstawowej	własne
4.7h	Procedura postępowania przy krzywoliniowych systemach elewacyjnych przy użyciu mapowania grafowego i odwróconych macierzy danych dla większej ilości punktów przegięcia interpolacji krzywych	własne
4.7i	Zbliżenie na wykresy	własne

	rozlokowujące kolejne punkty przegięcia dla opisywanego algorytmu	
4.7j	Uzyskane efekty graficzne dla krzywoliniowych systemów elewacyjnych dla zwiększonej ilości punktów użytych do interpolacji krzywych frontowych	własne
4.7k	Uzyskane efekty graficzne dla krzywoliniowych systemów elewacyjnych dla zwiększonej ilości punktów użytych do interpolacji krzywych frontowych	własne
4.8. Zróżnicowane paraboloidalnie serie powierzchni przestrzennych na bazie prostej i łuku		
4.8a	Zapis matematyczny serii przemieszczeń dla prostej i krzywej o powiązanych danych wejściowych (x,y,z) i utworzenie z nich powierzchni w przestrzeni 3d	własne
4.8b	Efekt graficzny serii przemieszczeń dla prostej i krzywej o powiązanych danych wejściowych (x,y,z) i utworzenie z nich powierzchni w przestrzeni 3d	własne
4.8c	Zapis matematyczny przy wykorzystywaniu macierzy współrzędnych dla zróżnicowania paraboloidalnego najwyższego punktu serii krzywych przy edycji współrzędnych x i z	własne
4.8d	Efekt graficzny wykorzystywania macierzy współrzędnych dla zróżnicowania paraboloidalnego najwyższego punktu serii krzywych przy edycji współrzędnych x i z	własne
4.8e	Efekt graficzny wykorzystywania macierzy współrzędnych dla zróżnicowania paraboloidalnego najwyższego punktu serii krzywych przy edycji współrzędnych x i z	własne



5. ZASTOSOWANIE METOD MATEMATYCZNYCH W PROCESIE PROJEKTOWANIA NA PRZYKŁADZIE KONCEPCJI KONKURSOWEJ CENTUM PLAZA		
rys. nr	tytuł	źródło grafiki
5.1. Wytyczne projektowe Idea projektowa		
5.1a	Wizualizacja koncepcji konkursowej <i>Centum Plaza</i>	Roark Studio
5.1b,c	Wizualizacje koncepcji konkursowej <i>Centum Plaza</i>	Roark Studio
5.2. Proces projektowy, a słońce – komfort użytkownika przestrzeni		
5.2.1a	Dwuwymiarowa tradycyjna linijka słońca opracowana na potrzeby określenia nasłonecznienia z uwzględnieniem zabudowy istniejącej i projektowanej dla koncepcji konkursowej <i>Centum Plaza</i>	Roark Studio
5.2.1b	Dwuwymiarowa tradycyjna linijka słońca opracowana na potrzeby określenia nasłonecznienia wyłącznie dla zabudowy nowo projektowanej dla koncepcji konkursowej <i>Centum Plaza</i>	Roark Studio
5.2.1c	Efekty graficzne wykorzystania metodologii Building Information Modelling w badaniu nasłonecznienia w obszarze zabudowy sąsiadującej, znajdującej się w obszarze oddziaływania inwestycji dla koncepcji konkursowej <i>Centum Plaza</i>	Designbotic
5.2.1d	Efekty graficzne wykorzystania metodologii Building Information Modelling w badaniu nasłonecznienia dla projektowanych pokoi mieszkalnych dla koncepcji konkursowej <i>Centum Plaza</i>	Designbotic
5.2.1e	Graficzne przedstawienie algorytmu procedur przy symulacji nasłonecznienia i radiacji użyte w projekcie konkursowym <i>Centum Plaza</i>	Designbotic
5.2.2a	Efekty graficzne wykorzystania metodologii Building	Designbotic

10.10 | SPIS TABEL I GRAFIK

	Information Modelling w badaniu radiacji dla koncepcji konkursowej <i>Centum Plaza</i>	
5.2.2b	Efekty graficzne wykorzystania metodologii Building Information Modelling w badaniu radiacji dla przestrzeni półpublicznych w koncepcji konkursowej <i>Centum Plaza</i>	Designbotic
5.2.3a	Efekty graficzne wykorzystania analizy Daylight Factor (DF) w obrębie projektowanych przestrzeni biurowych dla koncepcji konkursowej <i>Centum Plaza</i>	Designbotic
5.2.3b	Efekty graficzne wykorzystania analizy Spatial Daylight Autonomy (sDA) w obrębie projektowanych przestrzeni biurowych dla koncepcji konkursowej <i>Centum Plaza</i>	Designbotic
5.3. Przewietrzanie outdoor airflow		
5.3a,b,c	Graficzne przedstawienie algorytmu procedur przy symulacji tunelu aerodynamicznego użyte w projekcie konkursowym <i>Centum Plaza</i>	Designbotic
5.3d,e	Graficzne przedstawienie efektów zauważalnych na wygenerowanym modelu 3d założenia projektowego, po przeprowadzeniu procedur dla algorytmu symulacji tunelu aerodynamicznego użyte w projekcie konkursowym <i>Centum Plaza</i>	Designbotic
5.3f,g	Graficzne przedstawienie efektów zauważalnych na wygenerowanym modelu 3d założenia projektowego, po przeprowadzeniu procedur dla algorytmu symulacji tunelu aerodynamicznego użyte w projekcie konkursowym <i>Centum Plaza</i>	Designbotic
5.3h	Graficzne przedstawienie efektów zauważalnych na wygenerowanym modelu 3d	Designbotic

	założenia projektowego, po przeprowadzeniu procedur dla algorytmu symulacji tunelu aerodynamicznego użyte w projekcie konkursowym <i>Centum Plaza</i>	
5.4. Analizy widokowe		
5.4a,b	Aksonometria otoczenia wraz z analizą widokową opracowana dla projektu konkursowego <i>Centum Plaza</i>	Roark Studio
5.4c	Graficzne przedstawienie algorytmu postępowania przy opracowywaniu badania widoczności za pomocą <i>Isovist</i>	https://www.designcoding.net/how-isovistcomponent-works
5.4d	Graficzna interpretacja działania skryptu <i>Isovist</i>	https://www.designcoding.net/how-isovistcomponent-works
5.5. Zabiegi elewacyjne		
5.5a	Zabiegi elewacyjne zastosowane w koncepcji <i>Centum Plaza</i> po analizach dotyczących nasłonecznienia, radiacji, daylight factor (DF) oraz spatial daylight autonomy (sDA)	Roark Studio
5.5b	Zabiegi elewacyjne zastosowane w koncepcji <i>Centum Plaza</i> po analizach dotyczących nasłonecznienia, radiacji, daylight factor (DF) oraz spatial daylight autonomy (sDA)	Roark Studio
5.5c	Efekt końcowy zastosowania różnych zabiegów elewacyjnych w projekcie <i>Centum Plaza</i> wynikających z analiz dotyczących nasłonecznienia, radiacji, daylight factor (DF) oraz spatial daylight autonomy (sDA)	Roark Studio

6. ZASTOSOWANIE METOD MATEMATYCZNYCH W PROCESIE PROJEKTOWANIA NA PRZYKŁADZIE STUDIALNO - IDEOWEJ KONCEPCJI KONKURSOWEJ NA PROJEKT ZABUDOWY



I ZAGOSPODAROWANIA GŁÓWNEJ OSI KOMPOZYCYJNEJ GDYNI – PIRS PRZYSZŁOŚCI SKWER KOŚCIUSZKI I MOŁO POŁUDNIOWE		
rys. nr	tytuł	źródło grafiki
6.3. Idea projektowa		
6.3a	Konkursowy plan zagospodarowania przestrzennego Skweru Kościuszki i Moło Południowego według Roark Studio	Roark Studio
6.4. Forum Morskie z Laguną minimalizacja prędkości wiatru w przestrzeni, przy maksymalizacji widoków		
6.4a	Wizualizacja Forum Morskiego zlokalizowanego na końcowym fragmencie Moło Południowego	Roark Studio wizualizacja: Bitlens
6.4b	Plan zagospodarowania końcowego fragmentu Moło Południowego w koncepcji konkursowej	Roark Studio
6.4c	Schemat wizualizujący możliwości wykorzystania Forum Morskiego	Roark Studio
6.4d	Wiatrogram obrazujący rozkład kierunków i częstotliwość wiatru dla Gdyni na przestrzeni jednego roku	Designbotic
6.4e	Graficzne przedstawienie algorytmu procedur przy symulacji tunelu aerodynamicznego użyte w projekcie konkursowym <i>Pirs Przyszłości</i>	Designbotic
6.4f	Graficzne przedstawienie algorytmu procedur przy symulacji tunelu aerodynamicznego użyte w projekcie konkursowym <i>Pirs Przyszłości</i>	Designbotic
6.4g	Schemat obrazujący obniżenie prędkości wiatru przy zastosowaniu „wałów” o wysokości 1m w obszarze Moło Południowego	Designbotic
6.4h	Wizualizacja „Laguny”, której forma chroni przestrzeń Forum Morskiego przed wiatrem	Roark Studio wizualizacja: Bitlens

6.4i,j	Wykresy porównujące zachowanie wiatru w obrębie południowej krawędzi Molo Południowego z uwzględnieniem nowoprojektowanej Laguny (i) oraz bez niej, w stanie obecnym (j)	Designbotic
6.4k	Fragment wizualizacji konkursowej – budynek Forum Kultury	Roark Studio
6.4l,m,n	Skrypty generujące formy w obrębie Forum Morskiego	Designbotic
6.4o,p	Zmiana zachowania wiatru bez stosowania zaokrąglonych narożników (o) i z uwzględnieniem zaokrąglenia (p)	Designbotic
6.5. Wielofunkcyjne pawilony regulacja nasłonecznienia		
6.5a	Fragment zagospodarowania terenu ukazujący obszar projektowanych wielofunkcyjnych pawilonów	Roark Studio
6.5b	Wizualizacja wielofunkcyjnych pawilonów	Roark Studio wizualizacja: Bitlens
6.5c	Szkic ukazujący użytkowanie przestrzeni wokół wielofunkcyjnych pawilonów	Roark Studio
6.5d	Schemat obrazujący spływ wód deszczowych z parasoli na zielone dachy	Roark Studio
6.5e	Graficzne przedstawienie algorytmu procedur przy badaniu nasłonecznienia w obrębie wielofunkcyjnych pawilonów	Designbotic
6.5f,g	Efekty graficzne zastosowania algorytmów badających nasłonecznienie w obrębie wielofunkcyjnych pawilonów	Designbotic

7. ZASTOSOWANIE METOD MATEMATYCZNYCH W PROCESIE PROJEKTOWANIA I CYFROWEJ PRODUKCJI NA PRZYKŁADZIE PROJEKTU ARMADILLO VAULT PREZENTOWANEGO PODCZAS BIENNALE W WENECJI W 2016 ROKU

Rys. nr	tytuł	źródło grafiki
7.1. Wytyczne projektowe		



7.1a	Armadillo Vault zaprezentowany w Corderie dell' Arsenal e podczas Biennale Architektury w Wenecji, w 2016 roku	Block Research Group, ETH Zurich, Institute of Technology in Architecture
7.2. Problemy projektowe		
7.2a	Schemat obrazujący koordynację procesu projektowania, analizy i produkcji sklepienia	Block Research Group, ETH Zurich, Institute of Technology in Architecture
7.4. Forma, jako wynik koordynacji matematycznego zapisu wytycznych konstrukcyjnych, architektonicznych oraz produkcyjnych		
7.4.1a	Wykresy ukazujące: a) kierunki sił poziomych trójwymiarowej sieci b) wielkości sił wzdłuż każdego z kierunków c) rozkład grubości d) naprężenia powierzchniowe wynikające z rozkładu sił i grubości	Block Research Group, ETH Zurich, Institute of Technology in Architecture
7.4.2a	Pojedynczy bloczek hipotetycznie uniesiony ponad konstrukcję sklepienia: a) płaska powierzchnia zewnątrzna b) powierzchnia przenosząca obciążenia c) zakrzywiona, ryflowana powierzchnia wewnątrzna d) nacięcia rejestracyjne e) płaska powierzchnia boczna, nieprzenosząca obciążeń	Block Research Group, ETH Zurich, Institute of Technology in Architecture
7.4.2b	Przegląd projektu teselacji: a) siatka reprezentująca powierzchnię oporową b) linie przebiegów c) wzór cięcia „z grubsza” na powierzchni wewnętrznej d) ostateczna teselacja powierzchni oporowej przy wyrównaniu cięcia „z grubsza”	Block Research Group, ETH Zurich, Institute of Technology in Architecture
7.4.3a	Zasys projektu geometrii błoczków kamiennych: a) nieestetyczne odchylenia oparte na wektorach normalnych dzielonej powierzchni	Block Research Group, ETH Zurich, Institute of Technology in Architecture

	b) złagodzony efekt po umożliwieniu obrotu i przesunięć wektorów normalnych c) odchylenia od dozwolonego minimum w pierwotnej fazie d) odchylenia docelowe	
7.4.4a	„Wafłowa” podkonstrukcja ze sklejki	Block Research Group, ETH Zurich, Institute of Technology in Architecture
7.5. Wnioski		
7.5a	Efekt finalny prezentowany w Corderie dell’Arsenale	Block Research Group, ETH Zurich, Institute of Technology in Architecture

8. ZASTOSOWANIE METOD MATEMATYCZNYCH W UJĘCIU ARCHITEKTONICZNYM W PROJEKCIE BADAWCZYM CoDeFa PARAMETRYCZNE DREWNIANE SYSTEMY ELEWACYJNE		
Rys. nr	tytuł	źródło grafiki
8a	Demonstracja zastosowania wyników badań projektu CoDeFa na elewacjach tymczasowego budynku biurowego	IID, HGK, FHNW, ERNE AG Holzbau
8.5. Metody badawcze		
8.5.2a	Różnorodność geometrii wytworzonych za pomocą generatywnych narzędzi projektowych w projekcie CoDeFa – elewacje płytowe, w których parametrami są szerokość, długość, kształt spodniej części i kierunek płyt	IID, HGK, FHNW, ERNE AG Holzbau
8.5.2b	Różnorodność geometrii wytworzonych za pomocą generatywnych narzędzi projektowych w projekcie CoDeFa – elewacje belkowe, gdzie parametrami są wielkość szczelin, układ sekwencyjny, kąt, długość i szerokość listew	IID, HGK, FHNW, ERNE AG Holzbau
8.5.2c	Różnorodność geometrii wytworzonych za pomocą	IID, HGK, FHNW, ERNE AG Holzbau

	generatywnych narzędzi projektowych w projekcie CoDeFa – elewacje mieszane, gdzie jako parametr określono liczbę warstw, wzór, rytm oraz typologię elementów	
8.6. Demonstracja efektu projektu CoDeFa		
8.6a	Koncepcja fasad demonstrujących efekty projektu CoDaFe	IID, HGK, FHNW, ERNE AG Holzbau
8.6b	Trzy rodzaje elewacji opartych na tradycjach szwajcarskich rozwiązań stolarskich a) gont b) fasada belkowa c) system deska-płyta	IID, HGK, FHNW, ERNE AG Holzbau
8.6.a	Zbliżenie na elewację z gontu	IID, HGK, FHNW, ERNE AG Holzbau
8.6.2a	Zbliżenie na elewację opartą na systemie belek	IID, HGK, FHNW, ERNE AG Holzbau
8.6.3a	Zbliżenie na elewację typu deska na płycie	IID, HGK, FHNW, ERNE AG Holzbau
8.6.4a	Makiety reprezentujące potencjał projektowy opracowanego procesu: a) nierówne odstępy między listwami, b) różne szerokości, c) niepowtarzalny wzór, d) różne głębokości elementów, e) różne orientacje, f) niepowtarzalny podział wzdłuż z listew, g) niepowtarzalna szerokość, długość i głębokość, h) elewacje płytowe, i, j) elewacje gontowe, k, l, m) elewacje wielowarstwowe, n, o) elewacje z frezowanym wzorem	IID, HGK, FHNW, ERNE AG Holzbau

9. KONKLUZJE I WNIOSKI

Rys. nr	tytuł	źródło grafiki
9a	Interpretacja graficzna ząbienia się architektury i natury	Samuel Castano

11. BIBLIOGRAFIA

<p>A</p>	<p>Achten H.H., 2002, <i>Requirements for Collaborative Design in Architecture</i>. In <i>Proceedings of the 6th Design & Decision Support Systems in Architecture & Urban Planning Conference</i>, edycja: H.J.P. Timmermans H.J.P., de Vries B., 1–13. Eindhoven.</p> <p>Adrover E.R., 2015, <i>Deployable Structures</i>, Laurence King Publishing.</p> <p>Agkathidis A., 2012, <i>Computational architecture: Digital designing tools and manufacturing techniques</i>, BIS.</p> <p>Alvarez M., Wagner H.J, Groenewolt A., Krieg O.D., Kyjanek O., Sonntag D., Bechert S., Aldinger L., Menges A, Knippers J., 2019, <i>The Buga Wood Pavilion Integrative Interdisciplinary Advancements of Digital Timber Architecture</i>. Ubiquity and Autonomy - Paper Proceedings of the 39th Annual Conference of the Association for Computer Aided Design in Architecture, ACADIA 2019, 490–500.</p> <p>Arnheim R., 1974, <i>Art and Visual Perception: A Psychology of the Creative Eye</i>, Berkley: University of California Press.</p> <p>Augustynowicz E., Smigielska M., Nikles D., Wehrle T., Wegner H., 2021, <i>Parametric design and multirobotic fabrication of wood facades</i>, Acadia 2021.</p>
<p>B</p>	<p>Ball P., 2009, <i>Shapes: Nature's Patterns: A Tapestry in Three Parts</i>, Oxford University Press.</p> <p>Ball P., 2001, <i>The Self-Made Tapestry: Pattern Formation in Nature</i>, Oxford University Press.</p> <p>Banachowski L., Diks K., Rytter W., 2006, <i>Algorytmy i struktury danych</i>, WNT wyd. V.</p> <p>Bechthold M., 2008, <i>Innovative Surface Structures, Technologies and Applications</i>, Taylor & Francis.</p> <p>Benedikt M. L., 1979, <i>To take hold of space: isovists and isovist fields</i>, Environment and Planning B 6(1) str.</p>

	<p>47–65.</p> <p>Bładowski J., 2013, <i>Rozprawa doktorska: Zastosowanie algorytmów genetycznych w projektowaniu architektonicznym</i>, Politechnika Gdańska; Wydział Architektury.</p> <p>Block P., Rippmann, M., Van Mele, T., 2015. <i>Structural Stone Surfaces: New compression shells inspired by the past</i>, AD Architectural Design - A. Menges (editor) - Material Synthesis: Fusing the Physical and the Computational, 85(5): strony 74-79. London, John Wiley & Sons.</p> <p>Block P., Rippmann M., Van Mele T., Popescu M., Augustynowicz E., Echenagucia T., Barenin C., Frick U., 2016. <i>The Armadillo Vault. Computational Design and Digital Fabrication of a Freeform Stone Shell</i>, Advances in Architectural Geometry.</p> <p>Block P., Rippmann M., Mele T., Escobedo D., 2017, <i>The Armadillo Vault: Balancing computation and traditional craft</i>, Fabricate, UCL Press.</p> <p>Braham W.W., 2007, <i>Rethinking Technology, A Reader in Architectural Theory</i>, Routledge.</p> <p>Braumann J., 2020, <i>KUKA prc. Association for Robots in Architecture</i>.</p> <p>Burry J., Burry M., 2010, <i>The New Mathematics of Architecture</i>, Thames & Hudson.</p>
C	<p>Correa D., Krieg O.D., Meyboom A.L., 2019, <i>Beyond Form Definition: Material Informed Digital Fabrication in Timber Construction</i>. Lecture Notes in Civil Engineering. Vol. 24.</p> <p>Craig R., 1987, <i>Flocks, herds and schools: A distributed behavioral model</i>, SIGGRAPH '87: Proceedings of the 14th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, str. 25-34.</p> <p>Çıdık M.S., Boyd D., Thuraiajah N., 2017, <i>Ordering in Disguise: Digital Integration in Built-Environment Practices</i>. Building Research and Information 45 (6).</p>

	<p>Czech A., Borucka J., 2016, <i>The Use of the Language of Mathematics as an Inspiration for Contemporary Architectural Design</i>, <i>Procedia Engineering</i> V. 161, s.1582-1587, Elsevier.</p> <p>Czech A., Borucka J., 2017, <i>THE ARCHITECTURE AND FASHION DESIGN – An Examination of the Relationship between Fashion and Architecture Design in light of Technological Advancements</i>, [w:] <i>AR(t)CHITECTURE</i>, (red.) Iris Aravot, Dana Margalith, Faculty of Architecture and Town Planning, Technion, I.I.T, Haifa 2016, s. 97-108.</p>
D	<p>Dąbski M., 2015, <i>Rola i kształtowanie zieleni w otoczeniu szpitali</i>, <i>Forma</i> '24/1,</p> <p>Douglis E., 2009, <i>Autogenic Structures</i>, Taylor & Francis.</p> <p>Dossick C., Neff G., 2011, <i>Messy Talk and Clean Technology: Communication, Problem-Solving and Collaboration Using Building Information Modelling</i>. <i>Engineering Project Organization Journal</i> 1 (2): 83–93.</p> <p>Duarte E.,B., 2016, <i>User-Made Environments: Reflectivity & Digital Fabrication as Social Experience in Art & Architecture Pedagogy</i>, <i>Ar(t)chitecture</i>, Technion, Israel.</p>
E	<p>Endsley, Kiris, 1995, <i>The Out-of-the-Loop Performance Problem and Level of Control in Automation</i>. <i>Human Factors</i> 37 (2): 381–94.</p> <p>Endsley, 1997, <i>Level of Automation: Integrating Humans and Automated Systems</i>. <i>Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society</i>, 1:462–92.</p>
F	<p>Ferreiros J., Gray J.J., 2006, <i>The Architecture of Modern Mathematics</i>, Oxford University Press.</p> <p>Ferziger J. H., Peric M., 2002, <i>Computational methods for fluid dynamics</i>, Springer-Verlag.</p> <p>Frazer J.H., Liu H., Tang M., 2004, <i>Supporting creative design in a visual evolutionary computing environment</i>, <i>Advances in Engineering Software</i> 35 261-271, Elsevier.</p>

	<p>Frazer J., Liu X., Tang M., Jansen P., 2002, <i>Generative and Evolutionary Techniques for Building Envelope Design</i>, Generative Art.</p> <p>Frei O., 1982, <i>Natürliche Konstruktionen. Formen und Strukturen in Natur und Technik und Prozesse ihrer Entstehung</i>, Deutsche Verlags-Anstalt GmbH, Stuttgart.</p>
G	<p>Gimzewski J., Vensa V., 2011, <i>Blue Morph: uwagi o działaniu samoorganizującej się zmiany krytycznej (self-organized criticality)</i>, Przegląd Kulturoznawczy NR 1(9).</p> <p>Goulthorpe M., 2009, <i>The Possibility of (an) Architecture</i>, Routledge.</p> <p>Gramazio F., Kohler M., Langenberg S., 2014, <i>MARIO CARPO IN CONVERSATION WITH MATTHIAS KOHLER</i>. Fabricate 2014,12–21, London.</p> <p>Gutai M., 2014, <i>Trans Structures: Fluid Architecture and Liquid Engineering</i>, Actar Publishers, New York.</p>
H	<p>Harty C., 2008, <i>Implementing Innovation in Construction: Contexts, Relative Boundedness and Actor-Network Theory</i>. Construction Management and Economics 26 (10): 1029–41.</p> <p>Helenowska-Peschke M., 2014, <i>Parametryczno-Algorytmiczne projektowanie architektury</i>, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej.</p> <p>Hensel M., Menges A., 2008, <i>Morpho-ecologies</i>, AA London.</p> <p>Hunt J.C.R., 1997, <i>Lewis Fry Richardson and his contributions to mathematics, meteorology, and models of conflict</i>. Annual Review of Fluid Mechanics. 30 (1): xiii–xxxvi.</p>
I	<p>Iglewski M., Madey J., Matwin S., 1979, <i>Pascal – język wzorcowy</i>. Pascal 360., WNT.</p> <p>Issa R., 2013, <i>Essential Mathematics for computational design – Third Edition</i>, Robert McNeel & Associates.</p>

J	<p>Jabi, W., 2013, <i>Parametric Design for Architecture</i>, Laurence King Publishing Ltd.</p> <p>Januszkiewicz K., 2010, <i>O projektowaniu architektury w dobie narzędzi cyfrowych. Stan aktualny i perspektywy rozwoju</i>, Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej.</p> <p>Juchnevič R., 2020, <i>Rozprawa doktorska: Optymalizacja procesu projektowania przy użyciu współczesnych sposobów zapisu myśli architektonicznej</i>, Politechnika Gdańska; Wydział Architektury.</p> <p>Jurczykiewicz S., 2017, <i>Dachy Membranowe, Nowoczesne Hale</i>.</p>
K	<p>Kellert S.R., Wolson E.O., 1993, <i>The Biophilia Hypothesis</i>, Island Press.</p> <p>Khabazi Z., 2010, <i>Generative Algorithms, Concepts and Experiments: Weaving</i>, Architectural Association (AA) London.</p> <p>Khabazi Z., 2011, <i>Generative Algorithms, Concepts and Experiments: Strip Morphologies</i>, Architectural Association (AA) London.</p> <p>Khabazi Z., 2011, <i>Generative Algorithms, Concepts and Experiments: Porous Shell</i>, Architectural Association (AA) London.</p> <p>Khabazi Z., 2012, <i>Generative Algorithms with Grasshopper version 2.0</i>, Architectural Association (AA) London.</p> <p>Klein L., 2014, <i>Żywe architektury – Analogia biologiczna w architekturze końca XX w.</i>, Fundacja Kultura Miejsca.</p> <p>Koolhaas R., 2018, <i>Elements of Architecture</i>. Taschen.</p> <p>Kolarevic B., 2004, <i>Architecture in the Digital Age</i>, Taylor & Francis.</p> <p>Kolarevic B., 2009, <i>Towards Integrative Design</i>,</p>

	<p>International Journal of Architectural Computing 7 (3).</p> <p>Kopcewicz J., 2002, <i>Ruchy roślin. Fizjologia roślin</i>, Wydawnictwo Naukowe PWN, 2002, s. 586-601.</p> <p>Kowalski Z., Kulczycka J., Góralczyk M., 2007, <i>Ekologiczna ocena cyklu życia procesów wytwórczych (LCA)</i>, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.</p> <p>Krieg O.D., Schwinn T., Menges A., Li J., Knippers J., Schmitt A., Schwieger V., 2014. <i>Biomimetic Lightweight Timber Plate Shells: Computational Integration of Robotic Fabrication, Architectural Geometry and Structural Design</i>. In P. Block, J. Knippers, N.J. Mitra, W. Wang (editors) <i>Advances in Architectural Geometry 2014</i>: strony 109-125. Springer.</p>
L	<p>Lebiediew, J.S., 1983, <i>Architektura i bionika</i>; Arkady, Warszawa.</p> <p>Le Corbusier, 1923, <i>Vers une architecture</i>, Paris, str. 9,16,121.</p> <p>Li, Y., Liu, Y. & Wang, W., 2015. <i>Planar hexagonal meshing for architecture</i>. <i>IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics</i>, 21(1), strony 95-106.</p> <p>Lim J., 2009, <i>Bio-structural Analogues in Architecture</i>, BIS Publishers, Amsterdam.</p> <p>Livio M., 2002, <i>The Golden Ratio: The Story of Phi, The World's Most Astonishing Number</i>, Broadway Books, New York, USA.</p> <p>Löfving M., Almström P., Jarebrant C., Wadman B., Widfeldt M., 2018, <i>Evaluation of Flexible Automation for Small Batch Production</i>. <i>Procedia Manufacturing</i>. Vol. 25.</p>
M	<p>Mandelbrot B. B., 2004, <i>Fractals and Chaos</i>, Berlin: Springer.</p> <p>Mandelbrot, B.B., 1983, <i>The fractal geometry of nature</i>, W. H. Freeman and Company NY, USA.</p>

	Mehrjerdi, Y. Z., 2009, <i>Excellent Supply Chain Management</i> . Assembly Automation.
O	Ochsendorf J., Helbig T., Fivet C., Yoon J.M., 2016. Segmented Granite vault in Cambridge. Detail Structure: 01/2016.
P	<p>Parascho S., Gandia A., Mirjan A., Gramazio F., Kohler M., 2017. <i>Cooperative Fabrication of Spatial Metal Structures</i>. Fabricate 2017. UCL Press, 24–29.</p> <p>Parascho S., Han I.X., Walker S., Beghini A., Bruun E., Adriaenssens S., 2020. <i>Robotic Vault: A Cooperative Robotic Assembly Method for Brick Vault Construction</i>. Construction Robotics 4 (3–4).</p> <p>Paturi F. R., tłumaczenie Witkowska B., 1984, <i>Ewolucja czy konstrukcja: Rośliny genialnymi inżynierami przyrody</i>, Warszawa.</p> <p>Pearce P., 1978, <i>Structure in Nature is a Strategy for Design</i>, MIT PRESS.</p> <p>Peters B., Peters T., 2018, <i>Computing the Environment, Digital Design Tools for Simulation and Visualisation of Sustainable Architecture</i>, AD Smart 06.</p> <p>Peters T., 2011, <i>Experimental Green Strategies. Redefining ecological design research</i>, AD november/ december 2011</p> <p>Pottmann, H., 2015. <i>Architectural geometry. Computers and Graphics (Pergamon)</i>, 47(2015), strony 145–164.</p> <p>Portoghezi P., 1999, <i>Imparare dalla natura (Learning from nature)</i>, Domus 9.</p> <p>Prusinkiewicz P., Lindenmayer A., 1990, <i>The Algorithmic Beauty of Plants</i>, Springer-Verlag, New York.</p>
R	<p>Richardson L. F., Chapman S., 1965, <i>Weather prediction by numerical process</i>, Dover Publications.</p> <p>Rippmann M., Lachauer L., Block P., 2012. <i>Interactive Vault Design. International Journal of Space Structures</i>,</p>

	<p>27(4): pp 219-230. Multi-Science Publishing.</p> <p>Rippmann M., Block P., 2013. Rethinking Structural Masonry: Unreinforced, cut-stone Shells. <i>Proceedings of the ICE - Construction Materials</i>, 166(6): strony 378-389.</p> <p>Rippmann, M., 2016. <i>Funicular Shell Design: Geometric Approaches to Form Finding and Fabrication of Discrete Funicular Structures</i>. Ph. D. thesis, ETH Zurich, Department of Architecture.</p> <p>Rossi C., 2003, <i>Architecture and mathematics in ancient Egypt</i>, Cambridge University Press.</p> <p>Rust R., Jenny D., Gramazio F., Kohler M., 2016. <i>Spatial Wire Cutting : Cooperative Robotic Cutting of Non-Ruled Surface Geometries for Bespoke Building Components</i>. CAADRIA 2016, 21st International Conference on Computer-Aided Architectural Design Research in Asia - Living Systems and Micro-Utopias: Towards Continuous Designing.</p>
S	<p>Salvador F., Martin de Holan P., Piller F., 2009, <i>Cracking the Code of Mass Customization</i>. <i>MIT Sloan Management Review</i> 50 (3).</p> <p>Sarhangi R., 2012, <i>Persian architecture and mathematics</i>, Nexus Network Journal. Architecture and Mathematics</p> <p>Saunders A., Epps G., 2016. <i>Robotic Lattice Smock</i>. <i>Robotic Fabrication in Architecture, Art and Design</i> 2016.</p> <p>Schumacher P., 2014, <i>Design Parameters to Parametric Design</i>, The Routledge Companion for Architecture Design and Practice: Established and Emerging Trends, London.</p> <p>Schumacher P., 2016, <i>Introduction: Parametricism 2.0 – Gearing up to Impact the Global Built Environment</i>, AD Parametricism 2.0 - Rethinking Architecture's Agenda for the 21st Century.</p> <p>Schwartzburg Y., Pauly M., 2013. <i>Fabrication-aware Design with Intersecting Planar Pieces</i>. In I. Navazo, P.</p>

	<p>Poulin (editors) <i>Proceedings of Eurographics 2013</i>. Girona, Spain.</p> <p>Stevens P., 1974, <i>Patterns in Nature</i>, Little Brown and Company.</p> <p>Stewart I., 1999, <i>Life's Other Secret: The New Mathematics of the Living World</i>, Wiley.</p> <p>Stolz M., 2002, <i>The History Of Applied Mathematics And The History of Society</i>, Synthese, str. 43-57</p>
T	<p>Tedeschi A., 2014, <i>AAD Algorithms-Aided Design</i>, Le Penseur.</p> <p>Terzidis K., 2006, <i>Algorithmic Architecture</i>, Architectural Press.</p> <p>Thoma A., Adel A., Helmreich M., Wehrle T., Gramazio F., Kohler M.. 2019. <i>Robotic Fabrication of Bespoke Timber Frame Modules</i>. <i>Robotic Fabrication in Architecture, Art and Design 2018</i>. Cham: Springer International Publishing.</p> <p>Thompson D., 1942, <i>On Growth and Form</i>, Cambridge University Press.</p>
V	<p>Van Mele T., Panozzo D., Sorkine-Hornung O., Block P., 2014. <i>Best-fit Thrust Network Analysis - Rationalization of freeform meshes</i>. In S. Adriaenssens, P. Block, D. Veenendaal, C. Williams (editors) <i>Shell Structures for Architecture: Form Finding and Optimization</i>. Routledge.</p> <p>Vincent J., 2006, <i>Biomimetics: its practice and theory</i>, <i>Journal of the Royal Society Interface</i>.</p> <p>Vyzoviti S., 2008, <i>Folding Architecture: Spatial, Structural and Organizational Diagrams</i>, BIS.</p>
W	<p>Wang Z., 2021, <i>Real Design Practice, Real Design Computation</i>. <i>International Journal of Architectural Computing</i> 19 (1).</p> <p>Wehle-Strzelecka S., 2010, <i>Wykorzystanie Wzorów przyrody i doświadczeń bioniki w kształtowaniu architektury pozyskującej energię słońca</i>, <i>Czasopismo</i></p>

	<p>techniczne, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej.</p> <p>Weisstein E.W., 2020, <i>Lindenmayer System</i>, MathWorld, Wolfram Research.</p> <p>Whyte J., Lobo S., 2010, <i>Coordination and Control in Project-Based Work: Digital Objects and Infrastructures for Delivery</i>. <i>Construction Management and Economics</i> 28 (6): 557–67.</p> <p>Whyte J., 2011, <i>Managing Digital Coordination of Design: Emerging Hybrid Practices in an Institutionalized Project Setting</i>. <i>Engineering Project Organization Journal</i> 1 (3).</p> <p>Wieczorkowski K., 2009, <i>Lingwistyczne teorie Noama Chomsky'ego w zastosowaniach komputerowych w pedagogice</i>, Forum Oświatowe.</p> <p>Williams K., Ostwald M.J., 2015, <i>Architecture and Mathematics from Antiquity to the Future</i>, Birkhäuser.</p>
Z	<p>Zboińska M., 2012, <i>Rozprawa doktorska: Wpływ parametrycznych technik modelowania i optymalizacji na architekturę obiektów krzywoliniowych</i>, Politechnika Gdańska; Wydział Architektury</p>

Strony internetowe, videotutoriale, blogi:		
tematyka	adres	dostęp
Trzynastoczęściowa seria tutoriali opracowana przez Davida Ruttena	https://vimeopro.com/rhino/grasshopper-getting-started-by-david-rutten/video/79844992	03.2022
Seria tutoriali przygotowana przez Design Studio Air at the University of Melbourne, Faculty of Architecture, Building and Planning. Gwyllim Jahn, Stanislav Roudavski, David Lister	https://vimeo.com/album/2282897	03.2022
Grasshopper	http://designalyze.com/software/grasshopper	03.2022
	http://www.grasshopper3d.com/	03.2022
	https://thinkparametric.com/	03.2022
	http://antonioturiello.blogspot.it/	03.2022
	http://formularch.blogspot.com/	03.2022
	http://designalyze.com/software/grasshopper	03.2022
Gabriele Rinchi, Tutorial Grasshopper facade roof 1	dostęp: youtube.com	03.2022
Emerjestudio, Grasshopper Tutorial: Variable Facade Openings	dostęp: youtube.com	03.2022
Studio EvolveLAB, <i>Push Grasshopper geometry into Revit</i>	dostęp: youtube.com	03.2022
Weinstein E.W., Voronoi Diagram	https://mathworld.wolfram.com/VoronoiDiagram.html	03.2022
Isovist	https://www.designcoding.net/how-isovist-component-works/	03.2022
Wpływ symulacji na proces projektowy	https://www.architekturaibiznes.pl/	03.2022



11.12 | BIBLIOGRAFIA

Strona RoarkStudio	https://roarkstudio.pl/	03.2022
Strona Designbotic	https://designbotic.pl/	03.2022
Strona poświęcona projektowi Armadillo	www.armadillovault.com	03.2022
Dokumentacja filmowa obrazująca proces powstawania Armadillo Vault	https://vimeo.com/167868985	03.2022
Strona poświęcona projektowi CoDeFa	https://codefacades.ch/	03.2022
World happiness report	https://worldhappiness.report/	03.2022
Biomimikra w architekturze	https://littlegreenseed.wordpress.com/2012/06/24/hoks-architectural-biomimicry/	03.2022
National Geographic video "See How Termites Inspired a Building That Can Cool Itself"	dostęp youtube.com	03.2022
Daylight Factor	http://patternguide.advancedbuildings.net/using-this-guide/analysis-methods/daylight-factor	03.2022
Spatial Daylight Autonomy	http://patternguide.advancedbuildings.net/using-this-guide/analysis-methods/daylight-autonomy.html	03.2022
Projektowanie skoordynowane	https://www.aiacontracts.org/resources/64146-integrated-projectdelivery-a-guide	03.2022
Komisja Europejska, "Komunikat komisji do parlamentu europejskiego, rady europejskiej, rady, komitetu ekonomicznospołecznego i komitetu regionów", Bruksela	https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PL/TXT/?uri=CELEX%3A52019DC0640	03.2022

2019		
Komisja Europejska – Departament: Energia, „Efektywność energetyczna budynków”, Bruksela 2020	https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PL/TXT/PDF/?uri=CELEX:52020DC0954&from=EN	03.2022
Plan Adaptacji miasta Gdyni do zmian klimatu do roku 2030, 2019	https://bip.um.gdynia.pl/programy-w-2020-roku,8228/planadaptacji-miasta-gdyni-do-zmian-klimatu-do-roku-2030,541418	03.2022



12. STRESZCZENIE | SUMMARY

Wybrana problematyka badawcza dotyczy analizy matematycznego zapisu tworzenia form dwu- oraz trójwymiarowych oraz współczesnych metod matematycznych stosowanych w procesie projektowania architektonicznego. Obszar zainteresowań naukowych skoncentrowano na współczesnych relacjach pomiędzy matematyką stosowaną, a projektowaniem architektonicznym oraz na wykorzystywaniu poszczególnych gałęzi języka matematyki, w celu określenia i klasyfikacji wpływu zagadnienia na jakość projektu architektonicznego.

Praca ma na celu zbadanie wzajemnych powiązań matematyki stosowanej i architektury, a w szczególności zbadanie zasadności stosowania metod matematycznych w procesie tworzenia form architektonicznych.

Praca rozważa, czy na obecnym stadium rozwoju możliwości współczesnej matematyki architekci są w stanie określić za pomocą funkcji matematycznych parametry każdego aspektu wpływającego na poprawny projekt oraz czy architekci zmierzają w kierunku, aby proces projektowy całościowo oprzeć na zapisie matematycznym.

Zakres rozprawy rozpoczyna pierwszy etap pracy badawczej - poszukiwanie obecności matematyki w procesie projektowym i analiza historycznych zastosowań matematyki w projektowaniu. Kolejno, pod rozwagę poddano rozwój stopnia zaawansowania



inspiracji matematyką w projektowaniu. Analizie poddano podejście do kreowania form i poszukiwania matematycznego sposobu zapisu idei i wytycznych projektowych.

Współczesny stopień zastosowań matematyki w projektowaniu architektonicznym scharakteryzowano podejściem algorytmicznym oraz generowaniem form parametrycznych.

Kontynuacją pracy badawczej było poszukiwanie cyfrowej notacji natury, analiza cech matematycznych fraktali, algorytmiczne odwzorowanie struktur roślinnych oraz obecność zapisu i metod matematycznych w zjawisku „Morpho-ecologies”, bionice/ biomimikrze/ biomimetyce, w celu określenia celów i priorytetów stawianych współczesnej architekturze, powiązanych z ideą równoważenia rozwoju i podejściem proekologicznym.

Następnym etapem badań było przeprowadzenie własnych doświadczeń i eksperymentów - przy użyciu oprogramowania Grasshopper, stanowiącego wtyczkę do programu Rhinoceros, służącą do modelowania algorytmicznego - badania polegały na tworzeniu i analizie własnych skryptów matematycznych generujących formy przestrzenne, mogące mieć zastosowanie w architekturze.

W dalszym etapie pracy badawczej nastąpiło nawiązanie współpracy z ekspertami w dziedzinie oraz stosowanie wyżej wymienionych w realnych projektach architektoniczno-urbanistycznych, czego efektem są

rozdziały dotyczące zastosowania metod matematycznych w procesie projektowania na przykładzie koncepcji konkursowych *Centum Plaza i Pirs Przyszłości*.

Kolejno, nawiązano kontakt z ekspertami w dziedzinie oraz przeanalizowano zakres stosowania metod matematycznych w zagranicznych projektach: *Armadillo Vault* i *CoDeFa*.

W ostatecznej fazie praca ma na celu określenie w jakich fazach projektowania, w jakim stopniu i w jakich aspektach sprecyzowanie matematycznego zapisu wymagań projektowych i stosowanie metod matematycznych stanowi efektywny wydźwięk dla końcowego projektu architektonicznego.

12.4 | STRESZCZENIE | SUMMARY

Selected research issues concern the analysis of the mathematical notation of creating two- and three-dimensional forms as well as modern mathematical methods used in the process of architectural design. The area of scientific interests focuses on contemporary relations between applied mathematics and architectural design, as well as the use of individual branches of the mathematical language to determine and classify the impact of this issue on the quality of an architectural design.

The aim of the dissertation has been to investigate the interrelationships between applied mathematics and architecture, and in particular to examine the validity of the use of mathematical methods in the process of creating architectural forms.

The dissertation considers whether, at the current stage of development of the possibilities of modern mathematics, architects are able to determine, using mathematical functions, the parameters of each aspect influencing the correct design, and whether architects are moving towards basing the design process entirely on mathematical notation.

The scope of the dissertation begins the first stage of research work - the search for the presence of mathematics in the design process and the analysis of historical applications of mathematics in design. Subsequently, the development of the stage of advancement of mathematical inspiration in design has been taken into account. The approach to creating forms

and searching for a mathematical way of writing ideas and design guidelines has been analyzed.

The contemporary degree of application of mathematics in architectural design has been characterized by an algorithmic approach and generating parametric forms.

The continuation of this research work has been the search for digital notation of nature, analysis of mathematical features of fractals, algorithmic mapping of plant structures and the presence of notation and mathematical methods in the phenomenon of "Morphoecologies", bionics / biomimicry / biomimetic, in order to define the goals and priorities for contemporary architecture related to the idea of sustainable development and pro-ecological approach.

The next stage of the research has been to conduct own experiments - using Grasshopper software, which is a plug-in for Rhinoceros, used for algorithmic modeling - the research consisted in creating and analyzing own mathematical scripts generating two- and three-dimensional forms that could be applied in architecture.

At a later stage of the research work, cooperation with experts in the field has been established and the above-mentioned experiments have been applied in real architectural and urban projects, which resulted in chapters on the application of mathematical methods in the design process, based on the example of the *Centum Plaza* and *Pier of the Future* competition concepts.



12.6 | STRESZCZENIE | SUMMARY

Subsequently, the scope of application of mathematical methods in foreign projects: *Armadillo Vault* and *CoDeFa* has been analyzed.

In the final phase, the aim of this dissertation has been to determine in what design phases, to what extent and in what aspects, specifying the mathematical notation of the design requirements and using mathematical methods is an effective response to the final architectural design.

13. DOROBK NAUKOWY I ZAWODOWY

DOŚWIADCZENIE ZAWODOWE	
2019	Uprawnienia budowlane w specjalności architektonicznej do projektowania bez ograniczeń Decyzja nr: 71/POOKK/V/2019
2017 -	Architekt w firmie Anna Czech
2017 -	Architekt prowadzący w pracowni Roark Studio w Sopocie
2012 - 2017	Architekt w pracowni ArchDeco w Gdyni
10.2011	Warsztaty Międzynarodowe Erasmus Intensive Programme Gdańsk: Art&Science SYNERGY OF TECHNOLOGY AND ART
09.2010	Warsztaty Międzynarodowe Erasmus Intensive Programme Włochy, L'Aquila: Sensing the City DESIGNING URBAN EXPERIENCE
06.2010	Warsztaty Międzynarodowe Turcja, Ayvalik: European Workshop on Tourism and Architecture WATERFRONT SETTLEMENTS

WYKSZAŁCENIE		
2013 -	Politechnika Gdańska, Wydział Architektury	Studia doktoranckie
2011 - 2012		Studia magisterskie <i>Ukończone z wynikiem bardzo dobrym</i> <i>Stypendium Rektora za wyniki w nauce</i>
2007 - 2011		Studia inżynierskie <i>Ukończone z wynikiem celującym</i> <i>Stypendium Rektora za wyniki w nauce</i>
2006 - 2011	Politechnika Gdańska, Wydział Fizyki Technicznej i Matematyki Stosowanej	Studia jednolite magisterskie Specjalność: Matematyka Stosowana

PUBLIKACJE NAUKOWE			
nr	tytuł	wydawnictwo	rok
1	THE USE OF LANGUAGE OF MATHEMATICS AS AN INSPIRATION FOR CONTEMPORARY ARCHITECTURAL DESIGN	Rozdział w wydawnictwie zbiorczym recenzowanym Elsevier pod patronatem <i>Science Direct</i> , publikacja pokonferencyjna: World Multidisciplinary Civil Engineering – Architecture – Urban Planning Symposium WMCAUS	2016
2	The ARCHITECTURE AND FASHION DESIGN An Examination of the Relationship between Fashion and Architecture Design in light of Technological Advancements	Rozdział w wydawnictwie zbiorczym recenzowanym, publikacja pokonferencyjna: AR(t)CHITECTURE An International Conference at the Technion – Israel Institute of Technology Faculty of Architecture and Town Planning	2016

KONFERENCJE NAUKOWE			
nr	temat wystąpienia	nazwa konferencji	data
1	The ARCHITECTURE AND FASHION DESIGN An Examination of the Relationship between Fashion and Architecture Design in light of Technological Advancements	AR(t)CHITECTURE An International Conference at the Technion – Israel Institute of Technology Faculty of Architecture and Town Planning	21.04.2016
2	Matematyka stosowana w projektowaniu architektonicznym	Seminarium Identyfikacja naukowych aspektów technicznych	27.05.2015
3	Bez matematyki kariery nie zrobisz	IV Seminarium Bałtycki Festiwal Nauki	26-27.03.2015

PUBLIKACJE POZANAUKOWE*			
nr	tytuł publikacji	źródło	data
1	Inwestycjom potrzeba neuroarchitektury	https://www.propertynews.pl/	16.02.2022
2	Czym jest neuroarchitektura? Jak badania mózgu pomagają nam tworzyć lepsze domy	https://www.dobrzemieszkaj.pl	09.02.2022
3	Pirs Przyszłości	Prestiz magazyn trójmiejski nr 133	01.2022
		http://prestiztrojmiasto.pl	
4	Pirs Przyszłości w Gdyni. Nabrzeże jak elegancki salon miasta	https://www.whitemad.pl/	27.12.2021
5	Pirs Przyszłości w Gdyni według Roark Studio i Designbotic	https://www.onet.pl/	14.12.2021
6	Roark Studio i Designbotic mają pomysł na „Pirs Przyszłości” w Gdyni	https://www.propertynews.pl/	13.12.2021
7	Konkurs Koncepcja zespołu budynków biurowych oraz terenu zieleni miejskiej w Gdyni 3 nagroda dla ArchDeco	ARCH Nr 5 [43]	09-10.2017
8	Fascynujący dom w Trójmieście, z garażem na ikony motoryzacji, basenem i egzotyczną oranżerią	DOBRE WNĘTRZE Design dla konesera nr 10 [223]	10.2016
9	Honorowa nagroda SARP dla ArchDeco	ARCH Nr 1 [21]	01-02.2014
* w wymienionych publikacjach wymieniono nazwisko Anna Czech, jako współautora przedstawianych projektów architektonicznych lub cytowano wypowiedź Anny Czech			

UDZIAŁ W OPRACOWANIU PROJEKTÓW ARCHITEKTONICZNYCH			
data	nazwa projektu	faza metody matematyczne	pracownia
01.2022 -	Zespół budynków mieszkalnych i usługowych, ul. Pucka/Unruga, Gdynia	analiza chłonności	Roark Studio
01.2022 -	Budynek mieszkalny wielorodzinny ul. Malkowskiego, Gdynia	projekt budowlany	moduu
10-11.2021	Pirs Przyszłości – zabudowa i zagospodarowanie głównej osi kompozycyjnej Gdyni (Skwer Kościuszki i Molo Południowe)	koncepcja konkursowa	Roark Studio Designbotic
		METODY MATEMATYCZNE: analiza nasłonecznienia, radiacji, przewietrzania CFD	
08-10.2021	Stocznia Cesarska Gdańsk	masterplan, analiza chłonności	Roark Studio Designbotic
		METODY MATEMATYCZNE: analiza nasłonecznienia, przewietrzania CFD, analiza komfortu użytkownika przestrzeni	
07-08.2021	Zespół budynków mieszkalnych wielorodzinnych, ul. Partyzantów, Gdańsk	analiza chłonności	Roark Studio Designbotic
		METODY MATEMATYCZNE: analiza nasłonecznienia, przewietrzania CFD, analiza komfortu użytkownika przestrzeni	
07.2021	Budynek mieszkalny jednorodzinny ze zbiornikiem bezodpływowym na nieczystości ciekłe, ul. Małgorzaty,	projekt budowlany	wraz z: Paweł Bussold

	Chwaszczyno		
07.2021	Budynek mieszkalny jednorodzinny ze zbiornikiem bezodpływowym na nieczystości ciekłe, Banino	projekt budowlany	wraz z: Paweł Bussold
06-.2021	Zespół budynków mieszkalnych wielorodzinnych, ul. Belgradzka, Gdańsk	analiza chłoności	Roark Studio
08-10.2020	Centum Plaza – zespół zabudowy mieszkaniowej oraz biurowej z usługami towarzyszącymi, ul. Kielecka, Gdynia	projekt koncepcyjny METODY MATEMATYCZNE: analiza nasłonecznienia, radiacji, Daylight Factor(DF), Spatial Daylight Autonomy(sDA), przewietrzania CFD	Roark Studio Designbotic
06-09.2020	Przebudowa z nadbudową budynku mieszkalnego jednorodzinnego, ul. Lubichowska, Starogard Gdański	projekt budowlany	wraz z: Paweł Bussold
02.2020 -	Zespół budynków mieszkalnych wielorodzinnych, ul. Wzgórze Bernadowo, Gdynia	projekt koncepcyjny, projekt budowlany, projekt wykonawczy, materiały marketingowe, edycje optymalizacyjne	Roark Studio
11-12.2019	Zespół budynków mieszkalnych i usługowych, ul. Maxim Orłowo, Gdynia	analiza chłoności	Roark Studio
07-11.2019	Zespół budynków mieszkalnych wielorodzinnych, ul. Rdestowa, Gdynia	koncepcja konkursowa	Roark Studio
06-07.2019	Zespół budynków mieszkalnych wielorodzinnych, ul.	koncepcja konkursowa	Roark Studio

13.6 | DOROBEK NAUKOWY I ZAWODOWY

	Legnicka, Gdańsk		
02..2019 -	Budynki mieszkalne wielorodzinne z infrastrukturą techniczną i przebudową wodociągu, ul. Gdańska, Gdańsk + przebudowa drogi	projekt budowlany, projekt budowlany zamienny, projekt wykonawczy, materiały marketingowe, nadzory	Roark Studio
10.2018 - 02.2019	Stocznia Dyrekcja	projekt wnętrz	Roark Studio
07-08.2018	Zespół budynków wielorodzinnych, ul. Opata Hackiego, Gdynia	projekt koncepcyjny	Roark Studio
04-12. 2018	Chlebova - Zabudowa mieszkaniowa wielorodzinna wraz z usługami i infrastrukturą techniczną, ul. Wiosny Ludów, Gdańsk	projekt koncepcyjny, projekt budowlany, projekt przetargowy, projekt wykonawczy, materiały marketingowe	Roark Studio
03-05.2018	Dom jednorodzinny w Koleczkowie	projekt budowlany	Anna Czech
03.2018	Zagospodarowanie terenu na potrzeby wniosku o zmianę MPZP, Pierwoszyno	projekt koncepcyjny	Roark Studio
01.2018	Zespół budynków wielorodzinnych, ul. Nowatorów, Gdańsk	koncepcja konkursowa	Roark Studio
11.2017 - 12.2018	Budynek mieszkalny wielorodzinny z usługami w parterze wraz z infrastrukturą techniczną, ul. Powstańców Warszawy, Spół	projekt budowlany, projekt wykonawczy, optymalizacja METODY MATEMATYCZNE: modelowanie parametryczne detalu okiennic	Roark Studio
10.2017	Zespół budynków mieszkalnych wielorodzinnych, Pogórze	analiza chłonności, projekt koncepcyjny	Roark Studio

10.2017	Zespół budynków mieszkalnych wielorodzinnych, Gdańsk ul. Malczewskiego	koncepcja konkursowa	Roark Studio
10,11.2017	Budynek mieszkalny wielorodzinny, Sopot, ul. Goyki,	projekt koncepcyjny	Roark Studio
10.2017	Zespół budynków mieszkalnych wielorodzinnych, Gdańsk, ul. Opacka	koncepcja pokonkursowa, projekt budowlany	Roark Studio
10.2017 04.2018	Zespół budynków mieszkalnych wielorodzinnych, Gdynia, ul. Chyłońska	analiza chłonności, projekt koncepcyjny	Roark Studio
10.2014 - 05.2017	Centrum Medycyny Nieinwazyjnej Gdańskiego Uniwersytetu Medycznego	koncepcja konkursowa, projekt budowlany, projekt wykonawczy	ArchDeco
01.2014 - 05.2017	Zespół budynków apartamentowo-hotelowych w Juracie	projekt koncepcyjny, projekt budowlany, projekt wykonawczy	ArchDeco
03-05.2017	Konkurs na opracowanie koncepcji architektoniczno-urbanistycznej budynku STOS (Smart and Transdisciplinary knOwledge Services)	koncepcja konkursowa	ArchDeco
01.2017	Zespół mieszkaniowy przy ul. Letnickiej w Gdańsku	analiza oddziaływania	ArchDeco
11-12.2016	Konkurs urbanistyczno - architektoniczny na koncepcyjny projekt zagospodarowania i zabudowy terenu przy ulicy Toruńskiej w Gdańsku	koncepcja konkursowa	ArchDeco
09-10.2016	Konkurs na opracowanie koncepcji architektoniczno-	koncepcja konkursowa	ArchDeco

13.8 | DOROBEK NAUKOWY I ZAWODOWY

	urbanistycznej zespołu obiektów biurowych oraz koncepcji terenu zieleni miejskiej		
09-10.2016	Konkurs na opracowanie koncepcji architektoniczno-urbanistycznej zespołu obiektów biurowych oraz koncepcji terenu zieleni miejskiej przy ul. Hryniewieckiego 10 w Gdyni zagospodarowanie, rzuty, elewacje, model	koncepcja konkursowa	
08.2016	Dalmor Gdynia	projekt wykonawczy	ArchDeco
06.2016	Obiekt biurowo-usługowy Pewik w Rumii	projekt koncepcyjny	ArchDeco
09-10.2015	Konkurs architektoniczno-urbanistyczny na opracowanie koncepcji zabudowy mieszkalno-usługowej zlokalizowanej w Gdańsku przy Al. Jana Pawła II	koncepcja konkursowa	ArchDeco
04-05.2014	Konkurs na Pawilon Polski na Expo w Mediolanie	koncepcja konkursowa	Anna Czech
01.2014	Konkurs architektoniczno-urbanistyczny zespołu wielofunkcyjnych budynków hotelowo-usługowych przy Nabrzeżu Beniowskiego w Gdyni	koncepcja konkursowa	ArchDeco
2013-2014	Budynek mieszkalny jednorodzinny z usługami turystyki ul. Bolesława Prusa w Gdyni	projekt koncepcyjny, projekt budowlany, nadzory	ArchDeco
01.2013	Budynek biurowy Tryton w Gdańsku	projekt budowlany, projekt wykonawczy,	ArchDeco

		projekt wnętrz	
01.2013	Centrum handlowe Hevelius w Gdańsku	projekt koncepcyjny	ArchDeco
09-11.2012	Konkurs na koncepcję architektoniczno-urbanistyczną budynku Gdyńskiej Szkoły Filmowej	koncepcja konkursowa	ArchDeco
09-11.2012	Konkurs na koncepcję architektoniczno-techniczną zwodzonej kładki pieszej przez rzekę Motławę na wyspę Ołowiankę	koncepcja konkursowa	ArchDeco
11.2012	Golf Club w Tokarach	projekt koncepcyjny	ArchDeco
07.2012	Budynek biurowy Red ul. Podolska Gdynia	aranżacja wnętrz biurowych	ArchDeco
07.2012	Konkurs na koncepcję architektoniczno-budowlaną rozbudowy szpitala uzdrowiskowego Mieszko w Kamieniu Pomorskim	koncepcja konkursowa	ArchDeco
05.2012	Konkurs na kompleks wielofunkcyjny Baltic Park Molo w Świnoujściu	koncepcja konkursowa	ArchDeco
11.2011–01.2012	Konkurs na Centrum Dziedzictwa Historycznego Miasta Gdańska	koncepcja konkursowa	Wraz z: Agnieszka Kuniczuk, Patrycja Wosik
11.2010 – 01.2011	Konkurs na rewitalizację Królewskiej Fabryki Karabinów	koncepcja konkursowa	wraz z: Emilia Ewertowska
11.2010 – 01.2011	Rewitalizacja osiedla Suchostrzygi w Tczewie	Projekt koncepcyjny	Wraz z: Emilia Ewertowska, Patrycja Wosik, Aleksandra Flejszar

