



WYDZIAŁ
ARCHITEKTURY

Imię i nazwisko studenta:

Nr albumu:

Poziom kształcenia: studia drugiego stopnia

Forma studiów: stacjonarne

Kierunek studiów: Architektura

Specjalność/profil: -

PRACA DYPLOMOWA MAGISTERSKA

Tytuł pracy w języku polskim: Od kodu do przestrzeni. Studium użycia algorytmów w procesie projektowym na przykładzie budynku dydaktyczno-badawczego dla Wydziału Architektury Politechniki Gdańskiej.

Tytuł pracy w języku angielskim: From code to space. A study of the use of algorithms in the design process, based on the example of a didactic and research building for the Faculty of Architecture at Gdańsk University of Technology.

STRESZCZENIE

W dobie rewolucji cyfrowej proces projektowy w architekturze ulega głębokiej transformacji. Tradycyjne metody oparte na intuicji i doświadczeniu projektanta coraz częściej wspierane są przez algorytmy generatywne, symulacje środowiskowe i narzędzia sztucznej inteligencji. Zmienia to sposób poszukiwania formy architektonicznej, charakter podejmowanych decyzji, projektowanie staje się procesem opartym na danych, wielokryterialnej analizie i dynamicznym testowaniu wariantów. W efekcie architektura zyskuje nowe możliwości w zakresie zrównoważonego kształtowania przestrzeni, integrując aspekty funkcjonalne, estetyczne i środowiskowe w spójny system projektowy.

Praca magisterska dotyczy projektu budynku dydaktyczno-badawczego Wydziału Architektury Politechniki Gdańskiej, którego opracowanie stanowi odpowiedź na wyzwania związane z cyfrową rewolucją w architekturze. Zastosowanie algorytmów generatywnych, optymalizacji wielokryterialnej i narzędzi sztucznej inteligencji pozwoliło na weryfikację formy, funkcji oraz warunków środowiskowych w sposób niedostępny dla tradycyjnych metod projektowych.

ABSTRACT

In the era of the digital revolution, the design process in architecture is undergoing a profound transformation. Traditional methods based on the architect's intuition and experience are increasingly supported by generative algorithms, environmental simulations, and artificial intelligence tools. This changes the way architectural form is sought and the nature of decisions made, with design becoming a process based on data, multi-criteria analysis, and dynamic testing of variants. As a result, architecture gains new possibilities in terms of sustainable space design, integrating functional, aesthetic, and environmental aspects into a coherent design system.

The master's thesis concerns the design of a teaching and research building for the Faculty of Architecture at Gdańsk University of Technology, which responds to the challenges of the digital revolution in architecture. The use of generative algorithms, multi-criteria optimization, and artificial intelligence tools has allowed for the verification of form, function, and environmental conditions in a way that is not possible with traditional design methods.

Od kodu do przestrzeni. Studium użycia algorytmów w procesie projektowym na przykładzie budynku dydaktyczno-badawczego dla Wydziału Architektury Politechniki Gdańskiej.

SPIIS TREŚCI

CZĘŚĆ I. STUDIUM PROBLEMU

1. Wstęp i cel pracy 10

- 1.1. Przedmiot pracy 10
- 1.2. Uzasadnienie wyboru i cel pracy 10

2. Rewolucja cyfrowa 12

- 2.1. Definicja zjawiska 12
- 2.2. Kontekst historyczny 12
 - 2.2.1. Pierwsze komputery 12
 - 2.2.2. Komputery osobiste i Internet 14
 - 2.2.2. Sztuczna Inteligencja 15
- 2.3. Myślenie komputacyjne 18
 - 2.3.1. Główne założenia i geneza 18
 - 2.3.2. CT w architekturze 20

3. Architektura cyfrowa 20

- 3.1. Definicja zjawiska 20
- 3.2. Źródła stosowania algorytmów 21
 - 3.2.1. Geometria euklidesowa 21
 - 3.2.2. Złoty podział i fraktale 22
 - 3.2.3. Symetria 25
 - 3.2.4. Geometria nieeuklidesowa 26
 - 3.2.5. Reguły i przypadkowość 30
- 3.3. Era narzędzi cyfrowych 33
 - 3.3.1. Computer-Aided Design 33
 - 3.3.2. Przetwarzanie geometrii 34
 - 3.3.3. Algorytmy genetyczne 35
 - 3.3.4. Symulacje i optymalizacja 36
 - 3.3.5. Parametrycyzm 37
 - 3.3.6. Sztuczna Inteligencja 40
 - 3.3.7. Rzeczywistość rozszerzona 45
 - 3.3.8. Cyfrowa fabrykacja 46
- 3.4. Realizacje architektoniczne 47
 - 3.4.1. Opera w Sydney 48
 - 3.4.2. Muzeum Guggenheima w Bilbao 49
 - 3.4.3. Kunsthaus w Grazu 50
 - 3.4.4. Stacje kolejki linowej w Innsbrucku 51

4. Architektura przyszłości	52
4.1. Rozpowszechnienie SI	52
4.1.1. Generatywna SI w 3D	52
4.1.2. Kreatywność	52
4.1.3. Kryzys klimatyczny	53
4.1.4. Źródła i jakość danych	54
4.1.5. Estetyka	56
4.2. <i>Metaverse</i>	57
4.3. Biomateriały i cyfrowa fabrykacja	58
4.4. Adaptacyjność	60
4.5. Rola architekta	61
5. Podsumowanie	62
CZĘŚĆ II. UWARUNKOWANIA PROJEKTOWE	
6. Projektowana funkcja i lokalizacja	64
6.1. Idea projektowa	64
6.2. Funkcja	65
6.3. Lokalizacja	65
7. Kontekst przestrzenny	66
7.1. Analiza funkcjonalna	66
7.2. Analiza wysokości zabudowy	67
7.3. Analiza komunikacji kołowej i torowej	68
7.4. Analiza komunikacji pieszej	70
7.5. Transport publiczny	71
7.6. Obiekty przyrodnicze	72
7.7. Dostęp do rekreacji	73
7.8. Zagrożenie powodziowe	74
7.9. Analiza zabudowy kampusu Politechniki Gdańskiej	75
8. Klimat	76
8.1. Temperatura	76
8.2. Wilgotność	77
8.3. Ścieżki słońca	77
8.4. Roza wiatrów i prędkość wiatru	78
8.5. Komfort cieplny	79
8.6. Cele środowiskowe	80
9. Wstępne założenia projektowe	81
9.1. Główne założenia	81
9.2. Aspekty poddane algorytmom	81

CZĘŚĆ III. PARAMETRYKA I OPTYMALIZACJA

10. Model parametryczny i proces optymalizacji	83
10.1. Zmienne decyzyjne	83
10.2. Ograniczenia i warunki brzegowe	84
10.3. Definicja funkcji celu	84
10.4. Środowisko symulacji	85
10.4.1. Ladybug Tools i dane klimatyczne EPW	85
10.4.2. Uczenie głębokie w analizach przewietrzania i komfortu cieplnego	86
10.6. Optymalizacja	87
10.6.1. Algorytmy genetyczne i Wallacei X	87
10.6.2. Ustawienia, przebieg i analiza wyników	88
11. Etap I - 6 brył	89
11.1. Punkt wyjściowy	89
11.2. Optymalizacja jednokryterialna nasłonecznienia	89
11.3. Optymalizacja wielokryterialna nasłonecznienia	94
11.3.1. Dane wejściowe	94
11.3.2. Cele (fitness functions)	94
11.3.3. Zmienne projektowe	94
11.3.4. Konfiguracja algorytmu i symulacja	94
11.3.5. Analiza wyników	95
11.4. Wnioski	99
12. Etap II - 4 bryły	100
12.1. Punkt wyjściowy	100
12.2. Optymalizacja jednokryterialna nasłonecznienia	100
12.3. Optymalizacja wielokryterialna nasłonecznienia	105
12.3.1. Dane wejściowe	105
12.3.2. Cele (fitness functions)	105
12.3.3. Zmienne projektowe	105
12.3.4. Konfiguracja algorytmu i symulacja	105
12.3.5. Analiza wyników	105
12.4. Wnioski	109
13. Etap III i IV - 3 bryły	110
13.1. Punkt wyjściowy	110
13.2. Optymalizacja jednokryterialna nasłonecznienia	110
13.3. Optymalizacja wielokryterialna nasłonecznienia	120
13.3.1. Dane wejściowe	120
13.3.2. Cele (fitness functions)	120
13.3.3. Zmienne projektowe	120
13.3.5. Konfiguracja algorytmu i symulacja	120

13.3.6. Analiza wyników i metoda wyboru rozwiązań	120
13.4. Wnioski	124
13.5. Wybór opcji do dalszego rozwiązania	124
CZĘŚĆ IV. PROJEKT ARCHITEKTONICZNY	
14. Szczegółowe założenia projektowe	127
14.1. Cele funkcjonalne	127
14.2. Cele środowiskowe	120
14.3. Cele estetyczne	128
15. Rozwiązania urbanistyczne	129
16. Architektura	131
16.1. Rzuty	131
16.2. Przekroje	137
16.3. Schematy powiązań funkcjonalnych	138
16.4. AI w kształtowaniu elewacji	139
17. Rozwiązania konstrukcyjne	142
18. Rozwiązania instalacyjne	146
18.1. Internet Rzeczy i algorytmy predykcyjne	146
18.2. Odzysk ciepła odpadowego (<i>Heat-to-Heat</i>)	146
18.3. Pompy ciepła nowej generacji	147
18.4. Fotowoltaika na światło rozproszone	147
19.6. Piezoelektryczne podłogi " <i>energy-floor</i> "	147
19.7. <i>Quantum Glass</i> , czyli szyby produkujące prąd	148
20.2. Woda deszczowa	148
22. Wizualizacje i elewacje	149
CZĘŚĆ V. WNIOSKI KOŃCOWE I PERSPEKTYWY	
23. Synteza wyników badań i ocena	153
25. Kierunki dalszych badań	154
Spis literatury	157
Wykaz rysunków	158
CZĘŚĆ GRAFICZNA	162

1. WSTĘP I CEL PRACY

1.1 Przedmiot pracy

Rewolucja cyfrowa znajduje się w pełnym rozkwicie. Wpływ komputeryzacji odczuwamy w każdej dziedzinie naszego życia, przyniosło to wiele korzyści, bez których obecnie nie wyobrażamy sobie funkcjonowania. Stało się to dla społeczeństwa czymś paradoksalnie naturalnym. Jednocześnie powszechna informatyzacja niesie za sobą wiele obaw, w tym chociażby widmo fali bezrobocia w związku z masową automatyzacją, lęk przed inwigilacją i wyciekami danych osobowych, wzrost nierówności czy wojna cybernetyczna. Pojawienie się terminu myślenie komputacyjne (*computational thinking*) w publicznym dyskursie ma na celu poszukiwanie odpowiedzi i rozwiązań problemu pogodzenia korzyści z zagrożeniami. Ten sposób myślenia daje nadzieję, że możemy racjonalnie myśleć o możliwościach i zagrożeniach związanych z masową komputeryzacją, a także mamy możliwość nauczyć się projektować komputery, oprogramowanie i sieci tak, aby zmaksymalizować korzyści i zminimalizować ryzyko. Myślenie komputacyjne nie jest tylko czymś, co muszą znać programiści, ale jest ono narzędziem do zrozumienia świata kształtowanego przez rozwój technologiczny. Nieodwracalnie zmieniły się narzędzia i metody także w nauce, w tym w architekturze i urbanistyce.

Architektura jako dyscyplina jednocześnie artystyczna i techniczna, zawsze była ściśle związana z postępem technologicznym i innowacjami inżynierskimi. Od zarania dziejów architekci i budowniczowie wykorzystywali dostępne narzędzia i metody, aby kreować i realizować swoje wizje przestrzenne, które będą coraz to wyższej jakości. W ostatnich dekadach XX wieku i na początku XXI, architektura wkroczyła w nową erę dzięki rewolucji cyfrowej. Komputery stały się kluczowymi i nieodłącznymi elementami procesu projektowego. Centralną częścią tej transformacji jest postępująca algorytmizacja, czyli zastosowanie algorytmów komputerowych do m. in. automatyzacji i optymalizacji różnych etapów procesu projektowego. Algorytmy dzięki swojej zdolności do przetwarzania ogromnych ilości danych i wykonywania skomplikowanych obliczeń w krótkim czasie, umożliwiają architektom eksplorację nowych form i konstrukcji, które wcześniej były zdecydowanie poza zasięgiem tradycyjnych metod projektowania. Algorytmizacja może nie tylko przyspieszyć proces projektowy, ale również dać nowe możliwości twórcze, co pozwoliłoby na projektowanie budynków i założeń urbanistycznych, które byłyby bardziej zrównoważone, funkcjonalne, a także estetyczne. Jednak z rosnącym wpływem najnowszych technologii na branżę architektoniczną pojawiają się również pytania i wyzwania dotyczące roli architekta w procesie projektowym, znaczenia ludzkiej kreatywności oraz potencjalnych zagrożeń związanych z automatyzacją.

1.2 Uzasadnienie wyboru tematu i cel pracy

Architektura od zawsze była dziedziną, która rozwijała się równolegle z postępem technologicznym. Od starożytności, gdzie podstawowe narzędzia geometryczne były wykorzystywane do tworzenia monumentalnych budowli, które podziwiamy do dzisiaj, przez rewolucję przemysłową, która przyniosła nowe materiały i techniki budowlane, aż po współczesność, gdzie technologie cyfrowe rewolucjonizują sposób, w jaki dzisiaj projektujemy.

W kontekście panującej komputeryzacji rola algorytmów i narzędzi cyfrowych w architekturze staje się coraz bardziej kluczowa.

Istnieje kilka istotnych powodów, dla których należy zająć się tym tematem. Po pierwsze, rozwój technologii cyfrowej, w tym m.in. projektowania parametrycznego, generatywnego czy BIM (*Building Information Modeling*), zmienia sposób, w jaki architekci podchodzą do kreowania nowych przestrzeni. Algorytmy wspierają tradycyjne procesy projektowe i odkrywają nowe możliwości twórcze. Kolejnym aspektem jest to, że algorytmizacja w architekturze jest tematem, który ma bardzo duże interdyscyplinarne znaczenie, łączy w sobie elementy architektury, informatyki, matematyki, inżynierii, a także nauk społecznych. W dobie rewolucji cyfrowej, która wpływa na każdy aspekt naszego życia, zrozumienie sposobów, w jaki algorytmy wpływają na decyzje projektowe, staje się kluczowe.

Wybór tematu jest także uzasadniony przez potrzebę zbadania potencjalnych zagrożeń i wyzwań, które niesie ze sobą nadmierna automatyzacja procesu projektowego. Jak zauważają badacze, zbyt duże poleganie na technologii może prowadzić do homogenizacji form architektonicznych, zmniejszenia bądź całkowitego pozbycia się roli intuicji i kreatywności architekta, a także problemów etycznych związanych z zarządzaniem danymi i bezpieczeństwem (Schumacher, 2009). Między innymi dlatego analiza algorytmizacji w projektowaniu nie powinna skupiać się jedynie na technicznych aspektach, ale kluczowym jest także spojrzenie na jej wpływ w kontekście społeczeństwa i kultury.

Celem pracy jest kompleksowe zbadanie roli zaawansowanych algorytmów w architekturze, biorąc pod uwagę ich wpływ na współczesny proces projektowy oraz realizację innowacyjnych form architektonicznych. Praca ma na celu zrozumienie jak nowoczesne technologie wpływają na funkcjonalność, estetykę i zrównoważony rozwój w architekturze. Aby te zamierzenia zrealizować, zostało postawionych kilka kluczowych pytań badawczych. Jakie były główne etapy rozwoju technologii cyfrowych w architekturze i jak wpłynęły na proces projektowy? W jaki sposób narzędzia algorytmiczne mogą wpłynąć na jakość projektowanych obiektów i założeń? Jak algorytmy wpływają na kreatywność i intuicję architekta? Jakie są etyczne i społeczne konsekwencje algorytmizacji w architekturze? Jak kreśli się przyszłość branży architektonicznej i jakie stawia ona wyzwania przed współczesnymi architektami?

2. REWOLUCJA CYFROWA

2.1. Definicja zjawiska

Rewolucja cyfrowa zwana jest też trzecią rewolucją przemysłową bądź rewolucją naukowo-techniczną. To zapoczątkowany po II wojnie światowej i trwający do dziś proces szybkich zmian w nauce, technice i produkcji. Jedną z przyczyn tego zjawiska było ogromne zwiększenie popytu na badania naukowe. Brały w tym udział państwa uczestniczące w wyścigu zbrojeń w okresie zimnej wojny, a także wielkie korporacje, które działały na zasadach oligopolu¹ i konkurowały ze sobą w dziedzinie nowych produktów. Jedną z charakterystycznych cech rewolucji naukowo-przemysłowej jest niebotyczne skrócenie czasu procesu od momentu powstania innowacji do jej powszechnego wdrożenia. Liczne przełomowe innowacje składają się na trzecią rewolucję przemysłową, w tym nowe źródła energii (np. energia jądrowa i słoneczna), automatyzacja i robotyzacja wielu procesów w różnych dziedzinach, nowe materiały, komputeryzacja i rozwój szybkiego przetwarzania bardzo dużej ilości danych. Te procesy przyczyniły się do wielu zjawisk, m.in. do zmiany stylu życia w krajach rozwiniętych, wydłużenia się przeciętnego czasu trwania życia, skrócenia czasu pracy, możliwości szybkiego przemieszczania się ludzi i towarów, poprawy dostępności i wymiany informacji, a także do rozwoju środków masowego przekazu (Encyklopedia PWN). Przy tym pojawiły się też zjawiska negatywne, związane z trudnościami przystosowania się społeczeństwa do tak szybkich zmian, świat stał się bardziej dynamiczny i zmienny niż kiedykolwiek. Pojawił się lęk przed utratą pracy przez dużą część społeczeństwa związany z automatyzacją, strach przed masową inwigilacją, sprzedażą danych osobowych i utratą prywatności, a także wzrastającą polaryzacją społeczeństwa, wojną cybernetyczną i wzrostem nierówności (Denning i Tedre, 2019).

2.2. Kontekst historyczny

2.2.1. Pierwsze komputery

Do XVII wieku przyrządy ułatwiające operacje matematyczne stanowiły różnego rodzaju liczydła. Znacznym postępem było odkrycie logarytmów (za twórcę uważa się szkockiego matematyka Johna Napiera), w tym okresie powstały też pierwsze maszyny liczące, które wykonywały mechaniczne operacje dodawania i odejmowania, a niektóre również mnożenia i dzielenia (Encyklopedia PWN).

Jednak prawdziwych początków informatyki można doszukiwać się w XIX w., gdy pojawiła się koncepcja automatycznej i uniwersalnej maszyny liczącej autorstwa Charlesa Babbage'a. Znany jest ze swoich dwóch największych projektów, czyli "maszyny analitycznej" (*analytical engine*) i "maszyny różnicowej" (*difference engine*). Jego maszyna różnicowa zautomatyzowała obliczanie matematycznych tabel, takich jak tabele logarytmów czy sinusów, natomiast maszyna analityczna miała być komputerem ogólnego przeznaczenia, który będzie

¹ Oligopol – struktura rynku, w której ogromne przedsiębiorstwa konkurują ze sobą, a kilku dostawców tworzy tzw. grupę dominującą, dostarczającą ponad 80% podaży danej gałęzi (Encyklopedia PWN).

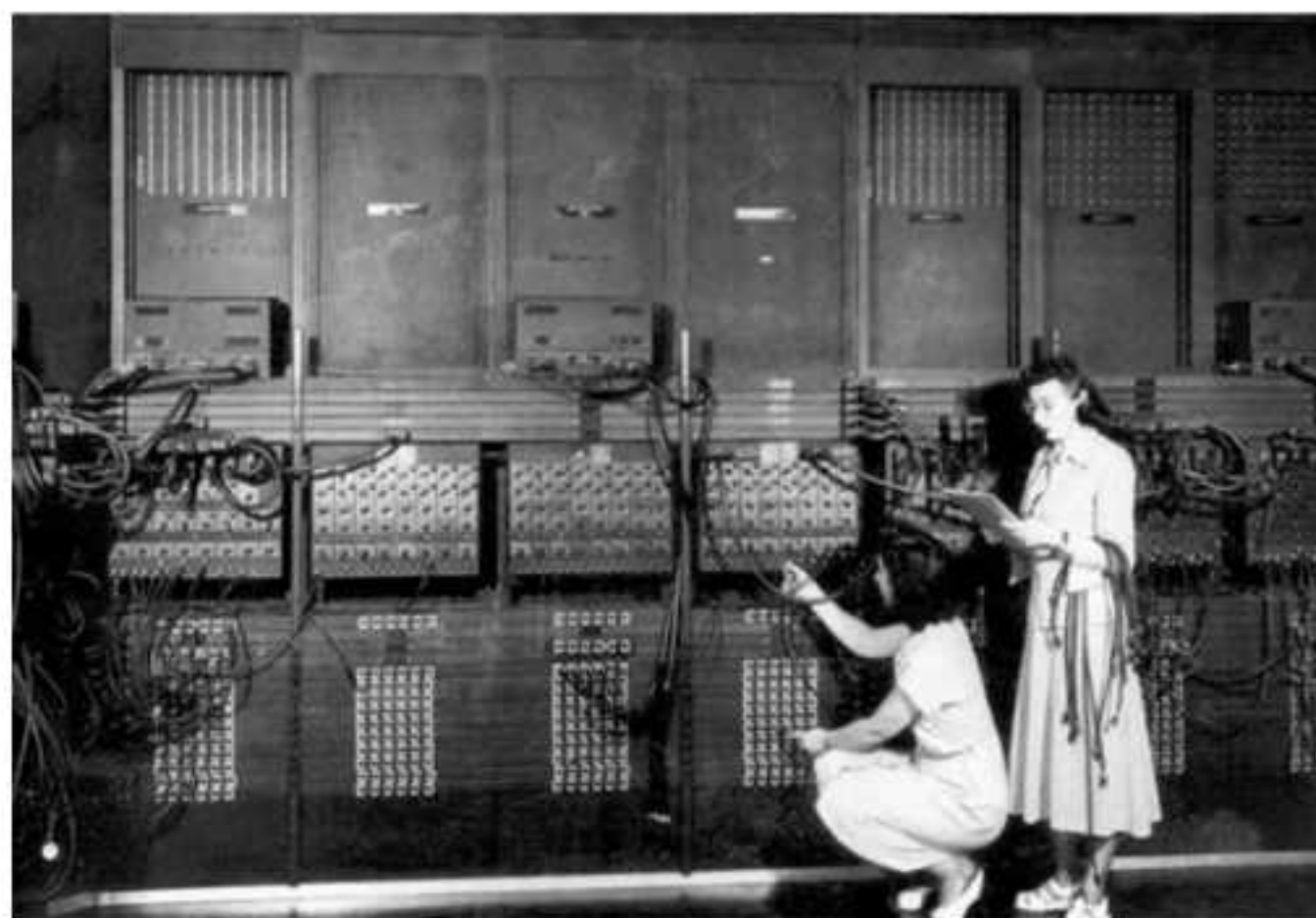
zdolny do wykonywania dowolnych funkcji obliczeniowych. Miał na celu wyeliminować błędy, zastępując ludzi maszynami, które się nie męczą, nie nudzą i nie rozpraszają. Rząd brytyjski przyznał mu fundusze na rozwój maszyny różnicowej (Denning i Tedre, 2019).

Zbudowanie tej maszyny okazało się o wiele trudniejsze niż Babbage'owi się wydawało, ówczesne metody inżynierii mechanicznej nie były wystarczające. W latach 30. XIX w. Babbage wymyślił koncept maszyny analitycznej, która nie potrzebowałaby tak skomplikowanej technologii i jednocześnie byłaby bardziej wydajna, miałaby potrafić obliczać jakąkolwiek matematyczną funkcję. W tamtym momencie rząd brytyjski po porażce nad maszyną różnicową nie zaufała Babbage'owi i nie podjął się sfinansowania tego przedsięwzięcia. Projekt nie został do końca zrealizowany za jego życia, jego wizjonerska idea została uśpiona na następne 80 lat (Denning i Tedre, 2019).

Istotnym jest także podkreślić rolę Ady Lovelace, z którą Babbage współpracował. Lovelace zaprojektowała algorytmy wykorzystane w maszynie analitycznej. Oboje są często przedstawiani jako pierwsi programiści. Co więcej, Lovelace postrzegała maszynę Babbage'a jako coś więcej niż kalkulator, dla niej był to procesor każdej informacji, którą można zakodować za pomocą symboli. Jej spostrzeżenie wyprzedziło o sto lat kluczowe założenie współczesnej ery komputerów (Denning i Tedre, 2019).

Projekt Babbage'a nie mógł zostać zrealizowany przy użyciu ówczesnej technologii, ale wiele dekad później nadejście ery elektroniki otworzyło nowe możliwości. Okres od lat 30. XX w. był jednym z najbardziej intensywnych pod względem eksperymentów, które miały na celu zbudowanie maszyny obliczeniowej. Konrad Zuse zbudował pierwszy komputer w Niemczech w 1938 r., natomiast ówczesna władza nie wzięła jego projektu na poważnie, więc wywarł on niewielki wpływ. Howard Aiken we współpracy z IBM (International Business Machines Corporation) i finansowym wsparciem amerykańskiej armii skonstruował maszynę zwaną Mark I na uniwersytecie harwardzkim w 1944 r. Był to komputer elektromechaniczny, jego programy i dane wejściowe były przechowywane zewnętrznie na perforowanych taśmach papierowych (Denning i Tedre, 2019).

Na Uniwersytecie Pensylwanii, John Mauchly i Presper Eckert, przy wsparciu amerykańskiej armii zaprojektowali najbardziej znany wśród pierwszych elektronicznych komputerów. ENIAC (*Electronic Numerical Integrator and Computer*) był bardzo wpływowy jako dowód koncepcji w pełni elektronicznego komputera i zainspirował kolejne projekty coraz to lepszych maszyn. W 1945 r. do zespołu dołączył John von Neumann, aby zaprojektować lepszy komputer w oparciu o swoje doświadczenie. Nowy projekt obejmował podział maszyny na trzy główne podsystemy: jednostkę centralną (CPU), pamięć do przechowywania danych oraz jednostkę input-output (I/O) do komunikacji zewnętrznej. Ten sposób organizacji stał się znany jako "architektura von Neumanna", która stała się podstawą dla prawie wszystkich komputerów od tamtego czasu do dziś (Dennign i Tedre, 2019; Haigh i Ceruzzi, 2021).



Rys. 2.1. ENIAC (*Electronic Numerical Integrator and Computer*), najbardziej znany z pierwszych komputerów. Źródło: strona internetowa National Geographic, <https://www.national-geographic.pl/historia/77-lat-temu-zademonstrowano-pierwszy-komputer-maszyna-wazyla-30-ton/>

2.2.2. Komputery osobiste i Internet

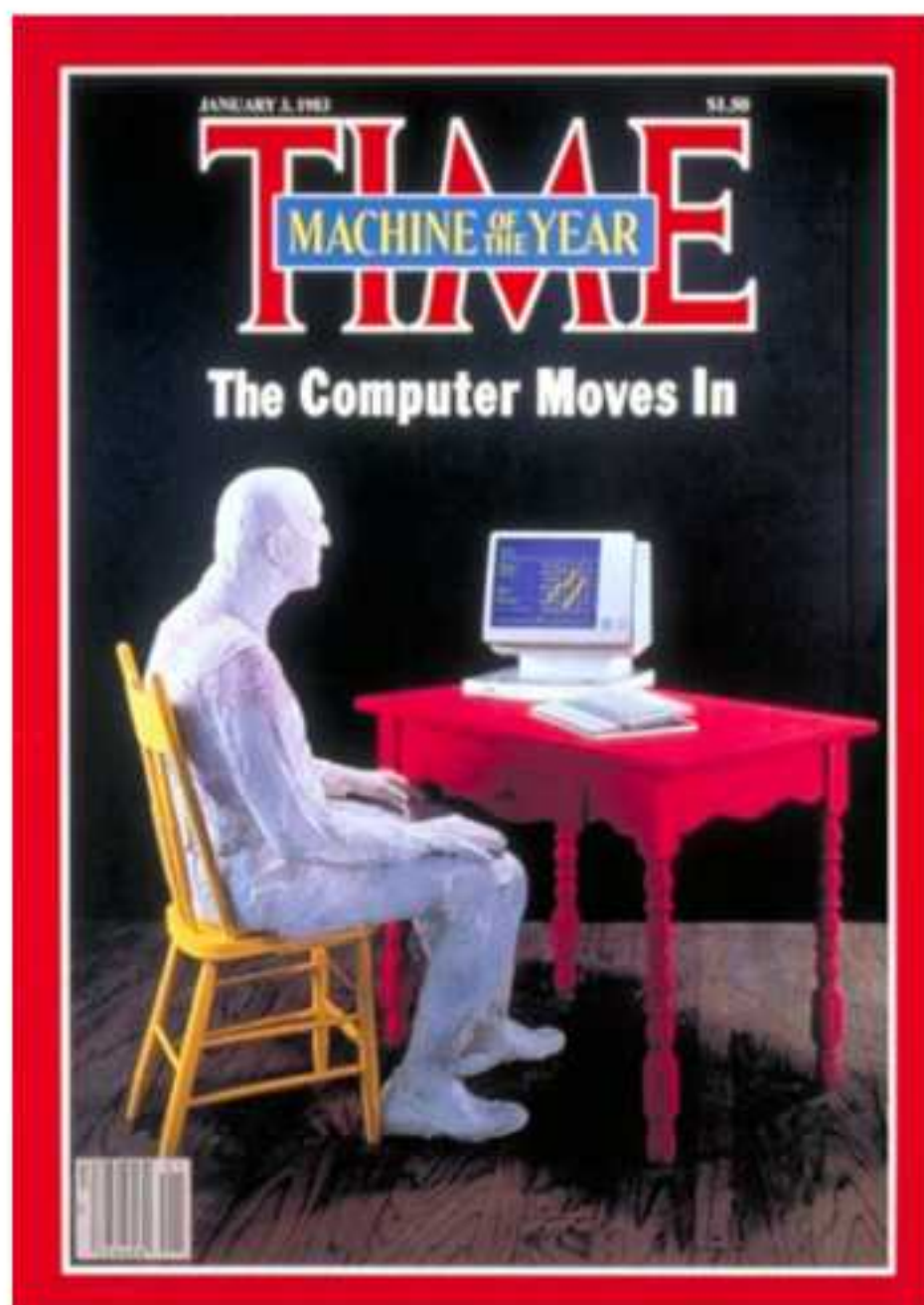
Ważnym elementem w rozwoju komputerów był wynalazek tranzystora w 1947 r., który zastąpił dotychczas używane lampy elektronowe, co umożliwiło miniaturyzację urządzeń elektronicznych, co było bardzo istotne dla rozwoju komputerów osobistych. W latach 60. pojawiły się pierwsze komputery *mainframe*², takie jak IBM 360, które były wykorzystywane przez korporacje do zarządzania dużymi ilościami danych. Natomiast to wynalezienie mikroprocesora przez firmę Intel w 1971 r. zapoczątkowało największy przełom, który umożliwił wprowadzenie komputerów osobistych na szeroką skalę. Lata 70. i 80. to okres najintensywniejszego rozwoju w tym zakresie, w 1975 r. Paul Allen i Bill Gates założyli Microsoft, a w 1976 r. Steve Jobs i Steve Wozniak stworzyli Apple, co przyczyniło się do popularyzacji komputerów PC. W 1981 r. IBM wprowadził na rynek pierwszy komputer osobisty³, który stał się standardem na rynku komputerowym (Encyklopedia PWN; Haigh i Ceruzzi, 2021).

Ostatnie dekady XX w. to czas dynamicznego rozwoju Internetu, który stał się jednym z najważniejszych wynalazków epoki cyfrowej. Internet, który początkowo był opracowany jako sieć ARPANET w latach 60. W latach 80. Tim Berners-Lee stworzył podwaliny dzisiejszej usługi WWW (*World Wide Web*), była to przestrzeń, gdzie przechowywano informacje, które można było odszukiwać, wpisując adres URL zaczynający się od http (Encyklopedia PWN). Z początkiem XXI

² Mainframe – duży, wieloprotocowy komputer, mogący obsługiwać wielu użytkowników jednocześnie (Słownik Języka Polskiego PWN).

³ Dokładna nazwa modelu to IBM 5150 PC, jego premiera miała miejsce 12 sierpnia 1981 r. Jego pamięć RAM wynosiła 16 Kb, którą można było rozszerzyć do 640 Kb.

wieku rewolucja cyfrowa nabrała jeszcze większego tempa. Cyfryzacja objęła praktycznie wszystkie dziedziny życia, od edukacji i medycyny, po przemysł i administrację publiczną. Rozwój technologii mobilnych, w tym smartfonów, zmienił sposób w jaki ludzie korzystają z technologii, a dostęp do Internetu stał się powszechny. Rozwój *big data* i sztucznej inteligencji zrewolucjonizował gospodarkę, umożliwiając analizę ogromnych ilości danych i automatyzację procesów.

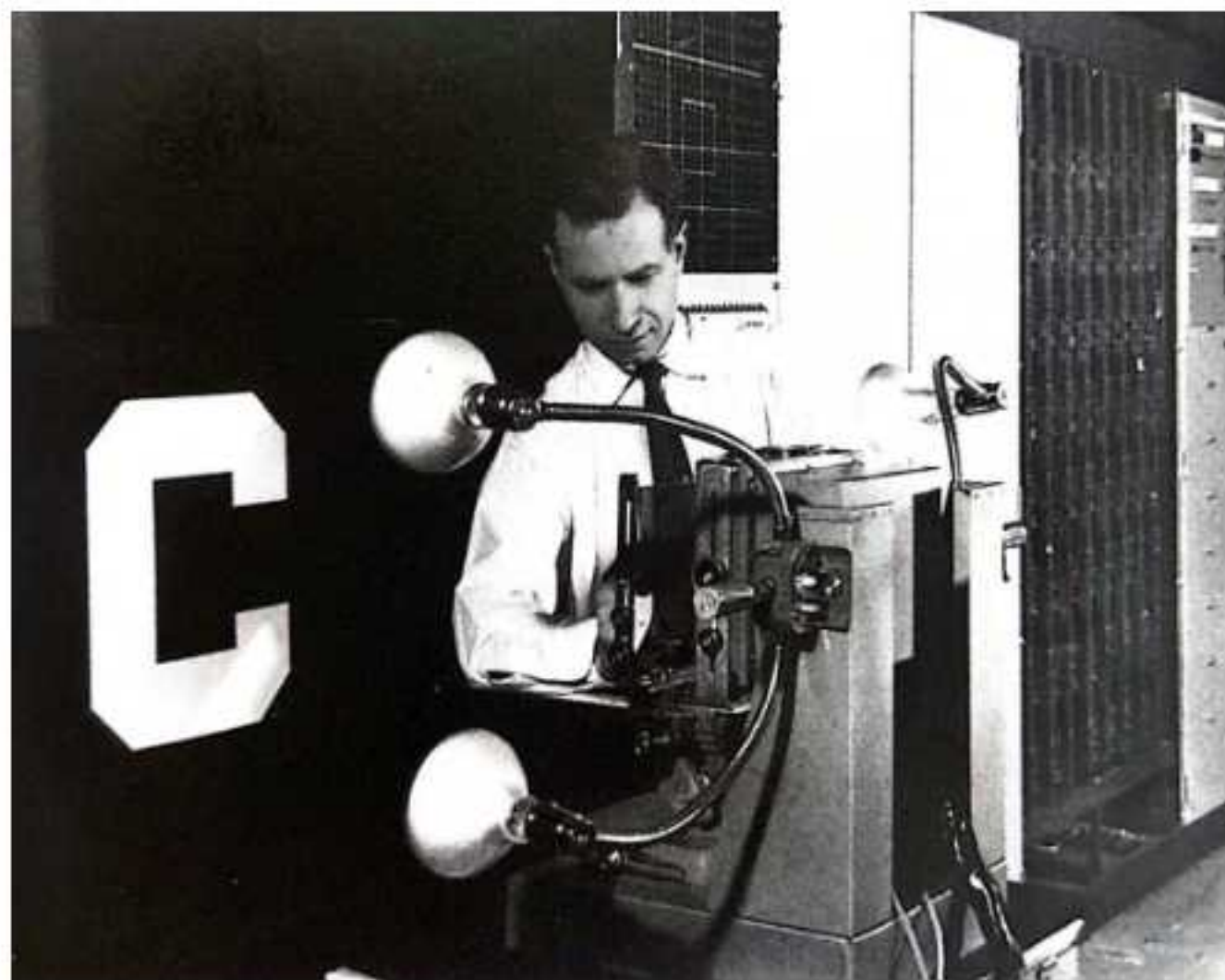


Rys. 2.2. Okładka magazynu Time z 1983 r., komputer osobisty został wtedy uznany za „maszynę roku”.

2.2.3. Sztuczna Inteligencja

Lata 40. XX wieku są uważane za punkt zwrotny wielu znaczących przełomów, które razem stanowią podstawę naszej współczesnej definicji sztucznej inteligencji. W 1943 r. amerykańscy naukowcy McCulloch i Pitts po raz pierwszy określili wstępne matematyczne sformułowanie biologicznego neuronu (McCulloch i Pitts, 1943). Mimo teoretycznego charakteru, model ten zapewnił ówczesnej społeczności naukowej wczesną definicję „sztucznej sieci” (*artificial network*). W skrócie, ich model opisywał proces obliczeniowy wykonywany przez neuron w celu przetworzenia przepływu informacji. W 1957 r. amerykański psycholog Rosenblatt

pomyślnie przeprowadził przełomowy eksperyment w laboratorium lotniczym na Uniwersytecie Cornell przy użyciu specjalnie skonstruowanego sprzętu: Perceptronu (*the Perceptron*). Został zaprojektowany do klasyfikowania obrazów, zbudowany w oparciu o wcześniejsze prace teoretyczne i zaoferował działający prototyp "uczącej się" maszyny. Specyfika Perceptronu polegała na zdolności do wykonywania samokorygującej pętli sprzężenia zwrotnego, co oznacza, że maszyna potrafiła uczyć się poprzez wykonywanie działań. Proces ten odróżniał go od poprzednich teorii algorytmicznych, otwierając jednocześnie nowe możliwości badawcze na nadchodzące dziesięciolecia (Chaillou, 2022).



Rys. 2.3. Frank Rosenblatt z Perceptronem. Źródło: strona internetowa Cornell University.

Kolejny przełomowy moment w historii sztucznej inteligencji miał miejsce jeszcze w tej samej dekadzie. W 1956 r. badacze⁴ zebrani w ramach Dartmouth Summer Research Project sformułowali wstępną definicję sztucznej inteligencji (SI) i wyznaczyli, jak powinien wyglądać dalszy rozwój w tej dziedzinie. Ich zespół oprócz przedstawienia terminu, także rozwinął jego znaczenie, czyli wykorzystanie ludzkiego mózgu jako modelu logiki maszynowej (Chaillou, 2022).

W ślad za tymi wczesnymi eksperymentami, zaczęły rozprzestrzeniać się pomysły wykorzystania tej technologii w różnych dziedzinach. Przetwarzanie języka naturalnego (NLP, *natural language processing*) jest prawdopodobnie jednym z najciekawszych osiągnięć tamtego czasu. Dzięki projektowi ELIZA⁵ komputer był w stanie symulować wymianę zdań z człowiekiem

⁴ Do tego zespołu należeli m.in. Marvin Minsky, John McCarthy, Ray Solomonoff i Oliver Selfridge.

⁵ Projekt rozwinął naukowiec Joseph Weizenbaum w 1966 roku.

za pomocą programu opartego na czacie (Weizenbaum, 1966). ELIZA jest symbolem optymizmu tego okresu, eksperymenty stopniowo wykraczały poza sferę instytucji badawczych i były stosowane do rozwiązywania konkretnych problemów. Psycholog poznawczy Hebert Simon dobrze uchwycił nastrój tamtego okresu: *Najprostszym sposobem, w jaki mogę to podsumować, jest stwierdzenie, że na świecie są teraz maszyny, które myślą, które się uczą i które tworzą* (Simon, 1958). Przewidywania Simona okazały się jednak zupełnie inne, ponieważ badania nad sztuczną inteligencją wkrótce osiągnęły długotrwałe spowolnienie, zatrzymując pozornie pozytywne prognozy z lat 60. ubiegłego wieku (Chaillou, 2022).

W latach 60. i 70., a później w latach 90., dziedzina ta przeszła dwa trudne okresy zwątpienia, dziś znane są jako "zimy sztucznej inteligencji" (*AI winters*). Zarówno w sektorze prywatnym jak i w akademii sposób myślenia zdecydowanie odbiegał od entuzjazmu z poprzedniej dekady. Miało to źródło w pracach naukowych krytykujących badania nad Perceptronem Rosenblatta, naukowcy stwierdzili, że maszyna nie może rozwiązać bardziej złożonych problemów. Zaczęły pojawiać się inne publikacje przedstawiające rozczarowanie, gdyż w żadnej dziedzinie poprzednie odkrycia nie wywarły większego wpływu. Natomiast w latach 80. nastąpiło ożywienie. Pojawiły się systemy eksperckie jako nowa generacja modeli SI, co zostało napędzone przez rosnącą dostępność coraz lepszej mocy obliczeniowej. Systemy eksperckie były znakiem rozpoznawczym tego okresu, umożliwiały one maszynom rozumowanie oparte na zestawie reguł i zbiorach danych. Jednym z pierwszych projektów wykorzystujących tę technologię był MYCIN⁶ (1972), wykorzystywany był w medycynie do identyfikacji bakterii wywołujących infekcje. Jednak pod koniec lat 80. systemy eksperckie osiągnęły spowolnienie, co przyczyniło się do drugiej zimy SI (Chaillou, 2022).

W latach 90. i 2000 badania nad sztuczną inteligencją stopniowo zmieniały kierunek, by skupić się na rozwijaniu metod opartych na uczeniu maszynowym (*machine learning*). Ponieważ systemy eksperckie odstawiły na bok zasadę "uczenia się", ich ograniczenia spowodowały eksplorację nowych kierunków: sieci neuronowych, sieci bayesowskich, algorytmów ewolucyjnych. Wszystkie te metody opierają się na koncepcji stopniowego nabywania wiedzy poprzez proces uczenia się metodą prób i błędów. Nastąpiło kilka wydarzeń, które wstrząsnęły światem nauki, co pozwoliło ponownie ożywić tę dziedzinę. W 1997 r. komputer o nazwie Deep Blue, opracowany przez IBM, pokonał ówczesnego mistrza świata w szachach, Garry'ego Kasparova. Było to pierwsze przebudzenie dla społeczności naukowej i poza nią (Newborn, 2002). SI zaczęła zdobywać praktyczne zastosowanie. Już w 2005 r. na DARPA Grand Challenge wyścig samochodów wygrał Stanley, autonomiczny samochód stworzony przez Uniwersytet Stanforda i laboratorium badawcze Volkswagena. Te dwa wydarzenia przyciągnęły ponownie uwagę do sztucznej inteligencji. Rozwój Internetu oraz dostępność jednostek GPU⁷ (układów graficznych) znacznie poprawiły możliwości zbierania i przetwarzania danych, co umożliwiło badania na szerszą skalę. W drugiej dekadzie XXI w. termin uczenia głębokiego (*deep learning*)

⁶ Projekt został rozwinięty na Uniwersytecie Stanforda.

⁷ Ten sprzęt, używany przez komputery do przetwarzania obrazów, zaczął być także wykorzystywany do trenowania modeli sztucznej inteligencji. Dzięki równoległemu przetwarzaniu operacji, tzn. wykonywaniu operacji równoległe, a nie sekwencyjnie, układy GPU mogły znacznie przyspieszyć czas obliczeń.

zaczął być szeroko stosowany w kontekście rozwoju SI. Termin ten pokazuje, że od tego momentu głównym celem stały się sztuczne sieci neuronowe w przeciwieństwie do systemów eksperckich. Pojęcie "głębi" odnosi się do rosnącej złożoności modeli SI poprzez dodanie większej liczby sztucznych neuronów do ich architektury⁸ (Chaillou, 2022).

W 2009 r. na Stanfordzie rozpoczęto projekt ImageNet, gromadząc największą bazę oznaczonych obrazów do tej pory (ponad 14 milionów). Uniwersytet organizował coroczny konkurs, gdzie uczestnicy byli zaproszeni do przetestowania dokładności predykcji swoich modeli na bazie ImageNet. W 2012 r. AlexNet, nowy model uczenia głębokiego, przekroczył wszystkie dotychczasowe benchmarki⁹ i postawił poprzeczkę znacznie wyżej niż jakiegokolwiek wcześniejsze badania na ten temat. Natomiast w zupełnie innej dziedzinie, w 2016 r. Lee Sedol, mistrz świata w grze Go, przegrał z AlphaGo, modelem SI opracowanym przez DeepMind (Silver et al., 2016). Gra wydaje się podobna do szachów, ale tak naprawdę jest o wiele bardziej skomplikowana. Ze względu na swoją kombinatoryczną złożoność, naukowcy do tamtego momentu nie wierzyli, że SI może rywalizować z ludzką intuicją w tej grze. To wydarzenie stanowiło przełom i pokazało, że uczenie głębokie jest skokiem kwantowym w dziedzinie sztucznej inteligencji (Chaillou, 2022).

Od czasów ImageNet i AlphaGo, era uczenia głębokiego rozkwitła w nowe przełomy i zastosowania. Po pierwsze, różnorodność i złożoność modeli AI znacznie wzrosła, pojawiły się sieci konwolucyjne, grafowe sieci neuronowe, generatywno-adwersacyjne sieci neuronowe (GAN), wariacyjne autoenkodery i wiele innych nowych architektur zostało opracowanych od tego czasu, zawsze dalej przesuwając wcześniej ustalone progi wydajności i rozszerzając zakres SI. Różnorodność danych wejściowych również znacznie się rozszerzyła, od prostych cyfr i obrazów w latach 50. i 60., SI może dziś analizować i generować filmy, dźwięki, teksty i geometrie 3D. Ta rzeczywistość, połączona z coraz lepszym dostępem mocy obliczeniowej, pozwoliła na szerokie rozpowszechnienie rozwiązań SI w różnych branżach od lat 2010 (Chaillou, 2022).

2.3. Myślenie komputacyjne

2.3.1. Główne założenia i geneza

Myślenie komputacyjne (*computational thinking*, CT) stało się w ostatnich latach popularnym hasłem, posiadającym wiele różnych definicji. Denning i Tedre (2019) skondensowali istotę znaczeń pojawiających się przy okazji tego pojęcia. Myślenie komputacyjne to umiejętności umysłowe i praktyki polegające na projektowaniu procesów obliczeniowych, które sprawiają, że komputery wykonują zadania za nas i wyjaśnianiu oraz interpretowaniu świata jako złożonego procesu informacyjnego. Aspekt projektowania odzwierciedla tradycję inżynierską, w której ludzie budują metody i maszyny, aby rozwiązywać konkretne problemy. Kwestia wyjaśniania odzwierciedla tradycję naukową, w której ludzie starają się zrozumieć, jak działają obliczenia i jak objawiają się w rzeczywistości.

⁸ Architektura oprogramowania to podstawowa organizacja systemu wraz z jego komponentami, wzajemnymi powiązaniami, środowiskiem pracy i regułami ustanawiającymi sposób jej budowy i rozwoju (Denning, 1999).

⁹ Benchmark to program służący do określania wydajności komputera (Słownik Języka Polskiego PWN).

Może się wydawać, że CT jest produktem ery komputerów elektronicznych, która rozpoczęła się w latach 40. XX wieku. Nie do końca tak jest, na długo przed erą nowoczesnych komputerów istniał zawód matematycznie wyszkolonych ekspertów, którzy wykonywali złożone obliczenia zespołowo. Termin "komputer", oznaczający "ten, który oblicza", pochodzi z wczesnych lat 1600. Prymitywne formy CT jako metody obliczeń były rejestrowane od około 1800 do 1600 p.n.e. wśród Babilończyków, którzy zapisywali ogólne procedury rozwiązywania problemów matematycznych. Podobnie, inżynierowie egipscy, którzy budowali piramidy od około 2700 p.n.e., wiedzieli dużo na temat geometrii i byli w stanie obliczać wymiary i kąty kamieni dla każdej części piramidy oraz dźwignię lin, bloczków i rolek, aby przemieszczać kamienie na swoje miejsce. Obliczenia są starożytną ludzką praktyką (Denning i Tedre, 2019).

Na przestrzeni wieków matematycy starali się sformalizować procedury dla coraz bardziej zaawansowanych obliczeń, odchodząc od obliczania prostych transakcji handlowych i geometrii struktur, w stronę trygonometrii, przewidywań astronomicznych, rozwiązywania równań algebraicznych, a w końcu obliczeń rachunku różniczkowego Newtona i Leibniza. Formalizując procedury obliczeniowe, matematycy udostępniali swoją wiedzę osobom niebędącym ekspertami, które po prostu musiały przestrzegać instrukcji dotyczących wykonywania prostych operacji arytmetycznych w odpowiedniej kolejności. Specjalną klasą tych instrukcji jest dziś to, co nazywa się algorytmem. Termin "algorytm" pochodzi od perskiego matematyka Muhammada ibn Mūsy al-Chuwarizmiego, który około 800 roku n.e. dyskutował o tym, jak formułować procedury matematyczne i podał przykłady, takie jak znalezienie największego wspólnego dzielnika dla zestawu liczb. Ludzie mają skłonność do automatyzowania rutynowych procedur. Tak było z procedurami obliczeniowymi: wynalazcy szukali maszyn, które mogłyby zautomatyzować obliczenia w celu uzyskania większej prędkości i mniejszej liczby błędów. Projektanci wierzyli, że zautomatyzowane maszyny przewyższą źródła nieprawidłowości w obliczeniach. Dziś wiadomo, że podczas gdy maszyny wyeliminowały pewne rodzaje błędów, pojawił się horyzont nowych. Maszyny obliczeniowe stały się tak złożone, że nie wiadomo, jak bardzo można im ufać (Denning i Tedre, 2019).

W latach 80. komputeryzacja bardzo się rozpowszechniła, naukowcy ze wszystkich dziedzin wprowadzili komputacyjność (obliczeniowość, *computation*) i myślenie komputacyjne do głównego nurtu nauki. Początkowo używali obliczeń do symulowania istniejących modeli teoretycznych lub numerycznego zestawiania i analizowania danych z eksperymentów. Wkrótce jednak odkryli, że myślenie w kategoriach komputacyjności otwiera drzwi do zupełnie nowego sposobu organizowania badań naukowych – CT doprowadziło do Nagród Nobla za odkrycia, które wcześniej umykały naukowcom. Wielu deklaruowało, że obliczenia stały się trzecim filarem nauki, obok teorii i eksperymentu. CT zostało rozszerzone na projektowanie obliczeń w całej nauce, szczególnie w odpowiedzi na pytania dotyczące "wielkich wyzwań" stawianych przez liderów w różnych dziedzinach. Niemal każda dziedzina nauki ostatecznie zadeklarowała, że posiada swój obliczeniowy (*computational*) odłam, taki jak obliczeniowa fizyka, bioinformatyka, czy cyfrowe (*digital*) nauki humanistyczne (Denning i Tedre, 2019).

2.3.2. CT w architekturze

Natychmiast nasuwa się pytanie jaki związek ma z architekturą wspomniany nurt. Wraz z rosnącym znaczeniem technologii w procesach projektowych oraz potrzebą rozwiązywania coraz bardziej złożonych problemów, architekci i badacze architektury coraz częściej sięgają po metody komputacyjne. Myślenie komputacyjne to proces analityczny, który umożliwia rozwiązywanie problemów w sposób, który może być zrozumiały przez systemy komputerowe. W architekturze, która jest interdyscyplinarną dziedziną obejmującą aspekty inżynierii, sztuki i nauki może odgrywać kluczową rolę w integracji różnych zmiennych oraz optymalizacji procesów projektowych i budowlanych. CT umożliwia efektywne podejście do tych wyzwań dzięki rozbijaniu problemów na mniejsze komponenty i umożliwieniu algorytmicznej analizy poszczególnych zagadnień. Narzędzia takie jak Grasshopper czy Rhino, bazujące na parametrycznym podejściu, umożliwiają architektom definiowanie zestawów reguł, które generują formy przestrzenne na podstawie określonych parametrów. Tego typu narzędzia otwierają nowe możliwości twórcze, które wcześniej były niemożliwe do osiągnięcia w tradycyjnych metodach projektowania.

3. ARCHITEKTURA CYFROWA

3.1. Definicja zjawiska

Architektura ze względu na swój multidyscyplinarny, wielkoskalowy i trwały charakter reaguje na zmiany z opóźnieniem. Większość budynków nadal powstaje w sposób "tradycyjny", czyli według sprawdzonych wzorców, wykorzystanie zaawansowanych technologii cyfrowych traktuje się jako jedną z branż lub rozszerzeń. Terminologia związana z rozwojem technologii i jej aplikacjami w architekturze nieustannie się kształtuje, czasami to samo zjawisko opisuje się różnymi nazwami. Jednak najczęściej stosuje się terminy architektury cyfrowej (Jones, 2014), architektury informacyjnej bądź architektury technologii informacyjnej. Słyk (2012) używa pojęcia "architektura informacyjna", co ma na celu rozszerzyć kontekst rozważań, czyli oprócz uwarunkowań ściśle technicznych, dostrzega przyczyny o charakterze humanistycznym oraz społeczne skutki podejmowanych działań.

Rzeczony technologii wpływa w największym stopniu na metodologię projektowania. Słyk (2012) określa proces projektowania budynku jako "dążenie do osiągnięcia efektu racjonalnego, pożądanego, sprawnego, dopuszczalnego i estetycznego, a dokonuje się to w projekcji przybliżeń i sprawdzeń". Dzięki wykorzystaniu komputerów zyskujemy dostęp do metod wspomagających podejmowanie decyzji¹⁰, jak i umożliwiających otrzymywanie w czasie rzeczywistym informacji, które są poza zasięgiem tradycyjnych technik warsztatowych. Metodą architektury informacyjnej nie jest projektowanie rozwiązań, lecz programowanie procesów. W wielu obszarach procesu projektowego użycie komputera zapewniło wydajność, która przyczyniła się do satysfakcjonujących efektów. Stało się to czynnikiem, który przyczynił się do rozwoju badań, a co

¹⁰ Mowa tu o procedurach optymalizacyjnych, statystycznych, pseudolosowych, generatywnych, które na podstawie wyznaczonych reguł (algorytmu) samodzielnie poszukują cząstkowych rozwiązań, które odpowiadają na dany problem (Słyk, 2012).

za tym idzie, powstały techniki możliwe do aplikacji w skali budowlanej. Natomiast inspiracje pochodziły od koncepcji sformułowanych wcześniej, także z dziedzin odległych od informatyki (Słyk, 2012).

Architektura reaguje na informatyzację bardzo silnie ze względu na swój złożony, multidyscyplinarny charakter i konieczność kompleksowego wnioskowania. Procesy komputerowe wspierają analizę projektową, modelowanie, koordynację, symulację zjawisk, np. statycznych, wizualizację, cyfrową fabrykację elementów i ich montaż oraz czynności związane z eksploatacją budynków. Zmiana paradygmatu tworzenia stała się jednym z ważniejszych tematów dyskusji wśród teoretyków i praktyków architektury. Terminy architektura informacyjna lub architektura technologii informacyjnej pozwalają nazwać proces twórczy, który dokonuje się w cyfrowym środowisku warsztatowym, z uwzględnieniem potrzeb społeczeństwa wyposażonego w komputery osobiste i korzystającego z Internetu. Teoretycy nurtu wiążą jego powstanie z przełomem cywilizacyjnym i są przekonani o nieodwracalnych skutkach przestrzennych, które wywoła (Słyk, 2012).

3.2. Źródła stosowania algorytmów

Algorytmy w architekturze, choć obecnie kojarzone głównie z zaawansowanymi narzędziami cyfrowymi, mają swoje korzenie we wcześniejszych próbach usprawnienia i systematyzacji procesu projektowego, a służyły temu, m.in. metody matematyczne. Od wieków budowniczowie szukali rozwiązań, które pomogą im tworzyć harmonijne obiekty. Choć architektura nie używa pojęcia harmonii w sposób bardzo ścisły, to z antycznych tradycji czerpie poczucie ogólnej proporcjonalności, gdzie różne elementy są spójne w ramach całości. W muzyce harmonia odnosi się do wewnętrznej spójności dzieła lub stylu. Jest ona miarą konsekwencji, logiki oraz stanowi narzędzie, które kontroluje następstwo elementów. Według Słyka (2012) architektura również takiej harmonii poszukuje.

3.2.1. Geometria euklidesowa

Poszukiwania te można rozpocząć od rozpoznania roli geometrii w projektowaniu. Geometria jest teorią przestrzeni konstruowaną za pomocą ścisłego aparatu rozumowania do opisu rzeczywistości, a dokładnie do wyobraźalnej przestrzeni. Odnosi się przede wszystkim do środowiska ukształtowanego przez czas i przestrzeń. Zajmuje się w szczególności kształtami, figurami oraz ich ruchem i zniekształcaniem. Wszystko to jest możliwe dzięki korelacji z cechami czasu i przestrzeni, głównie przez pomiary wielkości (Słyk, 2012).

Mimo że podstawy tradycyjnej geometrii narodziły się w Szkole Pitagorejskiej, to jej pełny obraz przedstawił Euklides. Sformułował on pięć postulatów¹¹, których wspólnym mianownikiem

¹¹ (1) Od dowolnego punktu do dowolnego innego punktu można poprowadzić prostą. (2) Ograniczoną prostą można przedłużyć nieskończenie. (3) Od dowolnego punktu można zakresić okrąg dowolnym promieniem. (4) Wszystkie kąty proste są między sobą równe. (5) Jeżeli prosta przecinająca dwie proste tworzy z nimi kąty jednostronnie wewnętrzne o sumie mniejszej niż dwa kąty proste, to te dwie proste

jest zdanie, że geometria euklidesowa to ta, w której suma kątów trójkąta wynosi 180. Dostarczyła ona technik opisu rzeczywistości za pomocą abstrakcyjnych pojęć, a jej system skonstruowany był tak, że operacje można było wykonywać za pomocą prostych narzędzi (linijki, cyrkla). Wiele zawdzięcza "Elementom"¹² rysunek techniczny, zwłaszcza projektowanie obiektów znacznej wielkości, czyli też architektura. Odkrycie metod skalowania pomagało uporać się z trudnościami związanymi z koordynacją procesów budowlanych. Dzięki spójnym aksjomatom nabrano pewności, że rysunek wykonany na kartce zachowa swe własności po powiększeniu (Słyk, 2012).

Jeśli przyrzeć się architekturze antycznej, tak jak opisuje ją Witruwiusz, można dostrzec wpływ geometrii euklidesowej. W drugim rozdziale pierwszej księgi architekt posługuje się czterema kryteriami. *Ordnatio*, czyli uporządkowanie, jest cechą obiektu, która wynika ze stosunku liczbowego między wymiarami elementów (Witruwiusz, 1956). *Dispositio* określa rozmieszczenie elementów względem siebie. Witruwiusz pisze, że rzuty, elewacje i centralna perspektywa powinny być wykonane w skali za pomocą linijki i cyrkla. Nie dostrzega on różnicy między architekturą a jej rysunkową reprezentacją, zamiennie używa określeń dotyczących budynków i rzutów. Prawdopodobnie postępuje tak dzięki znajomości teorii Euklidesa, uważa, że skoro sprawdzona aksjomatyka pozwala przewidzieć podobieństwo cech skalowanych obiektów, to posługiwanie się rysunkami jest słusznie wykorzystywaną metodą projektowania architektury. Natomiast należy pamiętać, że Witruwiusz traktuje pojęcia symetrii¹³ i proporcji¹⁴ w sposób praktyczny, a nie matematyczny (Słyk, 2012).

Bez geometrycznych podstaw, które zostały zaczerpnięte od Euklidesa prawdopodobnie nie byłoby dzieła Witruwiusza, które ustanowiło najbardziej trwale i znaczące zasady w historii architektury. Choć geometria sama w sobie ma charakter czysto abstrakcyjny, to pozwala ilustrować zjawiska przestrzenne na podstawie rysunków w skali, mierzyć i wyznaczać skomplikowane kształty oraz przekształcać, zachowując proporcje. Dostarcza szereg narzędzi, który pozwala przenieść warsztat architekta z placu budowy na deskę rysunkową. Dzieło Witruwiusza zachowało silną pozycję aż do XIX w., czyli niemal tak długo jak w dziedzinie geometrii dominowały "Elementy" (Słyk, 2012).

3.2.2. Proporcje i fraktale

Mierzenie tkwi w świadomości i intuicji człowieka, dzięki niemu potrafimy porządkować przestrzeń według kryteriów, które obierzemy. Husserl uważa odmierzanie przestrzeni geometrycznej jako nadrzędny (w kontekście filozoficznym) mechanizm (Derrida, 1989). Dzięki temu jesteśmy zdolni do podejmowania decyzji, intuicyjnie odmierzamy rzeczywistość w

przedłużone nieskończenie przecinają się po tej stronie, po której znajdują się kąty o sumie mniejszej od dwóch kątów prostych.

¹² „Elementy” to główne dzieło Euklidesa. Było to aksjomatyczne ujęcie geometrii, które stało się kanonem aż do XIX wieku. Baszmałowa I.G., *Grecja starożytna. Kraje hellenistyczne i imperium rzymskie*, [w:] A.P. Juskiewicz (red.), *Historia matematyki*, t. I, Warszawa: PWN, 1975, s. 119.

¹³ Symetrię Witruwiusz traktował jako konstrukcję, która jest uporządkowana przez analogię (Słyk, 2012).

¹⁴ Przez proporcjonalność Witruwiusz rozumiał zastosowania modułu do odmierzania wszystkich istotnych wymiarów budowli (Witruwiusz, 1956).

przestrzeni architektonicznej. Mierzenie jest procesem względnym, wielkości docierają do świadomości jako relacje do innych równocześnie postrzeganych lub zapamiętanych zjawisk. Mierzymy dzięki wykorzystaniu proporcji (Słyk, 2012).

Grecy w swoich geometrycznych rozważaniach używali miary przekątnej kwadratu ($\sqrt{2}$), złotego podziału oraz stosunku obwodu koła do średnicy (π). Proporcje współmierne¹⁵ mają ogromną zaletę z punktu widzenia procesu projektowego i realizacji obiektu. Pozwalają określić tzw. moduł budowlany, który tworzy wspólną podstawę do określenia wielkości obiektu budowlanego. Moduł może odnosić się do wymiarów stosowanego materiału lub tworzyć odcinek odniesienia o abstrakcyjnym charakterze. Von Meiss (2008) przytacza przykład Palladia, który opierał szereg zasad na odcinkach współmiernych. Dążył do zachowania proporcji muzycznych¹⁶ między głównymi wymiarami rzutu i przekroju.

Złoty podział oraz jego praktyczne zastosowanie w teorii projektowania pojawił się dosyć późno. Brakuje jednoznacznych dowodów na świadome wykorzystanie tych proporcji w greckiej architekturze starożytnej, aczkolwiek kanony rzeźbiarskie używały ich do określania proporcji ludzkiej figury. W średniowieczu, renesansie i baroku, zainteresowanie liczbami Fibonacciego także nie było bardzo silne. Scholfield (1958) traktuje początek XIX w. jako czas rzeczywistej fascynacji złotym podziałem. Wskazuje także Zeisinga¹⁷ jako pierwszego autora, który zastosował ten termin do opisu zjawisk występujących w naturze i sztuce. Stosując rekurencyjną definicję otrzymamy ciąg liczb, który stanowi analogię do geometrii złotego podziału¹⁸. Pomimo bardzo prostej metody tworzenia kolejnych liczb, ciąg Fibonacciego stanowi jedno z najbardziej inspirujących zjawisk teorii liczb. Ilorazy sąsiednich wyrazów ciągu tworzą ciąg zbieżny¹⁹, którego granicą jest tzw. złota liczba Fibonacciego²⁰. Le Corbusier właśnie z tych matematycznych zależności wywnioskował ciąg proporcji, które tworzą Modulora.

Rozważania, które dotyczą złotych proporcji bardzo często odnoszą się do ich interpretacji w zjawiskach natury. Odkładanie liczb ciągu Fibonacciego jako kwadratów, których boki się stykają pozwala skonstruować spiralę (Rys. 3.1.), której kształt odnajdziemy między innymi w budowie szyszek i kwiatów (Brousseau, 1969). Niektórzy badacze odnoszą ją także do przestrzennej formy huraganów i galaktyk. Podobnie jak wyrazy ciągu rekurencyjnego, tak obiekty geometryczne można kształtować przez stosowanie relacji względnych. Leibniz rozważał w XIX w. zagęszczające się podobieństwo figur, jednak dopiero przełom XIX i XX w. przyniósł lepsze rezultaty. W 1904 r. Koch przedstawił geometryczną definicję krzywej, która przypomina płatek śniegu (tzw. krzywa Kocha), pojawiły się także kolejne przykłady figur samopodobnych, np. trójkąt Sierpińskiego (1915) i krzywa Levy'ego (1938) (Słyk, 2012). Samopodobieństwo figur polega na tym, że dowolnie małe jej fragmenty oglądane w odpowiednim powiększeniu, wyglądają tak samo jak obiekt pierwotny (Encyklopedia PWN).

¹⁵ Dwa odcinki określamy jako współmierne, jeśli istnieje taki trzeci odcinek, który w obu danych odcinkach mieści się całkowitą liczbę razy (Encyklopedia PWN).

¹⁶ Czyli proporcje wynoszące 1:2, 2:3 lub 3:4.

¹⁷ Adolf Zeising był niemieckim psychologiem i matematykiem, żył w latach 1810-1876).

¹⁸ Początkowe liczby Fibonacciego to: 0, 1, 1, 2, 3, 5, 8, 13, 21.

¹⁹ Początkowe wyrazy tego ciągu zbieżnego to: 1, 2, 3/2, 5/3, 8/5, 13/8, itd.

²⁰ Wynosi ona w przybliżeniu 1,618; oznacza się ją grecką literą ϕ .



Rys. 3.1. Spirala Fibonacciego i obraz galaktyki.

Źródło: <https://bigthink.com/starts-with-a-bang/what-explains-fibonacci-sequence/>

W latach 70. XX w. dzięki komputerom uzyskano nowe możliwości eksperymentowania, tworzenie wielostopniowych iteracji graficznych nie stanowiło już problemu (Słyk, 2012). Mandelbrot prowadził w tym czasie badania, opisywał cechy i efekty samopodobieństwa, a w 1975 r. sformułował termin "fraktal" (od łacińskiego *fractus*, czyli podzielony, nieregularny) (Mandelbrot, 1982). Właściwości fraktali urzekły wielu architektów, szuka się w nich nowego środowiska twórczego, czyli "geometrii fraktalnej". Według Mandelbrota mają być one remedium na schematyczność geometrii euklidesowej.

Jednym z często powoływanych przykładów związanych z inspiracją samopodobieństwem jest projekt Domu 11a Petera Eisenmana (Rys. 3.2.). Wyjściowy kształt prostopadłościenny jest pozbawiony części narożnej, przyjmując formę litery "L". Kolejne operacje wykonują to samo przekształcenie na pozostawionym pustym fragmencie. Podobna procedura pozwoliła architektowi uzyskać schemat placu miejskiego w Wenecji - Cannaregio, który został przedstawiony w 1978 r. Fascynacja Eisenmana fraktalami pozostaje jednak "niematematyczna". Jak można dostrzec, fraktale mogą dostarczyć architekturze nowych narzędzi, a szczególnie nowych inspiracji, ale nie powstaje żadna nowa geometria, biorąc pod uwagę ścisłą definicję. Architektoniczne obiekty czy elementy, nawet jeśli tworzone przy użyciu uproszczonego samopodobieństwa, są osadzone jako skończone figury w euklidesowym środowisku (Słyk, 2012; El-Darwish, 2019).



Rys. 3.2. Makieta domu 11a Petera Eisenmana.
 Źródło: <https://eisenmanarchitects.com/Cannaregio-Town-Square-1978>

Źródłem proporcjonalności zawsze jest matematyczna reguła. Proporcje wspólnie, harmoniczne, rekurencyjne najpierw dostrzegano w przyrodzie, później je interpretowano, aż wreszcie zaczęły dostarczać inspiracji architektom. Architektura cyfrowa wykorzystuje proporcje o złożonym charakterze, a dzięki wykorzystaniu komputerów i oprogramowania generującego wzory przestrzenne jest w stanie odnaleźć abstrakcyjne analogie zjawisk natury, a następnie je wykorzystać w procesie twórczym (Słyk, 2012).

3.2.3. Symetria

Harmonię w architekturze można osiągnąć różnymi środkami. Poza proporcjonalnością, inne techniki również okazują się skuteczne. Na przykład, dobór odpowiednich kątów może ułatwić projektantom kształtowanie połączeń wpływających na odbiór przestrzeni. Alberti sugerował stosowanie kątów ortogonalnych, twierdząc, że są najwygodniejsze w użyciu (Alberti, 1960). Co najmniej od renesansu świadomie wykorzystywano oddziaływanie wnętrza o zmiennej szerokości. Barokowe założenia urbanistyczne dowodzą, że konstrukcje związane z widocznością mogą osiągać skalę wielokilometrową. Oprócz postrzegania perspektywicznego, równie istotne dla architektów było wspomaganie układu konstrukcyjnego. Struktury zapewniające prawidłowy spływ sił powiększano i komplikowano, a kolejne realizacje wymagały precyzyjnego odwzorowania za pomocą skalowania, rzutowania i przekształceń geometrycznych (Słyk, 2012).

Jednym z architektów o pełnym wykształceniu matematycznym był Guarino Guarini. Pozostając pod wpływem XVII-wiecznej architektury włoskiej i francuskiej, w pełni korzystał ze zdobyczy geometrii. Jego prace zbiegły się z rewolucją intelektualną, kiedy narodził się rachunek różniczkowy. W swoich instrukcjach pozostawił wiele wskazówek dotyczących wykreślenia

skomplikowanych form, m.in. krzywych stożkowych i ich przekrojów. Podkreślał rolę geometrii jako głównego narzędzia architekta i podobnie jak Euklides wierzył w jedność świata rzeczywistego i jego matematycznej reprezentacji. Za pomocą środków geometrycznych starał się dotrzeć do piękna wynikającego ze zrozumienia porządku natury (Słyk, 2012).

Psychologia postrzegania wzrokowego wykazała, że spośród różnych przekształceń geometrycznych (takich jak przesunięcie czy obrót) symetria daje najbardziej wyrazisty efekt. Oko ludzkie szczególnie preferuje efekt symetrii osiowej (Słyk, 2012; Von Meiss, 2008). Renesansowi twórcy polegali na regularnych kształtach, tworząc plany osiowo-symetryczne, które nadawały budowlom cechy harmonii zarezerwowane w starożytności głównie dla świątyń. Stosowanie symetrii wynikało również z optymalizacji strukturalnej — dla prawidłowego rozpoznania układu nośnego wystarczała połowa rysunku. Podobnie było z układami centralnymi, gdzie odpowiednia struktura fragmentu gwarantowała prawidłowe działanie całości (Słyk, 2012).

Dopiero w XX wieku działacze Bauhausu zaczęli osłabiać rolę symetrii jako obowiązującej normy estetycznej. Matematyczny opis form roślinnych dostarcza dowodów na brak ścisłej symetrii osiowej w świecie natury, choć nadal przekonuje o regularności i uporządkowaniu jej struktur. Paul Klee w 1925 r. opisał pojęcie "asymetrycznej równowagi", gdzie istotnym dodatkowym czynnikiem jest uwzględnienie "równowagi kontekstualnej", czyli dopasowania budynku do jego otoczenia. Według Słyka (2012), szczególnie dobrze widać to w projektach F. L. Wrighta.

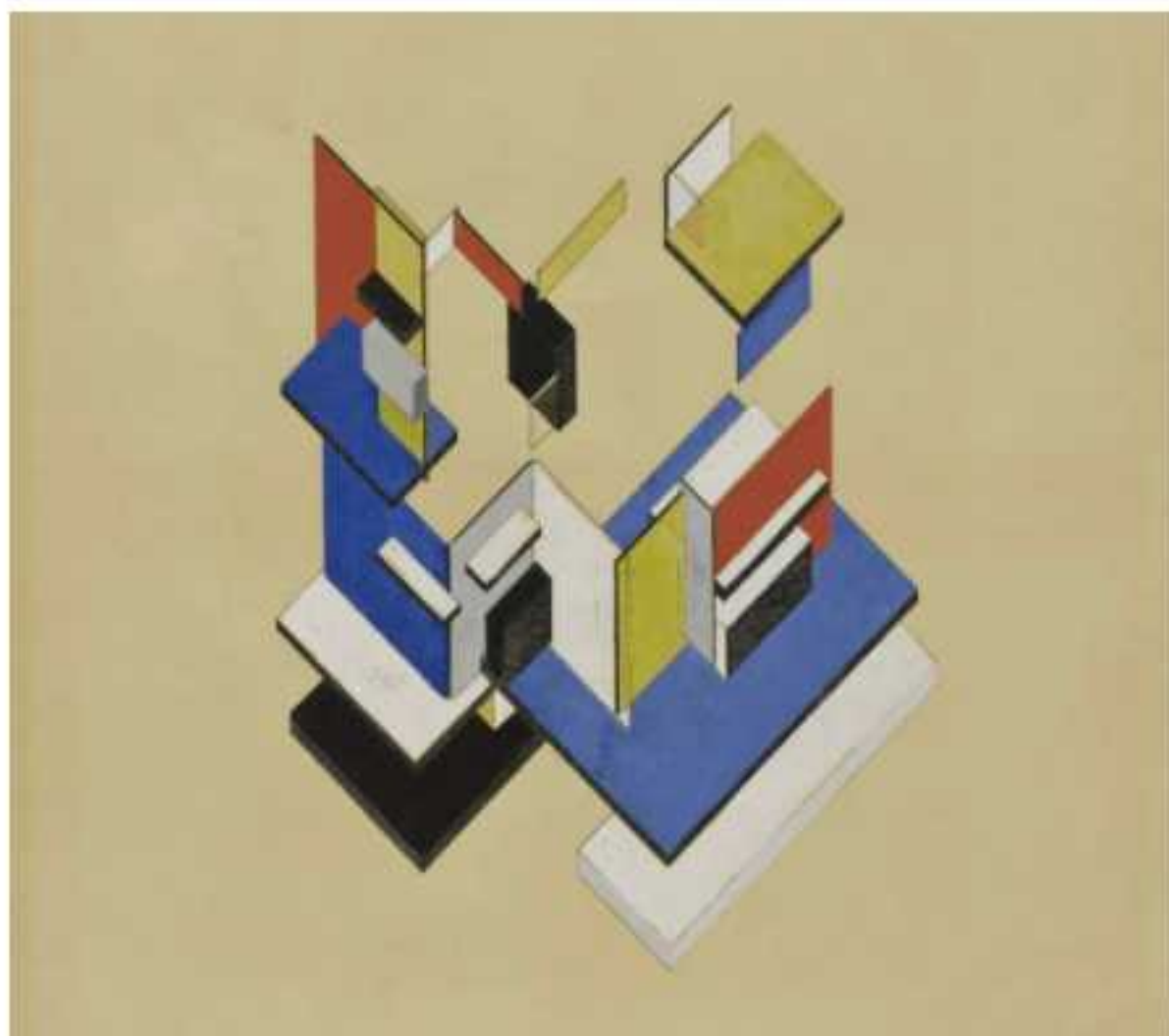
Technologia cyfrowa zapewnia architektom dużą swobodę, pozwalając "zapomnieć" o jednostkach i skupić się na przekształceniach stanowiących istotę modelowanych form. Symetria jest miarą równowagi, a poszerzenie metod kontroli geometrii umożliwia dostęp do dotąd nieznanych poziomów regularności, dotyczących zarówno kształtów, jak i procesów ich tworzenia (Słyk, 2012).

3.2.4. Geometria nieeuklidesowa

Mówiąc o geometrii nieeuklidesowej²¹ należy zadać sobie pytanie czy architektura tak naprawdę z niej korzysta. Nie ulega wątpliwości, że jest ona źródłem inspiracji dla form, które kształtują architekci, ale pozostaje zwątpienie co do zastosowania głębszych zasad geometrycznych. Geometria Euklidesa, na której przez wieki opierała się architektura, zawierała pewne postulaty, z których piąty (dotyczących równoległości) był dla matematyków szczególnie problematyczny (nie dało się go sprawdzić wykreślnie). Wielu próbowało go udowodnić lub odrzucić, co ostatecznie doprowadziło do rozwoju geometrii nieeuklidesowej, którą zapoczątkował Girolamo Saccheri w XVIII w. Matematyk, próbując udowodnić ten postulat, odkrył nowe koncepcje geometryczne, które stały się podstawą geometrii nieeuklidesowej, choć sam nie akceptował swoich idei, opisując je jako niezgodne z "naturą geometrii" (Słyk, 2012).

²¹ Geometria nieeuklidesowa to dział geometrii różniący się od euklidesowej brakiem aksjomatu, że przez dany punkt można poprowadzić dokładnie jedną prostą równoległą do danej prostej (Encyklopedia PWN).

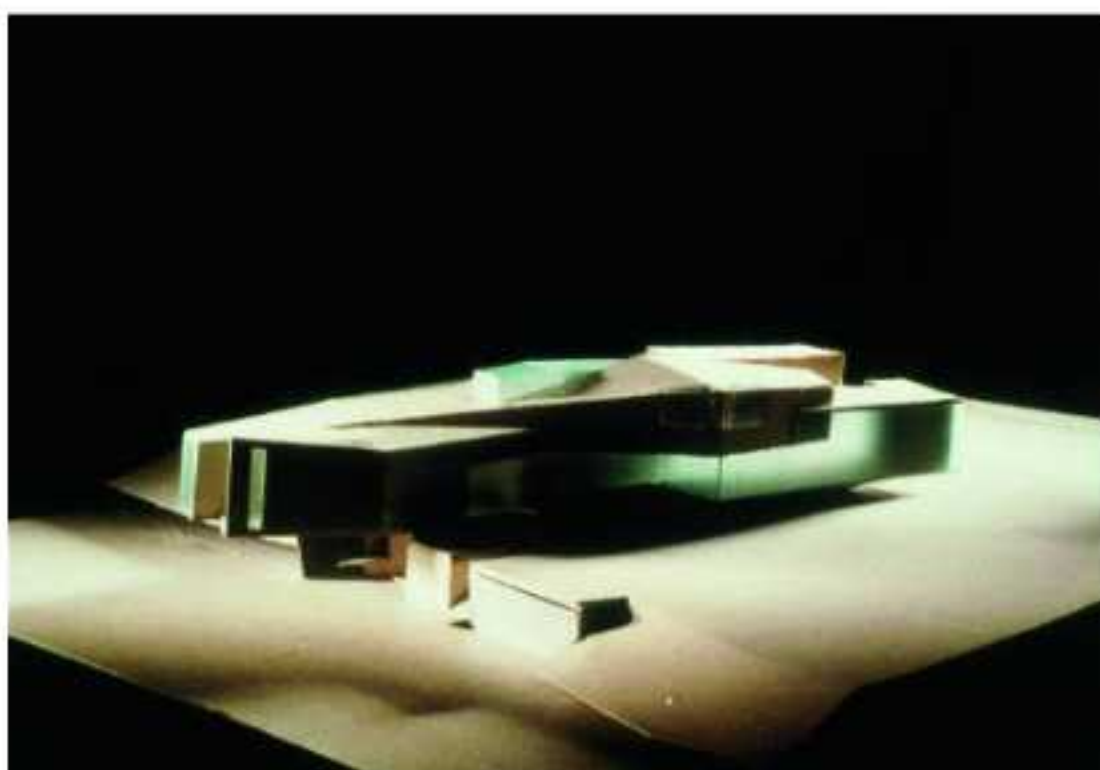
Mimo że wyżej wspomniane idee początkowo były związane tylko z matematyką, to z czasem znalazły swoje zastosowanie w analizie zjawisk przestrzennych w sztuce. Koncepcja hipersześcianu²² stała się inspiracją wielu dzieł sztuki, w tym przede wszystkim w sztukach wizualnych. Przykładem jest obraz "Corpus hypercubus", czyli "Ukrzyżowanie" Salvadora Dali z 1954 r., stanowi malarską interpretację sześcianu przestrzeni czterowymiarowej. W architekturze drogą wcielania koncepcji hiperprzestrzennych był przede wszystkim szkic i abstrakcja. Do tego nurtu można zaliczyć rysunki Theo van Doesburga, które były opublikowane w czasopiśmie De Stijl w 1927 r. Przedstawiają one widoki ekspandowanego ortogonalnie sześcianu, bryły o 16 wierzchołkach, 32 krawędziach i 24 ścianach (Evans, 2000). Van Doesburg także dołączył kolor jako jeden z wymiarów, co stało się punktem wyjścia dla projektu domu jednorodzinnego stworzonego we współpracy z Cornelisem Eesterenem (Rys. 3.3.). Architekt traktował przestrzeń czterowymiarową w sposób bardzo intuicyjny oraz wieloznaczny, dostrzegał w niej figury i kolory, które później odzwierciedlał na kartezjańskich aksonometriach. (Słyk, 2012).



Rys. 3.3. Aksonometria projektu *Contra-Construction* Theo van Doesburga i Cornelisa van Eesterena.
Źródło: MoMA, <https://www.moma.org/collection/works/232>

²² Hipersześcian to odpowiednik sześcianu w czwartym wymiarze (Słownik SJP).

Topologia, taką nazwę przyjął nowy dział geometrii, który jest teraz omawiany, zajmuje się poszukiwaniem uniwersalnych, pierwotnych własności figur. Takich, które pozostają czytelne niezależnie od środowiska przestrzennego (czyli liczby wymiarów) i od przeprowadzonych przekształceń. Rozważania te są prowadzone jednak na figurach, które znano dużo wcześniej, bada się ich przekształcenia i zachowywanie cech. Jednostronna powierzchnia zdefiniowana przez Möbiusa w 1958 r. (znana jako wstęga Möbiusa) znana była już starożytnym. Zaawansowane koncepcje matematyczne zaczęły wpływać na projektowanie architektoniczne, co dało początek formom i przestrzeniom, o których wcześniej nie myślano. Przykładem tutaj może być Möbius House projektu Bena van Berkela (Rys. 3.4.), który odwołuje się do wspomnianej wcześniej figury. Przestrzeń budynku oraz przewidywany ruch ludzi mają się w sposób symboliczny odbywać wzdłuż wstęgi (Słyk, 2012).



Rys. 3.4. Makieta domu inspirowanego wstęgą Möbiusa.
Źródło: UNStudio, <https://www.unstudio.com/en/page/12105/möbius-house>

Budowle nawiązują do wzorów geometrycznych przez naśladowanie kształtu, topologicznej specyfiki, a czasem nawet wprost poprzez nazwę czy deklarację architekta (tak jak w przypadku wyżej wspomnianego Möbius House). Inspiracje pochodzące ze współczesnej matematyki mogą sprawę komplikować ze względu na brak prostych odniesień modeli do realnego kontekstu. Inną realizacją odwołującą się do topologii jest Muzeum Mercedes w Stuttgarcie (rys. 3.5.) w Stuttgarcie. Według architektów geometryczny schemat budynku oparto na organizacji trójliska, czyli krzywej zamkniętej w przestrzeni trójwymiarowej, której bez rozcięcia nie można przekształcić w okrąg. Projektanci zaproponowali przestrzeń z otwartym na pełną wysokość atrium oraz salami ekspozycyjnymi zamkniętymi w "listkach koniczyny". Jednak w rzeczywistości żadnych zapętleń nie ma i konstrukcja po odpowiednich transformacjach rozwinęłaby się w okrąg. Schemat przestrzenny tego budynku odpowiada modelowi Muzeum Guggenheima F. L. Wrighta (1959). Aby zrealizować tak ambitny obiekt twórcy korzystali z konsultacji geometrycznej Arnolda Waiza, a elementy konstrukcyjne według projektu Wernera Sobka stanowią do dziś przykład

ekstremalnego wysiłku technologicznego. Mimo tego, wykorzystanie w planie schematu trójlistka było tak naprawdę tylko analogią w wymiarze graficznym. Prawdziwe "topologiczne" możliwości i dostęp do geometrii euklidesowej być może pojawi się, gdy zrezygnujemy z tradycyjnych technik budowania. Odpowiedzią mogą być przestrzenie wirtualne, gdyż nie podlegałyby uwarunkowaniom fizycznym (Słyk, 2012).



Rys. 3.4. Makieta robocza Muzeum Mercedesesa w Stuttgarcie.
Źródło: UNStudio, <https://www.unstudio.com/en/page/12482/mercedes-benz-museum>

Pomimo licznych nawiązań trudno ukryć fakt, że współczesna architektura korzysta z geometrii nieeuklidesowych w sposób bardzo powierzchowny. Odkrycie nowych rodzajów geometrii nie zastępuje dotychczasowych metod, ale poszerza bazę inspiracji. Być może Möbius House i Muzeum Mercedesesa nie powstałyby, gdyby nie swoboda wyobrażeń, do których współczesna matematyka się przyczynia. Architekci skorzystali z parametrycznych metod kształtowania, które są możliwe dzięki komputerom i odpowiedniemu oprogramowaniu, ale nadal oba te budynki są osadzone w tradycyjnym kartezjańskim kontekście. Projektując, działamy w środowisku podporządkowanym ziemskiej grawitacji, czyli takim które najlepiej opisuje geometria euklidesowa. Natomiast należy zwrócić uwagę, że środowisko twórczości nieustannie się rozszerza. Wirtualne światy pozbawione są grawitacji, a w tym kontekście zdobycze współczesnej matematyki mogą okazać się dla twórczości czymś więcej niż tylko estetyczną inspiracją (Słyk, 2012).

3.2.4. Reguły i przypadkowość

Pomimo przeobrażeń technik i mediów, istota twórczości nadal jest powiązana z indywidualnością. Przedmiot artystycznej działalności jest wynikiem materializacji myśli, a nie optymalizacji inżynierskiej i z punktu widzenia ściśle użytkowego jest on zbędny (Słyk, 2012). Adolf Loos twierdził, że tylko niewielka część architektury należy do sztuki, mianowicie grób i monument. Według niego cała reszta, a zwłaszcza budynki tworzone dla potrzeb użytkowych powinny być wyłączone z definicji sztuki.

Wydaje się mało prawdopodobne, aby nagle w kontekście społeczeństwa, które oparte jest na wiedzy²³, powstała odmienna jakość artystyczna. Człowiek stworzył komputery, zmieniła się wizja świata oraz sposoby eksploracji. Natomiast algorytmiczna twórczość nie pochodzi od maszyn liczących, tylko to człowiek dzięki nowym wynalazkom musiał dokonać zwrotu, wzmocnił tym istniejącą od zawsze metodę poznania (Terzidis, 2006; Słyk, 2012). Architektura przechodzi przez różne etapy ewolucji, adaptując się do nowych warunków i technologii.

Warto ustalić, czy pojęcie słowa algorytm w kontekście architektury jest zgodne z matematyczną definicją. Informatyka wiąże to pojęcie z uporządkowanymi działaniami logicznymi i algebraicznymi, które mają za zadanie rozwiązać problem w najbardziej uniwersalny i skuteczny sposób (Słyk, 2012). Donald Knuth (1997) określa algorytm jako ogólną koncepcję działania, która obejmuje zbiór reguł i sekwencję kroków, które pozwolą wykonać zadanie lub rozwiązać problem. Weryfikuje się metodę poprzez sprawdzenie czy spełnia pięć warunków. Po pierwsze *finiteness*, algorytm musi mieć skończoną liczbę kroków. *Definiteness*, każdy krok musi być jednoznacznie zdefiniowany. *Input*, działanie operuje na danych wejściowych, czyli rzeczywistych danych i informacjach. *Output*, czyli algorytm musi generować co najmniej jeden wynik na podstawie danych wejściowych. *Effectiveness*, metoda powinna dawać zawsze ten sam wynik z tych samych danych, niezależnie od warunków zewnętrznych. Terzidis (2006) określa algorytm jako "zracjonalizowaną wersję ludzkiego rozumowania". Naturalne procesy przebiegające w naturze również mają charakter sekwencyjny, istnieje możliwość badania następstwa kroków i ich uwarunkowania, by następnie dojść do przekonania o ich definitywności i efektywności. Podobnie może być w architekturze, gdy dopiero analiza badaczy dostarcza przesłanek, że efekt osiągnięty wcześniej intuicyjnie można uzyskać także w zaplanowanej sekwencji operacji (Słyk, 2012).

Jak wiadomo, w architekturze istnieją zestawy reguł, których zastosowanie ma na celu zapewnić zachowanie zgodności z ogólnym pojęciem ładu i harmonii. Upowszechnienie w renesansie greckich porządków zapewniało proporcjonalność, geometria miast idealnych podporządkowana była symetrii, a także Le Corbusier i jego pięć zasad modernizmu miało odpowiadać na potrzeby nowoczesnego społeczeństwa (Słyk, 2012).

Teorie Jacoba Bernoulliego i Blaise'a Pascala na temat kombinatoryki i rachunku prawdopodobieństwa miały wpływ na rozwój sztuki i architektury w kontekście systematyzacji i matematyzacji twórczości. Słyk (2012) przytacza przykład *Musikalishes Würfelspiel*, czyli technikę automatyzującą komponowanie sonat poprzez rzut kostką, gdzie odpowiednie układy

²³ Społeczeństwo informacyjne to takie, w którym towarem jest informacja i traktowana jest ona jako szczególne dobro niematerialne, tak samo ważne a nawet ważniejsze od dóbr materialnych.

nut były generowane na podstawie przypadkowości rzutów, złożoność kombinacji była olbrzymia (66¹⁸), co dawało unikalny utwór przy każdej próbie, a mimo tego efekt w każdym przypadku był rozczarowujący. Pojawia się pytanie, czym można wytłumaczyć przewagę intuicji nad algorytmem?

Ze względu na złożoność architektury, stworzenie takiej gry wydaje się trudniejsze, natomiast takie próby były podejmowane. Christopher Alexander przedstawił koncepcję języka wzorców (1968), mającą na celu organizację przestrzeni architektonicznej. Wprowadza pojęcie wzoru (*pattern*), który ma strukturę związaną z logiką: *if... then...*, gdzie jedna część (*if*) opisuje problem, a druga możliwe rozwiązania (*then*). Te wzory stosowane są w urbanistyce, architekturze i rozwiązywaniu kwestii technicznych. Opierają się na twórczości permutacyjnej z gotowego zestawu narzędzi. Problem pojawia się jeśli chcemy narzędzi nietypowych, dopasowanych do kontekstu i chcemy by konfiguracje były złożone i trudne do przewidzenia.

Generator liczb pseudolosowych to algorytm, który generuje sekwencję nieuporządkowaną. Z punktu widzenia twórców, największe wątpliwości wzbudza fakt, że efekty działania są wcześniej zdefiniowane. Kiedy celem jest dążenie do osiągnięcia spójności formy i kontekstu, zastosowanie "realnego" modelu chaosu wydaje się mieć lepsze uzasadnienie niż korzystanie z predefiniowanego algorytmu. Kas Oosterhuis uważa, że programowanie (w ogólnym sensie) zastępuje projektowanie. Architekt zamiast koncentrować się na utworze (budynku, wnętrzu, etc.), tworzy ramy procesu. Dokonuje wtedy odpowiednich wniosków i pozostawia elementy, które mogą być poddane niezależnemu kształtowaniu (np. optymalizacji pod różnymi względami). Mamy wtedy do czynienia ze skupieniem się na procesie tworzenia, a nie gotowym produkcie (Słyk, 2012).

Opanowanie technik generujących sztuczny nieład umożliwiło konstruowanie dzieł sztuki na bazie wysokiej entropii. Entropia, jako pojęcie wywodzące się z fizyki i teorii informacji, jest miarą nieuporządkowania w systemie. W informatyce jest ona miernikiem niepewności lub różnorodności danych, gdzie wyższa entropia oznacza większe rozproszenie i trudność w przewidzeniu kolejnych elementów w zbiorze danych. W twórczości artystycznej i architektonicznej to pojęcie zyskało nowe interpretacje, odnosząc się do poziomu chaosu, złożoności i nieprzewidywalności w procesie twórczym. Entropia staje się kluczowym elementem w dyskusji na temat tego, jak twórcy wykorzystują przypadkowość i chaos w swoich dziełach, zarówno jako środek do uzyskania określonych efektów, jak i jako wyzwanie, które muszą opanować, aby stworzyć spójne i harmonijne formy. Wprowadzenie chaosu i nieuporządkowania do procesu twórczego może prowadzić do powstania unikalnych, innowacyjnych dzieł, które wykraczają poza tradycyjne, przewidywalne schematy. Słyk (2012) wspomina o futurologach, którzy twierdzą, że maszyna jest gotowa do komponowania utworów, ale według autora to czy mają rację jest bardziej kwestią filozofii niż technologii. Należy najpierw określić cel, do którego zmierza twórczość i sprecyzować rolę twórcy w tym procesie (Słyk, 2012).

Istotną częścią pytania o szanse automatycznej twórczości jest dylemat dotyczący przyczyn istnienia. Algorytmy genetyczne, zwane też ewolucyjnymi, Richard Dawkins (1996) przedstawia jako narzędzie umożliwiające tworzenie złożonych struktur w oparciu o procesy

selekcji. W rzeczywistości dobór ewolucyjny jest znacznie bardziej złożony. Stuart Kauffman (1993) dostarcza argumentów świadczących o stanach biologicznych, które nie zależą od czynników zewnętrznych. Twierdził, że samoorganizacja jest jednym z kluczowych elementów w ewolucji złożonych systemów. Słyk (2012) posługuje się muzyczną analogią, podając przykład Davida Cope'a, który opracował system EMI (*Experiments in Musical Intelligence*), używając algorytmów do analizy muzyki Chopina. System analizował melodie i harmonię, tworząc nowe utwory na podstawie wzorów odkrytych w muzyce klasycznej, szukał wyznacznika niepowtarzalności. Zebrał dane obrazujące, że najciekawsze utwory zawierają składniki, które są poza statystycznymi prawidłowościami. Eksperymenty czerpiące wysoką entropię z generatorów losowości nie przynoszą satysfakcjonujących rezultatów.

To co Cope zrobił z muzyką, Jose Pinto Duarte zamierzał zrealizować w architekturze. Architekt, badając procesy generatywne w sztuce budowania, zastosował algorytmy genetyczne do projektowania budynków mieszkalnych. Duarte studiował styl Alvaro Siza i zintegrował metody generatywne, aby tworzyć nowe projekty. W zetknięciu ze złożoną materią budowlaną metoda musiała brać pod uwagę wiele czynników, należało zdefiniować kwestie strukturalne, takie jak trwałość, bezpieczeństwo i użyteczność. Tutaj algorytmy posłużyły do wprowadzania zmienności i nieprzewidywalności do procesu projektowego, co miało na celu stworzyć formy, które lepiej odpowiadałyby na złożone potrzeby użytkowników. Dodatkowo, dzięki wykorzystaniu technologii komputerowej Duarte pokazał projekt w sposób wręcz namacalny. Zastosował środowiska w pełni immersyjne (*immersed*) i częściowo immersyjne (*partially immersed*) z użyciem wyświetlaczy HMD²⁴, rękawic VR²⁵ oraz projekcji CAVE²⁶ (Duarte, 2001; Słyk 2012).

Zastosowanie koncepcji entropii może stać się ważnym narzędziem do generowania nowych, złożonych form. Natomiast wymaga to od twórcy balansowania między chaosem a porządkiem, między przypadkowością a intencjonalnością. To, co jednak jest fascynujące to inspiracja nowych pomysłów i form, które wykraczają poza tradycyjne granice sztuki i projektowania. Odkrycie nowych sposobów na integrację przypadkowości i chaosu w projektowaniu może otworzyć nowe perspektywy dla twórców w różnych dziedzinach (Słyk, 2012).

²⁴ Wyświetlacze HDM (*Helmet Mounted Display*) to urządzenia wyświetlające noszone na głowie jako zintegrowane z okularami lub zamontowane na kasku.

²⁵ VR (*virtual reality*) – wirtualna rzeczywistość, która polega na syntetyzowaniu przez programy komputerowe doznań odbieranych przez zmysły ludzkie, najczęściej dźwięku i obrazu, ale także dotyku (Encyklopedia PWN).

²⁶ CAVE (*cave automatic virtual environment*) to immersyjne środowisko wirtualnej rzeczywistości, w którym projektory są skierowane na od trzech do sześciu ścian sześcianu wielkości pokoju.

3.3. Era narzędzi cyfrowych

W pierwszej kolejności wynalazki technologiczne trafiają na pole architektury jako praktyczne usprawnienia. Początkowo są stosowane jako zamienniki wcześniejszych rozwiązań. Dopiero z czasem, gdy świadomość twórców rośnie, te nowe technologie są zaczynają być wykorzystywane w sposób bardziej kompleksowy, otwierając nowe możliwości i wyzwania. Rewolucja informacyjna przyniosła architektom nowe narzędzia, które stopniowo zwiększają efektywność projektowania i sporządzania dokumentacji. Te nowe metody mają potencjał stać się fundamentem nowego medium architektury, które będzie odzwierciedlać współczesne potrzeby i wyzwania technologiczne. Patrząc w przyszłość, możemy spodziewać się, że rozwój technologii będzie nadal kształtował pole architektury, wprowadzając coraz bardziej zaawansowane narzędzia i techniki (Słyk, 2012).

3.3.1. Computer-Aided Design²⁷

Od końca XX wieku rozwój technologii komputerowej znacząco wpłynął na metody pracy w architekturze, przyczyniając się do powstania i popularyzacji systemów CAD (*Computer Aided Design*). Początki tych zmian sięgają lat 80., kiedy to firma Autodesk wprowadziła na rynek AutoCAD – jedno z pierwszych narzędzi umożliwiających architektom oraz inżynierom tworzenie dokumentacji projektowej na komputerach osobistych (PC – *personal computer*). Był to moment przełomowy, ponieważ to oprogramowanie, działające na komputerach IBM PC, pozwalało na zastąpienie tradycyjnych metod rysunku technicznego rozwiązaniami cyfrowymi (Słyk, 2012; Jones, 2014).

Wprowadzenie AutoCADa umożliwiło przejście od manualnych, zwykle czasochłonnych procesów rysunkowych do bardziej efektywnych i zautomatyzowanych metod pracy. Program ten oferował funkcjonalności, które wcześniej były dostępne jedynie dla specjalistycznych narzędzi stosowanych przez zawodowych kreślarzy. Wspierając rysowanie równoległe i operacje na liniach, AutoCAD przyczynił się do zwiększenia precyzji i szybkości pracy architektów, jednocześnie minimalizując ryzyko błędów. Nie był to jednak jedyny program, który zmienił oblicze projektowania architektonicznego. W połowie lat osiemdziesiątych pojawiły się inne konkurencyjne rozwiązania, takie jak MicroStation firmy Bentley czy ArchiCAD, które dodatkowo wzbogaciły rynek narzędzi projektowych. Oprogramowanie to, przeznaczone początkowo na komputery platformy Macintosh (Apple), pozwalało na jeszcze bardziej zaawansowane modelowanie 3D, wprowadzając nowe sposoby interakcji z projektem (Słyk, 2012).

Z czasem systemy CAD przekształciły się z prostych narzędzi wspomagających rysowanie w kompleksowe platformy projektowe, które integrują różne aspekty projektu – od geometrii budynku po szczegółowe informacje techniczne. Współczesne oprogramowanie, takie jak BIM²⁸ (*Building Information Modeling*), idzie o krok dalej, umożliwiając pełną integrację

²⁷ CAD – komputerowe wspomaganie projektowania.

²⁸ Najczęściej używanymi programami BIM są Revit (firmy Autodesk) i ArchiCAD (firmy Graphisoft).

wszystkich danych związanych z projektem, co usprawnia proces projektowania, zarządzanie budową, eksploatacją i konserwacją obiektów.

BIM, jako model informacyjny budynku, staje się standardem w branży architektonicznej, umożliwiając bardziej złożoną analizę i wizualizację projektów. Dzięki integracji danych technicznych, strukturalnych i architektonicznych, BIM umożliwia lepsze zarządzanie projektem na każdym etapie jego realizacji, od koncepcji, przez budowę, aż po zarządzanie gotowym obiektem (Slyk, 2012; Jones, 2014).

3.3.2. Przetwarzanie geometrii

Postęp technologiczny w zakresie systemów wspomagania projektowania architektonicznego, takich jak CAD, znacząco zmienił sposób, w jaki architekci definiują i manipulują geometrią obiektów. Współczesne narzędzia projektowe pozwalają na przekształcanie rzeczywistości przestrzennej na dane numeryczne, co jest podstawą efektywnego tworzenia dokumentacji projektowej oraz modelowania skomplikowanych struktur (Slyk, 2012).

Kluczowym aspektem nowoczesnych systemów CAD jest parametryzacja, która polega na zmniejszeniu liczby zmiennych i jednoczesnym zwiększeniu możliwości adaptacyjnych projektu. Dzięki parametryzacji, architekci mogą wprowadzać szybkie zmiany w projekcie, które automatycznie dostosowują się do zdefiniowanych wcześniej parametrów, co znacząco zwiększa efektywność pracy. Parametryzacja dotyczy procesów organizacji pracy, automatyzacji, wizualizacji, jak i podstawowych definicji geometrycznych (Slyk, 2012).

Jednym z najważniejszych osiągnięć w zakresie przetwarzania geometrii jest rozwój technologii NURBS (*Non-Uniform Rational B-Splines*). NURBS pozwala na precyzyjne definiowanie skomplikowanych powierzchni i krzywizn, co jest kluczowe w modelowaniu nowoczesnych obiektów architektonicznych. Technologia ta wywodzi się z krzywych Béziera, czyli takich, których geometria jest definiowana za pomocą punktów kontrolnych. Początkowo były stosowane głównie w przemyśle samochodowym i lotniczym, a obecnie stanowią podstawę zaawansowanych narzędzi modelowania metodą CAD. Pozwalają w prosty i intuicyjny sposób modelować złożone kształty (Rogers, 2001). Większość oprogramowania dla inżynierów oferuje wyspecjalizowane środowisko programistyczne, pierwotnie w formie wbudowanego języka programowania, takiego jak AutoLISP dla AutoCADa bądź RhinoSCRIPT dla Rhinoceros. Gwarantuje to dostęp do narzędzi wbudowanych w program i tworzenia procedur. Współcześnie są to nakładki (wtyczki, *plug-in*) programistyczne, które uzyskują graficzną formę przedstawiania kodu, takie jak Grasshopper dla Rhinoceros. Pozwala to na intuicyjne programowanie przez kształtowanie funkcjonalnego grafu, bez konieczności znajomości języków programowania (natomiast istnieją komponenty w Grasshopperze, które pozwalają na wykorzystanie kodu, m.in. w języku Python i C#). Poszczególne komponenty symbolizują polecenia definiujące geometrię, przekształcające, wykonujące funkcje logiczne, sterujące i pozwalające sprawdzać na bieżąco efekt operacji (Slyk, 2012).

Równolegle z rozwojem systemów CAD, rośnie znaczenie interakcji człowiek-komputer. Przestrzenne manipulatory haptyczne²⁹, zapewniające pełny lub częściowy dostęp do wirtualnej rzeczywistości, takie jak *3D Phantom*, umożliwiają projektantom niemal fizyczne odczuwanie modelowanych obiektów, co wprowadza projektowanie architektoniczne na nowy poziom realizmu. Dzięki tej technologii użytkownicy mogą intuicyjnie manipulować modelami 3D, co do złudzenia symuluje fizyczny proces rzeźbienia. Rzeźbiąc manipulatorem, wypełniamy *voxels* (trójwymiarowe piksele) wirtualną gliną, najpierw tworzymy wyjściową bryłę, a następnie modelujemy poprzez cięcie, wygładzanie, sklejanie, itd. Efekty można obserwować na ekranie lub monitorze z projekcją trójwymiarową. W każdej chwili można modelowany obiekt zapisać, eksportować lub wydrukować 3D. Wprowadzenie haptyki do procesu projektowania pozwala na przejście od abstrakcyjnych figur geometrycznych do bardziej realistycznych modeli, które można "fizycznie" dotykać i przekształcać. To zbliżenie projektanta do wirtualnego obiektu nie tylko ułatwia proces projektowy, ale również zwiększa jego efektywność. (Słyk, 2012).

3.3.3. Algorytmy genetyczne

Już na wstępie rozwoju technologii informacyjnej pojawił się koncept zbliżenia sposobu pracy maszyn liczących do procesów zachodzących w naturze (Mitchell, 1998). Pionierzy komputeryzacji (np. Alan Turing i John von Neumann) wywodzili swoje idee z zainteresowań przyrodniczych i procesami uczenia się. W latach 50. i 60. informatycy z wielu ośrodków pracowali nad możliwościami zastosowania metod ewolucyjnych do rozwiązywania konkretnych problemów technicznych (Słyk, 2012).

Algorytmy genetyczne (Holland, 1992), inspirowane naturalnymi procesami ewolucji, stanowią zaawansowane narzędzie obliczeniowe, które znajduje szerokie zastosowanie w różnych dziedzinach nauki, w tym również w architekturze. Ich zdolność do iteracyjnej optymalizacji złożonych problemów projektowych sprawia, że stają się ważnym elementem współczesnych procesów projektowania, szczególnie w kontekście wyzwań związanych z geometrią, funkcjonalnością oraz wydajnością konstrukcji.

Koncepcja Hollanda (1992) ściśle odwzorowuje mechanizm znany z genetyki. Naśladując one mechanizmy naturalnej selekcji, rekombinacji i mutacji, wykorzystując populacje potencjalnych rozwiązań. Najpierw określa się problem, który algorytm ma rozwiązać. Przykładem może być optymalizacja układu pomieszczeń w budynku pod kątem maksymalnej efektywności energetycznej. Rozwiązania problemu są kodowane w formie tzw. chromosomów. Chromosom to ciąg symboli (zazwyczaj binarnych), który reprezentuje konkretne rozwiązanie problemu. Algorytm zaczyna od wygenerowania początkowej populacji chromosomów, czyli zestawu losowych rozwiązań. Liczba rozwiązań w populacji może być różna, ale może osiągać

²⁹ Manipulatory te pochodzą od mechanizmów stworzonych dla systemu *fly by wire*, miały zapewnić pilotom odczucie oporu aerodynamicznego na hydraulicznie wspomaganym elementach sterujących maszyną. Współczesne manipulatory składają się z „pióra”, przestrzennego pantografu i głowicy sterującej. Powszechnie stosowane są urządzenia firmy Sensable o nazwie towarowej *Phantom 3D*, która bywa utożsamiana z całą klasą sprzętu tego typu (Słyk, 2012).

kilkaset czy kilka tysięcy wariacji. Każde rozwiązanie (chromosom) jest oceniane za pomocą funkcji przystosowania (*fitness function*). Funkcja ta mierzy, jak dobrze dane rozwiązanie spełnia kryteria optymalizacji. W przypadku projektowania budynku, funkcja celu może oceniać całkowite zużycie energii przez budynek. Po ocenie wszystkich chromosomów w populacji, algorytm wybiera te, które mają najwyższą wartość funkcji celu. Te wybrane chromosomy (najlepsze rozwiązania) stają się "rodzicami" dla następnego pokolenia. Wybrane chromosomy (rodzice) są krzyżowane i mutowane, aby stworzyć nowe rozwiązania (potomstwo). Krzyżowanie polega na wymianie fragmentów chromosomów między rodzicami, co prowadzi do powstania nowych kombinacji cech. Aby zapobiec przedwczesnej konwergencji (czyli sytuacji, w której algorytm zbyt szybko osiąga optymalne rozwiązanie, ignorując inne potencjalne rozwiązania), algorytm wprowadza losowe zmiany (mutacje) w niektórych chromosomach. Mutacja może zmienić pojedynczy bit w chromosomie, co może prowadzić do odkrycia nowych, wcześniej nieznanych rozwiązań. Nowo wygenerowane chromosomy (potomstwo) stają się częścią nowej populacji. Proces oceny, selekcji, krzyżowania i mutacji powtarza się przez wiele pokoleń, co stopniowo prowadzi do poprawy jakości rozwiązań. Algorytm kontynuuje działanie, aż osiągnięte zostanie rozwiązanie spełniające zadane kryteria (tzn. osiągnięcie optymalnej wartości funkcji celu) lub do momentu, w którym algorytm nie przynosi już dalszej poprawy (Encyklopedia PWN).

Zastosowanie algorytmów genetycznych w architekturze jest szczególnie użyteczne w przypadku problemów wymagających złożonej optymalizacji wielu kryteriów jednocześnie. W praktyce algorytmy te mogą być stosowane do optymalizacji takich parametrów, jak kształt i orientacja budynku, układ przestrzenny wnętrza, a także wybór materiałów budowlanych. Proces ten pozwala na stworzenie wielu wariantów projektowych, które są następnie selekcjonowane na podstawie zdefiniowanych kryteriów, takich jak efektywność energetyczna, komfort użytkownika czy minimalizacja kosztów (Słyk, 2012).

3.3.4. Symulacje i optymalizacja

Zaawansowane narzędzia cyfrowe umożliwiają optymalizację na etapie projektowania i eksploatacji budynków. Te nowoczesne technologie pozwalają na wielokrotne symulowanie, testowanie i doskonalenie rozwiązań architektonicznych.

Jednym z kluczowych osiągnięć w dziedzinie architektury cyfrowej jest możliwość tworzenia komputerowych modeli budynków, które służą jako wirtualne laboratoria do testowania różnych scenariuszy projektowych. Modele te są wypełnione danymi charakteryzującymi rozwiązania przestrzenne, inżynierskie oraz uwarunkowania otoczenia, co umożliwia symulowanie przyszłych stanów budynku jeszcze na etapie projektowania. Tego typu modele pozwalają na wielokrotne przekształcanie form i funkcji budynku w odpowiedzi na dane wejściowe pochodzące z analiz parametrów takich jak oświetlenie, przepływ powietrza, czy akustyka (Mitchell, 1996; Słyk, 2012).

Kolejnym istotnym aspektem w cyfrowym projektowaniu architektury jest zastosowanie heurystycznych metod optymalizacyjnych. W tym podejściu projektowanie nie polega na dążeniu do ścisłej optymalizacji pojedynczego rozwiązania, lecz na iteracyjnym generowaniu wielu

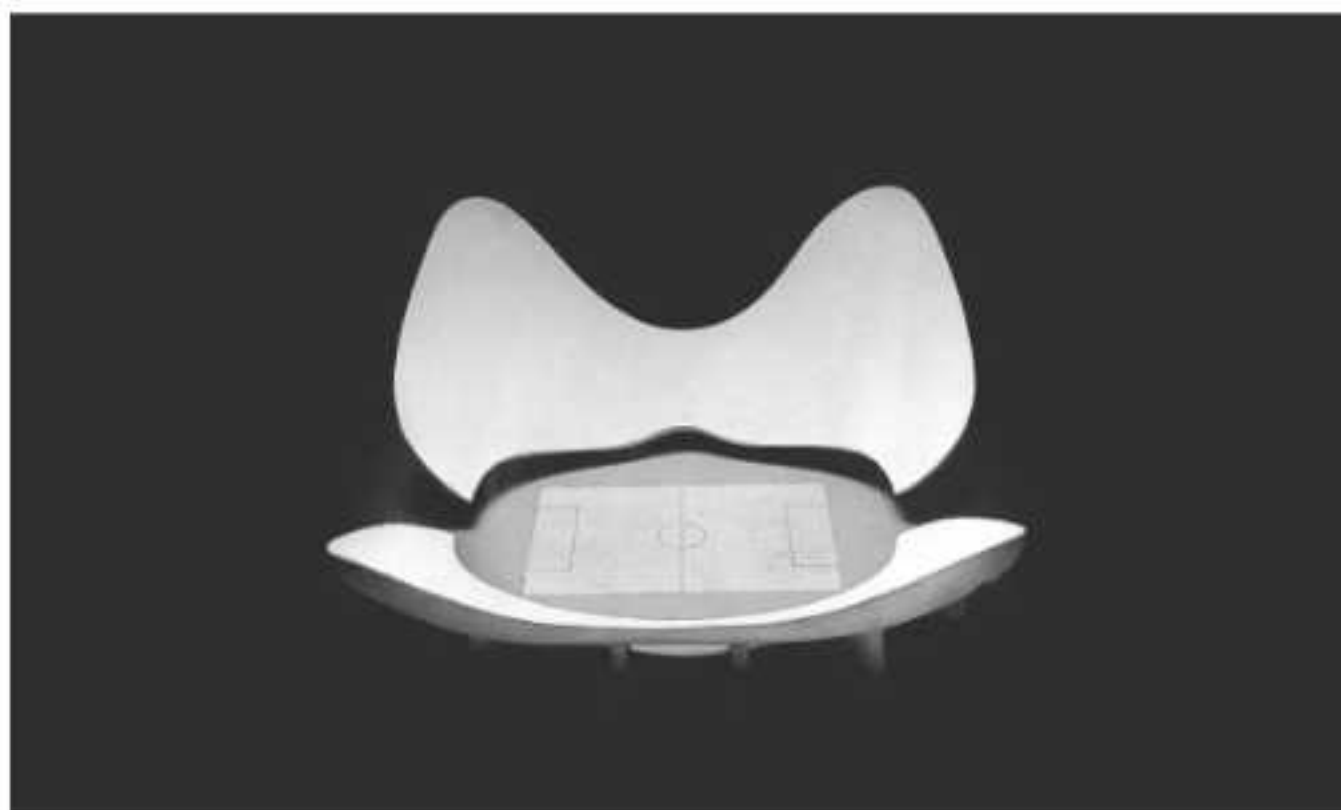
rozwiązań zbliżających się do wyznaczonego celu. Każde z tych rozwiązań jest testowane, a uzyskane wyniki są analizowane, co pozwala na stopniowe doskonalenie projektu. Przykładem tego podejścia jest projektowanie systemów fasad, które muszą spełniać różne wymagania dotyczące naświetlenia, wentylacji czy estetyki. Wielokrotne symulacje różnych konfiguracji pozwalają na osiągnięcie rozwiązania, które optymalizuje te wszystkie aspekty jednocześnie. W praktyce oznacza to stworzenie wirtualnego środowiska prób, które wiernie odtwarza rzeczywiste warunki (Słyk, 2012).

Zaawansowane metody parametryzacji oraz symulacji znajdują szczególne zastosowanie w projektach o dużej skali i złożoności, takich jak wieżowce czy budynki użyteczności publicznej. Parametryzacja pozwala na definiowanie geometrii budynku poprzez zbiór parametrów, które mogą być modyfikowane w zależności od wymagań projektowych. W przypadku wieżowca Swiss RE zaprojektowanego przez Foster + Partners, znanego również jako „Gherkin”, parametryzacja odegrała kluczową rolę w optymalizacji aerodynamicznej budynku. Projektanci wykorzystali zaawansowane symulacje przepływów powietrza, aby zminimalizować opór powietrza i poprawić efektywność energetyczną budynku. Analiza aerodynamiczna fasady oraz symulacje dotyczące nagrzewania światłem dziennym pozwoliły na zoptymalizowanie kształtu budynku tak, aby zmniejszyć koszty związane z eksploatacją i utrzymaniem komfortu wewnątrz budynku. Dodatkowo, symulacje te umożliwiły zredukowanie potrzeb związanych z mechaniczną wentylacją poprzez naturalne wykorzystanie przepływów powietrza (Kolarevic, 2005; Słyk, 2012).

Manifestacja umiejętności przewidzenia skutków i zdolności do współdziałania ze zjawiskami naturalnymi stały się popularnymi symbolami zapisywanymi we współczesnych budynkach. Prezentowane systemy danych i zależności między nimi mają pokazywać, że autor świadomie ustalił kryteria, program komputerowy wygenerował parametryczny obraz rezultatów, a użytkownik doświadcza praktycznych konsekwencji optymalizacji formy przestrzennej (Słyk, 2012).

3.3.5. Parametrycyzm

Mówiąc o nurcie cyfrowym w architekturze, nie sposób nie wspomnieć o parametrycyzmie. Modelowanie parametryczne stanowi jedno z najważniejszych narzędzi współczesnej architektury, umożliwiające projektowanie budynków o złożonych formach. Początki tej metodologii sięgają lat 60. XX wieku, kiedy włoski architekt Luigi Moretti zaproponował zastosowanie parametrów matematycznych do kształtowania form architektonicznych. Jego projekt Stadionu N (rys. 3.5.) stał się wczesnym przykładem możliwości modelowania parametrycznego. Moretti opracował zestaw 19 parametrów, które za pomocą równań matematycznych były odpowiedzialne za ostateczny kształt konstrukcji (Moretti, 1968; Tedeschi, 2014; Chaillou, 2022).



Rys. 3.5. Model projektu stadionu N Morettiiego.

Źródło: <https://www.giuseppegallo.design/publications-talks/luigi-moretti-from-history-to-parametric-architecture/>

Rozwój modelowania parametrycznego został przyspieszony przez powstanie oprogramowania komputerowego, które umożliwiał projektantom manipulowanie parametrami w sposób bardziej zorganizowany i precyzyjny. Ivan Sutherland, tworząc SketchPad (rys. 3.6.) w 1963 roku, wprowadził pojęcie *atomic constraint*, czyli mechanizmu pozwalającego na definiowanie relacji między różnymi elementami geometrycznymi. SketchPad umożliwiał projektantom modyfikację tych parametrów i relacji, co stanowiło znaczący krok naprzód w kierunku cyfrowego projektowania. Kolejnym przełomem było wprowadzenie w 1988 roku przez Samuela Geisberga oprogramowania Pro/ENGINEER, które było pierwszym narzędziem oferującym pełny dostęp do parametrów geometrycznych. Geisberg podkreślał, że celem jego oprogramowania jest stworzenie systemu wystarczająco elastycznego, aby umożliwić inżynierom rozważenie różnych wariantów projektowych przy minimalnych kosztach zmian projektowych. Te założenia stały się podstawą sukcesu modelowania parametrycznego, które zdominowało branżę architektoniczną w kolejnych dekadach.

Pojęcie parametrycyzmu zostało spopularyzowane przez niemieckiego architekta Patrika Schumachera, współpracującego z Zahą Hadid, który w swoim manifestie z 2009 roku zdefiniował parametrycyzm jako nowy globalny styl architektoniczny i urbanistyczny. Schumacher argumentował, że jest on wynikiem konwergencji różnych technologicznych i projektowych

metodologii, które umożliwiają architektom osiąganie nowych poziomów złożoności i precyzji w projektowaniu (Schumacher, 2009; Chaillou, 2022).



Rys. 3.6. Sutherland używający SketchPada, 1963.

Źródło: <https://lookingglassxr.com/augmented-reality/what-is-augmented-reality/attachment/sketchpad/>

Praktyczne zastosowanie modelowania parametrycznego można najlepiej zobaczyć na przykładzie projektów architektki Zaha Hadid (która miała też wykształcenie matematyczne), jednej z czołowych przedstawicielek tego nurtu. Jej podejście do projektowania, takie jak w przypadku planu zagospodarowania przestrzennego Kartal Pendik w Stambule (rys. 3.7.), polegało na zakodowaniu zasad projektowych bezpośrednio w programie komputerowym. Dzięki temu mogła kontrolować geometrię budynków, co doprowadziło do powstania charakterystycznych organicznych form (Chaillou, 2022).



Rys. 3.7. Model masterplanu Kartal Pendik w Stambule biura Zaha Hadid Architects.

Źródło: <https://www.zaha-hadid.com/masterplans/kartal-pendik-masterplan/>

Rozwój parametrycyzmu był wspierany przez powstanie nowoczesnych narzędzi programistycznych, takich jak Grasshopper, który zrewolucjonizował proces projektowania. Grasshopper, stworzony w latach 2000. przez Davida Ruttena, umożliwia projektantom kodowanie złożonych form geometrycznych poprzez intuicyjny interfejs graficzny, co eliminuje potrzebę nauki języków programowania. Narzędzie to pozwala na łatwe manipulowanie parametrami i funkcjami (Chaillou, 2022).

Krytycy wskazują, że parametryczne modelowanie często opiera się na założeniu, iż wszystkie istotne właściwości budynku mogą być opisane za pomocą sztywnych parametrów. W rzeczywistości jednak, wiele aspektów architektonicznych, takich jak kontekst kulturowy, społeczny czy stylistyczny, nie może być łatwo ujęte w sztywne reguły projektowe (Chaillou, 2022).

3.3.6. Sztuczna Inteligencja

Sztuczna inteligencja (SI/AI, *artificial intelligence*) odgrywa coraz bardziej znaczącą rolę w kształtowaniu współczesnej architektury, łącząc zaawansowane technologie z tradycyjnymi metodami projektowania. Już w latach 70. XX wieku pionierzy tacy jak Nicholas Negroponte z MIT Media Lab's Architecture Machine Group (AMG) przewidywali, że AI może zrewolucjonizować architekturę. W swoich projektach, takich jak Urban 5, Negroponte (1970) wprowadził pojęcie *machine assistant*, gdzie inteligentne systemy wspierały architektów w procesie projektowania, sugerując optymalne układy przestrzenne i wykrywając potencjalne konflikty w projektach (Chaillou, 2022).

Jednym z najważniejszych wkładów AI do architektury było stworzenie przez Cedrica Price'a koncepcji „Generatora”, czyli programu który pozwalał na adaptowanie się budynków w nawiązaniu do zmian w zachowaniach użytkowników. Komputerowy system sterowania przestrzenią, opracowany przez Price'a, był w stanie na bieżąco modyfikować układy przestrzenne, co stanowiło nowość w podejściu do projektowania adaptacyjnego (Chaillou, 2022).

Współczesne zastosowania AI w architekturze poszerzyły się znacząco w ostatniej dekadzie, co znalazło odzwierciedlenie w licznych badaniach i publikacjach na ten temat. AI jest wykorzystywana nie tylko do automatyzacji procesów projektowych, ale również do tworzenia złożonych, parametrycznych form architektonicznych, które wcześniej były trudne do zrealizowania. Nowoczesne narzędzia, umożliwiające generatywne projektowanie czy wykorzystanie uczenia maszynowego, umożliwiają architektom eksplorację nowych granic w projektowaniu (Chaillou, 2022).

Jednakże, rozwój AI w architekturze napotyka również na pewne wyzwania. Istnieje potrzeba znalezienia równowagi między wydajnością a innymi istotnymi aspektami architektury, takimi jak organizacja przestrzeni, estetyka czy kontekst kulturowy. AI jest często krytykowana za to, że skupia się zbyt mocno na efektywności kosztem bardziej subtelnych i złożonych aspektów projektowania. Mimo to, narzędzia sztucznej inteligencji oferują ogromny potencjał dla przyszłości architektury, zarówno pod względem technologicznym jak i teoretycznym (Chaillou, 2022).

Uczenie maszynowe (*Machine Learning*) stanowi jeden z najważniejszych filarów współczesnej sztucznej inteligencji, odgrywając kluczową rolę w różnych dziedzinach nauki, technologii, a także w architekturze. Jego znaczenie w architekturze wynika z możliwości jakie oferuje w zakresie analizy danych, optymalizacji procesów projektowych, automatyzacji złożonych zadań związanych z modelowaniem i symulacją architektoniczną (Chaillou, 2022).

Uczenie maszynowe opiera się na zasadzie, że systemy komputerowe mogą uczyć się wzorców i podejmować decyzje na podstawie danych, bez konieczności bycia zaprogramowanymi w tradycyjny sposób. Proces ten polega na ekspozycji modeli na duże zbiory danych, które są analizowane w celu identyfikacji wzorców, a następnie wykorzystywane do podejmowania decyzji lub przewidywania przyszłych wyników. Proces ten można podzielić na kilka kluczowych etapów. Na początku procesu uczenia maszynowego kluczowe jest zebranie dużej ilości danych, które stanowią podstawę do analizy. Dane te mogą pochodzić z różnych źródeł, takich jak pomiary środowiskowe, dane demograficzne, historie użytkowania budynków czy informacje o materiałach budowlanych. W architekturze mogą to być zarówno dane liczbowe, jak i dane wizualne, które są następnie przetwarzane przez model. Kolejnym krokiem jest przetwarzanie danych oraz wybór cech (*features*), które są najistotniejsze dla danego modelu. Wybór odpowiednich cech ma kluczowe znaczenie, ponieważ decyduje o tym, jakie informacje model będzie uwzględniał podczas procesu uczenia się. W fazie trenowania model jest eksponowany na dane treningowe, na podstawie których uczy się rozpoznawać wzorce. Proces ten jest często nazywany „dostrajaniem” (*tuning*), podczas którego model stopniowo poprawia swoje przewidywania, bazując na wynikach z wcześniejszych iteracji. Im większy zbiór danych, tym bardziej dokładny może stać się model. Po zakończeniu fazy trenowania model jest walidowany (oceniany) i testowany na nowych danych, które nie były wcześniej używane w procesie uczenia. Pozwala określić jak dobrze model radzi sobie z nowymi, nieznanymi danymi (Chaillou, 2022).

Jednym z najważniejszych wyzwań związanych z zastosowaniem uczenia maszynowego w architekturze jest zrozumienie i interpretacja działania modeli, co jest bardzo istotne dla zachowania kontroli nad procesem projektowym. W odróżnieniu od tradycyjnych technik projektowych, gdzie projektant ma pełną kontrolę nad każdym etapem tworzenia, uczenie maszynowe działa na zasadzie *gray box* (szarej skrzynki), co oznacza, że część procesu uczenia się i podejmowania decyzji pozostaje ukryta przed użytkownikiem. Termin „gray box” został wprowadzony przez Andrew Witta, aby opisać stan, w którym użytkownicy mają tylko częściową kontrolę nad procesem obliczeniowym modelu AI. W odróżnieniu od *white box* (białej skrzynki), gdzie wszystkie decyzje są w pełni kontrolowane przez użytkownika, oraz *black box* (czarnej skrzynki), gdzie użytkownik nie ma żadnej kontroli, *gray box* reprezentuje kompromis między kontrolą a złożonością. W architekturze oznacza to, że projektanci mogą kontrolować niektóre aspekty modelu, takie jak hiperparametry³⁰ (*hyperparameters*), ale większość procesu

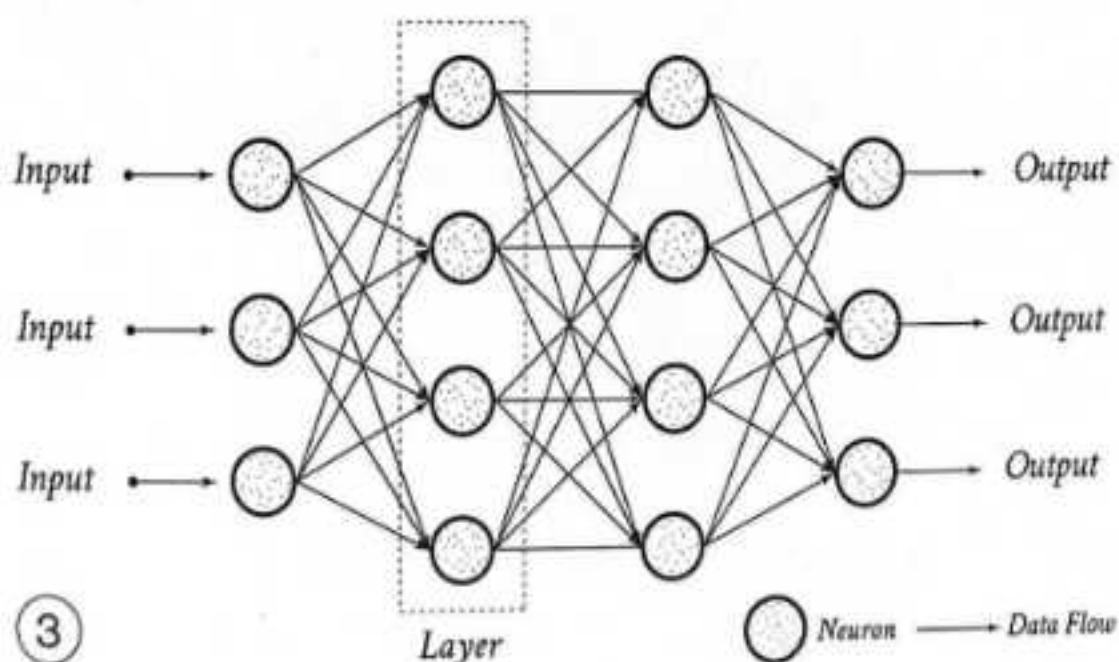
³⁰ W uczeniu maszynowym użytkownicy mają kontrolę nad kilkoma kluczowymi ustawieniami modelu, zwanymi hiperparametrami. Te parametry mają kluczowy wpływ na to, jak model uczy się z danych i jakie wyniki generuje.

decyzyjnego odbywa się wewnątrz modelu. W miarę jak modele stają się bardziej zaawansowane, coraz trudniej jest zrozumieć, jak dokładnie podejmowane są decyzje. Dla architektów, którzy muszą odpowiadać za bezpieczeństwo dotyczące danych i zgodność z przepisami, ta utrata kontroli może być problematyczna (Witt, 2018; Chaillou, 2022).

Uczenie maszynowe można podzielić na trzy główne strategie treningowe: uczenie nadzorowane (*supervised*), nienadzorowane (*unsupervised*) oraz przez wzmacnianie (*reinforced*). Uczenie nadzorowane jest najczęściej stosowaną metodą, w której model uczy się na oznakowanych (*labeled*) danych, ucząc się mapowania wejść na odpowiednie wyjścia (*input-output*). Przykładem może być klasyfikacja obrazów, gdzie model na podstawie zestawu oznakowanych zdjęć uczy się rozpoznawać różne obiekty. Uczenie nienadzorowane stara się modelować wzorce obecne w danych bez wcześniejszego oznakowania. Model samodzielnie odkrywa zależności i struktury w surowych danych, co jest użyteczne np. w klasteryzacji (grupowaniu) danych. Uczenie przez wzmocnienie polega na symulowaniu sekwencji kroków, z których model zbiera nagrody, aby doskonalić swoje działanie w określonym zadaniu (Chaillou, 2022).

Oprócz strategii treningowych, modele uczenia maszynowego można klasyfikować według ich architektury, np. głębokie sieci neuronowe (*deep neural networks*) czy sieci bayesowskie (*Bayesian networks*). Każda z tych architektur ma specyficzne zastosowania i różni się pod względem struktury oraz sposobu, w jaki przetwarza informacje (Chaillou, 2022).

Najczęściej wykorzystywane we współczesnych modelach są sztuczne sieci neuronowe (*Artificial Neural Networks, ANN*) inspirowane ludzkim mózgiem. Składają się z neuronów (węzłów) połączonych warstwami. Sieci neuronowe przetwarzają dane w sposób rozproszony, a obliczenia odbywają się przez propagację sygnałów przez kolejne warstwy. Architektura tych sieci może być dostosowana przez modyfikowanie liczby neuronów, warstw oraz parametrów treningowych, co pozwala na adaptację modeli do specyficznych zadań. W procesie treningu sieci neuronowej dane przepływają przez sieć w procesie nazywanym *feedforward*, gdzie sygnały przechodzą od wejścia do wyjścia. Po obliczeniu wyniku następuje ocena jego dokładności, a w przypadku błędów uruchamiany jest mechanizm *feedbacku* zwany *backpropagation*, który koryguje wagi neuronów, aby zmniejszyć błędy w kolejnych iteracjach. Jest to kluczowe dla procesu uczenia się sieci neuronowych, umożliwiając stopniowe dostrajanie sieci do zadania poprzez wielokrotne powtarzanie tego procesu (rys. 3.8.) (Chaillou, 2022).

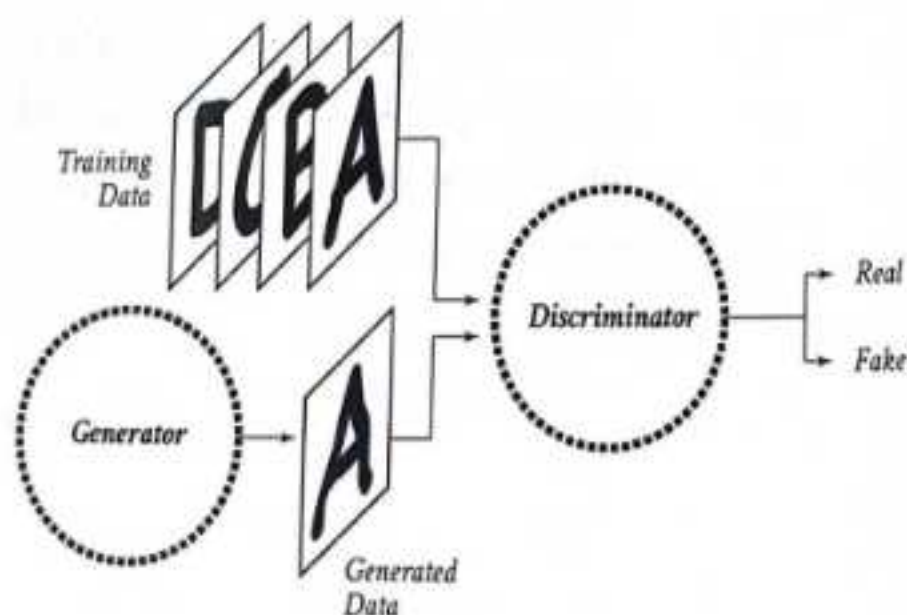


Rys. 3.8. Uproszczony schemat działania sieci neuronowych ANN.
Źródło: Chaillou, S., *Artificial Intelligence and Architecture*, 2022

Wśród różnych typów sieci neuronowych, sieci konwolucyjne (*Convolutional Neural Networks, CNN*) są szczególnie ważne w przetwarzaniu obrazów. Kluczową cechą CNN jest zdolność do automatycznego wyodrębniania cech z obrazów przy użyciu filtrów (*kernels*), które przesuwają się po obrazie, identyfikując wzorce i struktury takie jak krawędzie, tekstury i kształty. W architekturze mogą być wykorzystywane do analizy zdjęć budynków, identyfikacji materiałów budowlanych oraz automatycznej klasyfikacji różnych elementów architektonicznych na podstawie obrazów. Grafowe sieci neuronowe (*Graph Neural Networks, GNN*) są zaprojektowane do pracy z danymi, które można reprezentować jako grafy, czyli zbiór węzłów połączonych krawędziami. W architekturze, GNN mogą być stosowane do analizy złożonych relacji przestrzennych, takich jak struktury miejskie, sieci transportowe czy nawet wewnętrzne układy budynków. Generatywne sieci przeciwstawne (*Generative Adversarial Networks, GAN*) to rewolucyjna architektura, która składa się z dwóch rywalizujących ze sobą modeli: generatora i dyskriminatora (rys. 3.9.). Generator tworzy syntetyczne dane, czyli dane wygenerowane sztucznie, które naśladują cechy statystyczne i wzorce danych ze świata rzeczywistego, podczas gdy dyskriminator stara się odróżnić dane wygenerowane od rzeczywistych. Proces rywalizacji między generatorem a dyskriminatorem prowadzi do stopniowej poprawy jakości generowanych danych, co czyni GAN jednym z najważniejszych osiągnięć w dziedzinie generowania obrazów i danych syntetycznych (Lee, 2018; Chaillou, 2022).

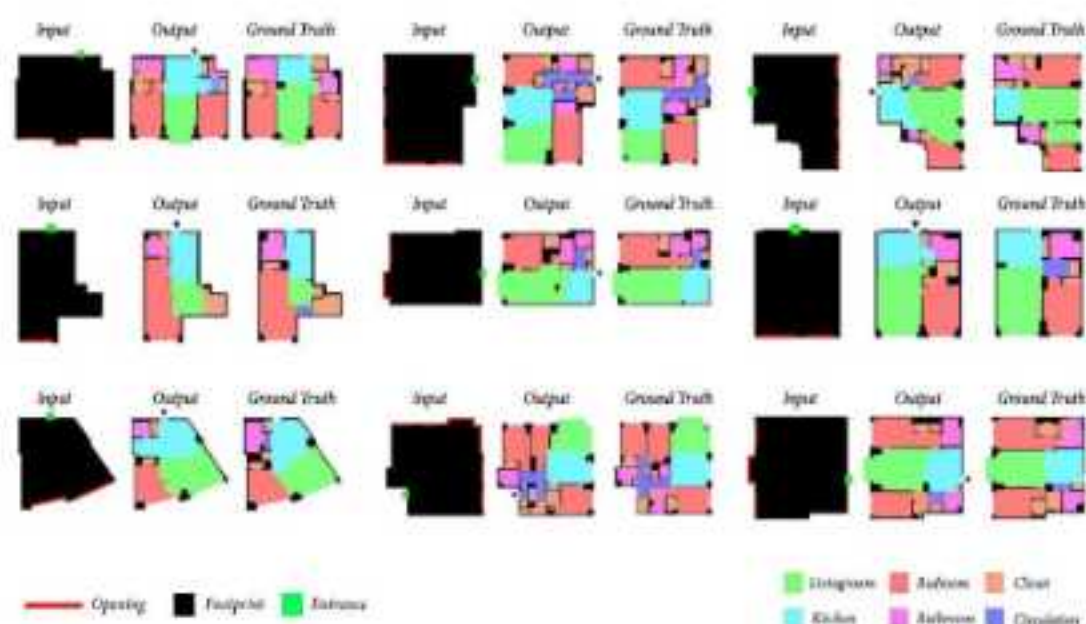
Współczesna architektura coraz częściej czerpie korzyści z rozwoju sztucznej inteligencji. Modele AI, pierwotnie rozwijane na potrzeby innych dziedzin, znajdują nowe zastosowania w architekturze, co otwiera szerokie pole do eksploracji technologicznej. Złożoność koncepcji architektonicznych, takich jak układ przestrzenny pomieszczeń czy odpowiednie umiejscowienie elementów fasady sprawia, że AI może być skutecznie wykorzystywana w procesie projektowym. W podrozdziale zostanie przedstawiony przykład zastosowania modelu AI w kontekście

zaplanowania przestrzeni mieszkalnej (rys. 3.10.). Model był trenowany na bazie danych obrazowych, które przedstawiają różne etapy nauki – od prostego planu mieszkania aż po pełen układ funkcjonalny z uwzględnieniem takich elementów jak wejścia, okna i poszczególne pomieszczenia. Proces ilustrowany przez sekwencje obrazów pokazuje jak AI stopniowo nabywa umiejętności rozumienia złożonych koncepcji przestrzennych (Chaillou, 2022).



Rys. 3.9. Uproszczony schemat działania sieci GAN. Autor: Chaillou, S., *Artificial Intelligence and Architecture*, 2022.

Pomimo znaczącego postępu w generowaniu układów przestrzennych, wygenerowane plany nie są wolne od wad. Często zawierają błędy w proporcjach pomieszczeń lub nieprawidłowe rozmieszczenie elementów, co sprawia, że nie mogą stanowić w pełni funkcjonalnych planów architektonicznych. Natomiast wyniki te mogą stanowić wartościowy punkt wyjścia dla architektów, którzy mogą je modyfikować i dostosowywać do aktualnych potrzeb projektowych (Chaillou, 2022).



Rys. 3.10. Wygenerowane plany mieszkań przy pomocy modelu opartego na sieciach GAN. Źródło: <https://developer.nvidia.com/blog/archigan-generative-stack-apartment-building-design/>

Kolejnym ważnym aspektem jest jakość danych treningowych, które mają kluczowe znaczenie dla procesu uczenia się modeli AI. Niskiej jakości dane mogą prowadzić do powstawania błędów i "uprzedzeń" (*bias*), przez co konieczne jest stałe monitorowanie i korygowanie procesu nauki modelu (Chaillou, 2022).

Podsumowując, pomimo obecnych ograniczeń sztuczna inteligencja ma ogromny potencjał, aby zrewolucjonizować proces projektowania architektonicznego. Może stanowić cenne wsparcie w procesie twórczym, umożliwiając architektom generowanie bardziej złożonych i dopracowanych projektów. W miarę dalszego rozwoju tych technologii, AI może stać się nieodłącznym narzędziem w pracy projektowej, od wstępnych szkiców po finalne plany budynków (Chaillou, 2022).

3.3.7. Rzeczywistość rozszerzona

Wspomniano już o tym, że środowisko twórczości nieustannie rozszerza swój zasięg. W ostatnich latach dynamicznie rozwijają się technologie symulacji wszechogarniającej (immersyjnej), które powszechnie są znane jako XR (*extended reality*). Ten rodzaj rzeczywistości to więcej niż przeniesie obrazu na większy format. Brennan Spiegel stwierdził, że XR "jest jak śnienie z otwartymi oczami". Celem tych technologii jest generowanie wrażenia "obecności", co ma być odbierane jako równoległa rzeczywistość. Według Lee (2021) w ciągu najbliższych dwudziestu lat XR "zrewolucjonizuje rozrywkę, szkolenia, handel, opiekę zdrowotną, sport i podróże". Nasuwa się jednoznaczny wniosek - architektura nie będzie wyjątkiem.

XR to określenie, które obejmuje trzy rodzaje technologii: VR (wirtualna rzeczywistość, *virtual reality*), AR (rozszerzona rzeczywistość, *augmented reality*) i MR (mieszana rzeczywistość, *mixed reality*). VR odnosi się do całkowicie wygenerowanego wirtualnego środowiska, w które użytkownik się zagłębia. Wirtualna rzeczywistość jest niezależna od świata rzeczywistego. Z kolei rozszerzona rzeczywistość odnosi się do świata fizycznego. Na nagranie określonej przestrzeni nakłada się drugą warstwę, a algorytmy AR uzupełniają ten obraz o obiekty 3D, tekst, wideo, itp. Przykładem może być zastosowanie tej technologii podczas podróży, w nieznanym mieście turysta może spytać system AR o zabytki w najbliższym otoczeniu, a komputer nałoży animacje na widok prawdziwych miejsc, wskazując co warto obejrzeć. Natomiast w ostatnich latach pojawiła się kolejna technologia, nazywana mieszaną rzeczywistością, która łączy świat wirtualny i realny w taki sposób, by powstała rzeczywistość hybrydowa. MR kreuje złożone przestrzenie, powstałe w wyniku rozłożenia i analizy otaczającej scenerii, tak aby użytkownik mógł nawiązywać interaktywny kontakt z obiektami, które się w tej rzeczywistości znajdują. Aby MR sprawnie funkcjonowało, musi dobrze orientować się w przestrzeni i znać obiekty oraz osoby, które się w niej znajdują. Obecne śmiałe wizje przekraczają możliwości współczesnego widzenia komputerowego (*computer vision*), natomiast bardzo prawdopodobnym jest, że w ciągu kilku kolejnych dekad sytuacja się zmieni na korzyść rzeczywistości mieszanej (Lee, 2021).

Mówiąc o XR, warto wspomnieć o wyświetlaczach nagłownych HMD (*head mounted displays*), które zapewniają znacznie bardziej wszechogarniające wrażenia. Użytkownik HMD ma przed sobą dwa ekrany, na których wyświetlane są obrazy, które nieco się od siebie różnią po to, żeby zmylić wzrok i osiągnąć trójwymiarowy efekt. Te urządzenia dostarczają wrażeń immersyjnych i interaktywnych. Do osiągnięcia interakcji należy uzależnić wyświetlany obraz od np. ruchów głowy użytkownika. W przypadku VR urządzenie HMD zwykle nie jest "przezroczyste", bo całość scenerii jest wygenerowana sztucznie. Jeśli jednak chodzi o AR i MR, to urządzenia HMD są wyposażone w przezroczyste soczewki, przez co rzeczywisty świat miesza się z komputerowo wykreowanymi obiektami, a przed użytkownikiem rozlega się połączenie tych dwóch perspektyw. Dzięki postępowi technologicznemu nie trzeba korzystać z dodatkowych komputerów, gdyż obliczeniami zajmują się małe procesory w HMD (Lee, 2021).

W kontekście architektury technologie XR oferują nowe sposoby projektowania, prezentowania oraz analizowania przestrzeni, co może przyczynić się do zwiększenia efektywności procesów projektowych, poprawy komunikacji z odbiorcami projektów oraz innowacyjnego podejścia do badań w architekturze. Te narzędzia umożliwiają symulowanie przestrzeni, wizualizację projektów oraz interakcję z obiektami architektonicznymi. Wirtualna rzeczywistość umożliwia realistyczne doświadczanie przestrzeni, co może być szczególnie istotne tam, gdzie tradycyjne modele 3D czy wizualizacje komputerowe mogą nie oddać w pełni zamierzonej koncepcji. Rozszerzona rzeczywistość natomiast znajduje coraz szersze zastosowanie w procesie projektowania i prezentacji architektonicznych. Dzięki AR architekci mogą nakładać wirtualne modele na istniejące środowisko fizyczne, przez co możliwa jest interaktywna analiza kontekstu przestrzennego i lepsza wizualizacja projektów na wczesnych etapach planowania. Najprawdopodobniej w miarę dalszego rozwoju tej technologii i coraz bardziej postępującej cyfryzacji przestrzeni, jej rola w architekturze będzie rosła. Pewnym jest, że ten skok metodologiczny otwiera nowe możliwości, dając alternatywne środowisko twórczości architektom.

3.3.8. Cyfrowa fabrykacja

Pojawienie się maszyn sterowanych przez komputery znacząco zmieniło produkcję przedmiotów użytkowych, architektura również z tego skorzystała. Metody obliczeniowe pozwalają określić elementy dostosowujące się do konkretnych, indywidualnych potrzeb. Współczesne maszyny sterowane komputerowe pochodzą od tych z XIX w. Po wynalezieniu komputerów urządzenia te mogły uczestniczyć w zaprogramowanej procedurze, przetwarzać informacje z czujników zewnętrznych i wewnętrznych, a także komunikować się z innymi elementami złożonych struktur (Słyk, 2012).

Rozszerzenie cyfrowe w pierwszej kolejności dotyczyło narzędzi subtraktywnych. Frezarki numeryczne cięły materiały sprawdzone w budownictwie. Dzięki cyfrowym komponentom większość technologicznych procesów zaczęła być kontrolowana zdalnie, a niezbędne ustawienia określano za pomocą programów sterujących. Technologia CNC (*Computer Numerical Control*) zrewolucjonizowała proces fabrykacji w architekturze. Technika

pozwoili na precyzyjne przekształcanie cyfrowych modeli w fizyczne komponenty budowlane. Polega ona na zaprogramowaniu maszyny w sposób, aby realizowała zadane sekwencje ruchów, które są zgodne z wcześniej przygotowanym modelem cyfrowym. Technologie subtraktywne, właśnie takie jak frezowanie CNC czy cięcie laserowe, polegają na usuwaniu materiału z większego bloku w celu uzyskania pożądaney formy. Dzięki temu możliwe jest tworzenie elementów o wysokim stopniu złożoności i precyzji, które są trudne do wykonania tradycyjnymi metodami (Słyk, 2012).

W przeciwieństwie do technologii subtraktywnych, technologie addytywne polegają na dodawaniu materiału. Druk 3D jest najczęściej stosowaną metodą w tej kategorii. Pozwala on na tworzenie obiektów z różnych materiałów – od tworzyw sztucznych, przez metale, aż po materiały kompozytowe. Proces drukowania odbywa się warstwa po warstwie. Ta technologia pozwala na szybkie prototypowanie oraz produkcję na miejscu, co redukuje czas i koszty związane z logistyką (Słyk, 2012).

Natomiast dużym uproszczeniem byłoby powiedzenie, że dzięki komputerom możemy stworzyć dowolną formę. Obiekty geometryczne nie są czymś bezpośrednio zrozumiałym dla maszyn, a jej wytwarzanie polega na dwukrotnym przekształceniu informacji. Pierwszy na poziomie generowania pliku, przykładowo, bryły określone w modelu parametrycznie (np. NURBS) zamieniane są na siatki wielokątów. To projektant decyduje o poziomie uproszczenia krzywizn, ustalając wielkości poszczególnych elementów tej siatki i ich odchyień. Dopiero wtedy model trafia do procesora wydruku, który przekształca go w algorytm i instrukcje sterujące dla maszyny. Problemem cyfrowej fabrykacji w architekturze jest jej skala. Zwykle wykracza ona poza pole robocze maszyny. Aby to rozwiązać, zwykle dzieli się bryłę na mniejsze części, należy wtedy przewidzieć także wymagania montażu, sposób łączenia i kolejność powstawania elementów (Iwamoto, 2009; Słyk, 2012).

Jeśli celem jest wyprodukowanie elementu, który głównie dotyczy powierzchni, to przydatna okazuje się metoda teselacji, w architekturze zwykle przejawia się to jako podział na panele. Podczas teselacji powstaje siatka wielokątów, która reprezentuje powierzchnię obiektu, składa się najczęściej z najprostszych wielokątów, np. trójkątów (triangulacja). Przykładem na jej zastosowanie jest przeszklenie dziedzińca Królowej Elżbiety II w londyńskim British Museum według projektu Foster + Partners (Słyk, 2012).

Realizacja cyfrowego projektu wymaga maszyn zdolnych do odczytania i wykonania cyfrowej instrukcji. Miejsce projektowania i wytwarzania elementów budowli zajęło programowanie procesów jego realizacji.

3.4. Realizacje architektoniczne

Współczesna architektura znajduje się na styku sztuki i technologii, gdzie zaawansowane narzędzia cyfrowe umożliwiają realizację skomplikowanych projektów, które jeszcze kilkadziesiąt lat temu byłyby nie do pomyślenia. Rozdział omówi kilka przykładów znanych realizacji: Opery w Sydney, Muzeum Guggenheima w Bilbao, Kunsthaus w Graz i stacje kolejki linowej w Innsbrucku.

Te przykłady zdefiniowały nowe standardy w architekturze i pokazały jak nowoczesne technologie mogą przekształcać wizję architekta w namacalną rzeczywistość.

3.4.1. Opera w Sydney

Opera w Sydney (rys. 3.11.), zaprojektowana przez duńskiego architekta Jørna Utzona, jest jednym z najbardziej rozpoznawalnych budynków na świecie. Projekt zwyciężył w międzynarodowym konkursie z 1955 roku, od początku przyciągał uwagę swoją formą – łupinami paraboloidalnymi, które miały symbolizować żagle na wodach zatoki. Utzon stworzył wizję budynku wpasowując się w krajobraz portu i stając się jego centralnym elementem (Słyk, 2012).

Realizacja tak ambitnego projektu nie była jednak łatwa. Przekształcenie organicznych, rzeźbiarskich form w struktury budowlane okazało się niezwykle trudnym wyzwaniem. Ówczesne technologie budowlane nie były jeszcze dostatecznie rozwinięte, aby z łatwością zrealizować tak skomplikowany projekt. Proces transformacji projektu koncepcyjnego do formy możliwej do wykonania zajął kilkanaście lat, wymagał opracowania nowatorskich rozwiązań inżynierskich oraz technologicznych (Fromonot, 1998). Jednym z kluczowych problemów była geometria łupin, która musiała zostać precyzyjnie obliczona i zaprojektowana w sposób umożliwiający jej realizację. Zespół inżynierów i projektantów wielokrotnie powracał do rysunków i obliczeń, modyfikując i dostosowując je do realiów budowlanych. Każda zmiana była związana z ryzykiem pod względem technicznym i finansowym. Ostatecznie budowa Opery zakończyła się w 1973 roku, czyli dziesięć lat później niż pierwotnie planowano, a kosztowała kilkunastokrotnie więcej niż zakładano (Słyk, 2012).

Pomimo tych trudności, Opera w Sydney stała się symbolem nowoczesnej architektury, pokazując, że z determinacją i innowacyjnością można zrealizować nawet najbardziej ambitne wizje. Projekt Utzona jest też przykładem na to jak nowoczesne technologie, nawet te będące jeszcze w fazie rozwoju, mogą zostać wykorzystane do stworzenia czegoś unikatowego i ponadczasowego.



Rys. 3.11. Opera w Sydney projektu Jørna Utzona.
Źródło: <https://plndesign.pl/opera-w-sydney-informacje-i-ciekawostki/>

3.4.2. Muzeum Guggenheima w Bilbao

Jeśli Opera w Sydney symbolizuje pionierskie podejście do formy i struktury, to Muzeum Guggenheima w Bilbao (rys. 3.12.), zaprojektowane przez Franka Gehry'ego, reprezentuje kolejny krok w ewolucji architektury – pełne wykorzystanie zaawansowanych technologii cyfrowych do modelowania i realizacji projektu.

Frank Gehry rozpoczął pracę nad projektem Muzeum Guggenheima w 1990 roku, kiedy rząd Kraju Basków postanowił ożywić gospodarczo i kulturalnie Bilbao poprzez inwestycję w nowoczesną architekturę. Gehry, znany z eksperymentowania z formą i materiałem, postawił sobie za cel stworzenie budynku, który nie tylko spełniałby swoją funkcję, ale także stanowiłby dzieło sztuki. Jego wizja zakładała organiczne, płynne formy. Realizacja tak złożonego projektu była możliwa dzięki wykorzystaniu oprogramowania CATIA (*Computer Aided Three-dimensional Interactive Application*), które pierwotnie było rozwijane dla przemysłu lotniczego przez firmę Avions Marcel Dassault. CATIA służyła do rozwiązywania problemów definiowania złożonych kształtów oraz integracji zagadnień modelowania i analizy strukturalnej. Oprogramowanie umożliwiło modelowanie złożonych powierzchni z precyzją do milimetra. Wprowadzono dane dotyczące zdolności zgięcia arkuszy tytanowych o grubości 0,38 mm. Dzięki temu system wizualizował powierzchnie niewymagające gięcia, co poskutkowało optymalizacją kosztów. Większe krzywizny oznaczały większe koszty przygotowania materiału i wykonawstwa (Kolarevic, 2003; Słyk, 2012).

Muzeum Guggenheima w Bilbao zostało otwarte w zaplanowanym terminie w 1997 roku i niemalże natychmiast stało się ikoną współczesnej architektury. Budynek jest dowodem na to jak nowoczesne technologie mogą zrewolucjonizować proces projektowania i realizacji architektonicznej.



Rys. 3.12. Muzeum Guggenheima w Bilbao projektu Franka Gehry'ego.
Źródło: <https://www.guggenheim-bilbao.eus/en/the-building>

3.4.3. Kunsthaus w Graz

Kunsthaus w Graz (rys. 3.13.), znany także jako *Friendly Alien*, to futurystyczna konstrukcja, która wyróżnia się organiczną formą i innowacyjnym wykorzystaniem technologii. Projekt został zrealizowany w 2003 roku i jest przykładem na to jak zaawansowane narzędzia, takie jak CNC (*Computer Numerical Control*), mogą zostać wykorzystane w architekturze do realizacji skomplikowanych form przestrzennych.

Budynek charakteryzuje się unikatową fasadą, złożoną z 1068 paneli szklanych, z których każdy został indywidualnie ukształtowany, aby pasować do organicznej formy. Każdy panel miał wymiary około 2x3 metry i był precyzyjnie formowany w negatywnych kopiach drewnianych, które wcześniej frezowano przy pomocy technologii CNC. Wszystkie magazynowano, aby w razie uszkodzenia bądź zniszczenia któregoś z paneli dało się je odtworzyć. Obłą forma pełni jednak funkcję tylko estetyczną, konstrukcja jest oparta na systemie słupowo-płytowym (wykonanym w żelbecie) zamkniętym wypadkową, wieloboczną powierzchnią (Słyk, 2012).

Choć obiekt wzbudza mieszane emocje wśród jego odbiorców, to sam proces projektowania i realizacji Kunsthausu pokazuje, że technologia CNC może być kluczowym narzędziem w rękach architektów, które pozwala na realizację skomplikowanych projektów.



Rys. 3.13. Widok na Kunsthaus w Graz z lotu ptaka.
Źródło: <https://architectuul.com/architecture/kunsthaus-graz>

3.4.4. Kolejka linowej w Innsbrucku

Stacje kolejki linowej w Innsbrucku (rys. 3.14.), zaprojektowane przez Zahę Hadid, stanowią kolejny przykład zastosowania nowoczesnych technologii w architekturze. Projekt zrealizowano w 2007 roku, wykorzystując technologię NURBS (*Non-Uniform Rational B-Splines*) do modelowania płynnych, organicznych form, które nawiązują do otaczającego krajobrazu alpejskiego.

Forma peronów z ich charakterystycznymi zakrzywionymi dachami nawiązuje do naturalnych form lodowców. Proces realizacji stacji wymagał zastosowania zaawansowanych technologii produkcyjnych, takich jak wspomniane już frezarki CNC, do precyzyjnego formowania elementów stalowych i szklanych. Elementy musiały być dokładnie dopasowane do stalowej konstrukcji. Realizacja zadaszeń odbywała się we współpracy z zespołem Designtoproduction, grupa ta wywodzi się ze środowiska akademickiego ETH Zurich (Słyk, 2012). Filozofia zespołu, wypracowana w eksperymentalnych przedsięwzięciach, określa cztery etapy istotne z punktu widzenia produkcji architektonicznej wspomaganej komputerowo: organizacja, optymalizacja, uproszczenie, materializacja (Sakamoto, 2008).

Obserwacja ewolucji tworzonej geometrii wspomaganej komputerowo skłania do stwierdzeń, że komputeryzacja warsztatu architekta wpłynęła na powstanie nowej klasy obiektów. Oczywiście nie można odmówić komputerom ogromnego wpływu na modelowanie swobodnych form, ale prawdziwy przełom nie dotyczy maszyn, tylko myśli informatycznej (Słyk, 2012).



Rys. 3.14. Stacja kolejki linowej w Innsbrucku projektu Zahy Hadid.

Źródło: <https://www.archdaily.com/885873/zaha-hadid-architects-hungerburgbahn-celebrates-its-10-year-anniversary>

4. ARCHITEKTURA PRZYSZŁOŚCI

4.1. Rozpowszechnienie SI

Filozof Manuel de Landa w swoim wystąpieniu na konferencji *Rethinking the Human in Technology Driven Architecture* nie poświęcił zbyt wiele czasu rozmyślaniom na temat szans ekspansji sztucznej inteligencji, uznał tę rzecz za oczywistą. Pojawia się głębszy problem czy algorytmy będą posiadać taką kreatywność jaką życzyliby sobie architekci. Nasuwają się wątpliwości czy złożoność obiektów architektonicznych pozwoli na całkowitą automatyzację. Zdaniem wspomnianego wcześniej filozofa nie stanowi to dla technologii informacyjnej większego problemu. Wizje odnoszące się do przyszłości architektury przybierają zwykle postać futurystycznych manifestów, jednak pozostają nadal jako niesprawdzone, ale za to zdecydowanie rozbudzają wyobraźnię (Słyk, 2012). Ten podrozdział ma na celu omówienie głównych problemów, które czekają sztukę kreowania przestrzeni w erze zdominowanej przez algorytmy sztucznej inteligencji.

4.1.1. Generatywna SI w 3D

Architektura jako dyscyplina tworzenia przestrzeni, często przyswaja nowe sposoby myślenia o formie z innych dziedzin, a także adaptuje nowe technologie jako narzędzia do modelowania tychże form. Najbardziej znaczące jest wykorzystanie konkretnej klasy głębokich sieci neuronowych, znanych jako generatywne sieci przeciwstawne (GAN), obecnie jedne z najczęściej wykorzystywanych przez architektów. Jednakże, w przeciwieństwie do obfitości, dostępności i łatwości tworzenia zestawów danych 2D, niewielu odważyło się eksperymentować z GAN-ami na zestawach danych 3D. Najczęściej wykorzystanie generatywnej AI w architekturze sprowadza się do wygenerowania obrazu 2D na podstawie *promptu* (polecenia wydanego maszynie). Wynika to głównie z czynników związanych z wyższą złożonością projektowania GAN-ów 3D, większymi trudnościami w kodowaniu geometrii 3D, większym obciążeniem obliczeniowym, dłuższym czasem szkolenia sieci oraz bardziej skomplikowaną implementacją kodu przy użyciu rozproszonego przetwarzania w chmurze (Koh, 2022). Pojawiają się eksperymenty (najczęściej w środowiskach akademickich) z wykorzystaniem sieci GAN w 3D, natomiast ze wszystkich względów wymienionych powyżej nie są one wykorzystywane tak często jak GAN-y w 2D. Natomiast dynamika rozwoju SI jest bardzo silna, można więc pokusić się o stwierdzenie, że w przyszłości generowanie modeli 3D dzięki sieciom GAN może stać się równie dostępne co generowanie treści 2D.

4.1.2. Kreatywność

Jednym z głównych problemów wykorzystania SI w architekturze, który również wzbudza duże emocje, jest kwestia obecnie niemożliwych do uchwycenia przez algorytmy aspektów niesformalizowanych, a więc tych, które są oparte na ludzkim czynniku, takich jak intuicja,

kreatywność i doświadczenie, które są nieodłącznymi elementami w pracy architekta. Kreatywność, będąca jednym z najważniejszych czynników w procesie projektowym, opiera się m.in. na rozumieniu potrzeb społecznych, kulturowych i estetycznych, a także na wykorzystaniu intuicji przy tworzeniu nowych form przestrzennych. Choć SI radzi sobie coraz lepiej z analizą danych, optymalizacją procesów oraz automatyzacją powtarzalnych zadań, to nadal pozostaje ograniczona w zakresie uchwycenia subiektywnych niuansów ludzkiej myśli.

Kreatywność wymaga od projektanta umiejętności balansowania pomiędzy uwarunkowaniami technicznymi a subtelными aspektami związanymi z percepcją, lokalnym kontekstem oraz wartościami kulturowymi. Współczesne algorytmy, choć potrafią skutecznie analizować duże ilości danych, nie są jeszcze w stanie w pełni uchwycić złożonych relacji pomiędzy tymi czynnikami. Mimo że narzędzia do modelowania parametrycznego i generatywnego projektowania umożliwiają automatyzację tworzenia skomplikowanych form, to nadal wymagają one interwencji człowieka w zakresie oceny ich estetyki oraz funkcjonalności w danym kontekście społecznym i kulturowym. Algorytmy SI wspierają architektów w optymalizacji strukturalnej, wydajności energetycznej czy automatyzacji procesów, ale nadal pozostaje wiele nieodkrytych zależności i relacji przestrzennych, które są bardzo istotne w kontekście sukcesu projektowego. Na przykład w projektach urbanistycznych konieczne jest zrozumienie złożonych relacji społecznych, które mogą nie być łatwo mierzalne. Chociaż narzędzia SI pozwalają na symulację ruchu pieszych czy analizę przepływu powietrza, to bardziej subtelne aspekty, takie jak sposób, w jaki użytkownicy odczuwają przestrzeń, są trudne do uchwycenia i zmierzenia. Architekt, korzystając z SI, nadal musi polegać na swojej intuicji i doświadczeniu, aby odkrywać i projektować relacje przestrzenne, które poprawiają jakość życia w danej przestrzeni (Steinfeld, 2022).

Nadal potrzebujemy narzędzia do identyfikacji jakościowych wzorców, które nadają naszym miastom poczucie miejsca. Brakuje narzędzia komputerowego, które uwypuklałoby rozpoznawanie wzorców i świadomość kontekstu (Steinfeld, 2022).

4.1.3. Kryzys klimatyczny

Architektura jako dyscyplina staje przed rosnącym wyzwaniem w obliczu globalnego kryzysu klimatycznego, około 40% emisji gazów cieplarnianych pochodzi ze środowiska zbudowanego. Emisje te są głównie wynikiem energii zużywanej na budowę i eksploatację budynków i mogą się znacznie różnić w zależności od decyzji podejmowanych podczas procesu projektowania: jakie materiały są używane, jak efektywnie są alokowane czy stosowane są pasywne metody itp. Nawet najbardziej podstawowe wybory dotyczące masy budynku, skali, kształtu i elementów składowych mogą mieć duży wpływ na wydajność środowiskową. Do niedawna wpływ klimatyczny takich decyzji projektowych był w dużej mierze ignorowany, zarówno z powodu niedoceniań skali problemu, jak i braku narzędzi do jego pomiaru przez projektantów. Obecnie postępy w dziedzinie informatyki i symulacji otworzyły nowe ścieżki dla architektów do projektowania z danymi, zwłaszcza danymi dotyczącymi wydajności budynków. W rzeczywistości jednak integracja danych z symulacją jest często ograniczona, czasami

sprawdzana tylko do walidacji skomplikowanego projektu, gdy wszystkie główne decyzje zostały już podjęte. Wiele narzędzi do symulacji pozostaje trudnych w integracji i powolnych w działaniu, co zakłóca tempo procesu kreatywnego projektowania (Danhaive i Mueller, 2022).

Ostatnie postępy w dziedzinie sztucznej inteligencji i uczenia maszynowego oferują jednak nowe perspektywy, łącząc moc komputerowego projektowania napędzanego wysoką wydajnością z płynnością i kreatywnością projektowania przez człowieka. Najbardziej przekonujące i wartościowe zastosowania sztucznej inteligencji w architekturze leżą raczej w metodach, w których systemy SI wspierają lub współpracują z ludzką inteligencją. Dążeniem powinno być wykorzystanie zaawansowania w uczeniu maszynowym i sztucznej inteligencji do wzmacniania kreatywności ludzkiej w projektowaniu architektonicznym, a nie do zastąpienia projektantów. Biorąc pod uwagę trwałe wpływy na środowisko zbudowane, nowe narzędzia i podejścia projektowe są potrzebne, aby skierować architektów na lepsze rozwiązania, nie ograniczając ich wyobraźni ani swobody (Danhaive i Mueller, 2022).

4.1.4. Źródła i jakość danych

Choć w najbliższej przyszłości architektura może zacząć coraz bardziej opierać się na narzędziach wspieranych przez sztuczną inteligencję, proces ich adaptacji i integracji w praktyce projektowej wymaga jeszcze zdefiniowania. Kluczowe jest zbadanie i wyjaśnienie sposobów, w jaki algorytmy SI mogą zostać zaadaptowane do praktyk architektonicznych oraz potrzeb projektantów. Ważnym aspektem tego procesu jest także jakość i adekwatność danych, które stanowią podstawę dla modeli wykorzystywanych w architekturze. Wykorzystanie modeli do projektowania nie jest niczym nowym w architekturze, jednak w połączeniu z SI definicja „modelu” zyskuje nowy wymiar. AI wprowadza ewolucję w podejściu do projektowania, w której głębsza analiza matematyczna i logiczna staje się coraz bardziej istotna. Zastosowanie sztucznej inteligencji wymaga nowej refleksji nad rolą modeli w architekturze oraz sposobem ich wykorzystania. Wprowadzenie SI w architekturze stawia nowe wyzwania związane z jakością i interpretacją danych. Sukces technologii SI zależy w dużej mierze od odpowiedniego przetwarzania danych oraz ich adekwatności do potrzeb projektowych. W tym kontekście pojawia się pytanie, jak skutecznie dobrać i przetworzyć dane, aby narzędzia SI odpowiadały rzeczywistym potrzebom architektów. Znalezienie najlepszego sposobu integracji SI z procesem projektowym pozostaje przedmiotem bieżących badań i analiz (Chaillou, 2022).

Każdy, kto pracował z uczeniem maszynowym (*machine learning*, ML), wie, że sukces modelu zależy w dużej mierze od ilości i jakości danych, na których jest oparty. W branży architektonicznej problemem nie jest brak danych, ale ich ogromna liczba oraz różnorodność formatów, które są często niekompatybilne i nieodpowiednie do współczesnych wymagań ML. W praktyce głównym wyzwaniem nie jest to, jak wykorzystać ML w branży budowlanej (*Architecture, Engineering, Construction, Operation* – AECO), ale jak uporządkować przepływ danych, aby był dostosowany do procesów ML (ARD Foster + Partners, 2022).

Przemysł AECO generuje ogromne ilości danych na każdym etapie cyklu życia budynku – od projektowania i budowy, po jego eksploatację. Wraz z rosnącym znaczeniem internetu

rzeczy (*internet of things*, IoT) i inteligentnych budynków, ilość danych dynamicznie wzrasta. Dane mogą obejmować informacje klimatyczne, dane przestrzenne (GIS), obrazy z szybkich szkiców, analizy symulacyjne, modele BIM, logistykę budowy oraz dane z czujników, takich jak czujniki ciepła czy skanery 3D. Aby te dane były użyteczne, muszą zostać znormalizowane. Proces normalizacji prowadzi do tworzenia dużych zbiorów danych, które są kluczowe dla procesu ML. Jednym z wyzwań w tym kontekście jest decyzja, czy korzystać z danych oryginalnych, czy generować dane syntetyczne – te drugie często są stosowane, aby uniknąć problemów z jakością i dostępnością danych rzeczywistych. W architekturze dane syntetyczne mogą pochodzić z modeli parametrycznych lub generatywnych. Mogą one być wystarczająco precyzyjne, aby oddać rzeczywiste warunki środowiskowe. Kolejnym pytaniem jest, jak wykorzystać ogromne zbiory danych, którymi dysponuje branża AECO. Chociaż samo przechowywanie danych stało się stosunkowo proste, to wyzwaniem pozostaje ich analiza oraz przekształcanie w spójne i wartościowe informacje. Aby to osiągnąć, konieczne są specjalne narzędzia i przepływy pracy, które umożliwią efektywne pozyskiwanie, organizowanie i etykietowanie danych. Jednym z rozwiązań może być przetwarzanie danych już w trakcie ich tworzenia. Właściwa strukturyzacja danych powinna zapewniać zarówno bogactwo informacji, jak i ich przystępność dla użytkowników. Jest to szczególnie ważne w kontekście interdyscyplinarności projektów architektonicznych, gdzie różne zespoły muszą mieć dostęp do tych samych danych w adekwatnej formie (ARD Foster + Partners, 2022).

Przemysł AECO historycznie był oporny na zmiany, ale rozwój technologii, takich jak ML, wymusza jego adaptację. Aby w pełni wykorzystać możliwości ML, branża AECO musi przyjąć nowe podejście do zarządzania danymi, w którym odpowiednio zorganizowane dane pozwolą na szybszą realizację projektów oraz ich lepszą jakość. Wprowadzenie ML wymaga budowania ekosystemu, w którym dane są zbierane, przetwarzane i aktualizowane w sposób zintegrowany. Proces ten stanowi jednocześnie szansę i wyzwanie. Sukces zależy nie tylko od ilości danych, ale również od jakości narzędzi do ich przetwarzania oraz gotowości przemysłu do zmiany dotychczasowych praktyk. Ten, kto opanuje te wyzwania, będzie miał przewagę w przyszłości, gdyż "dane to potęga, a ML jest drogą do jej pełnego wykorzystania" (ARD Foster + Partners, 2022).

Mówiąc o pozyskiwaniu danych, nie sposób nie wspomnieć o kwestiach etycznych. Wzrost wykorzystywania sztucznej inteligencji oraz uczenia maszynowego wiąże się z koniecznością gromadzenia ogromnych ilości danych, często obejmujących dane osobowe, przestrzenne, a także dotyczące zachowań użytkowników. Jednym z kluczowych problemów jest zapewnienie prywatności i ochrona danych osobowych. Dane zbierane z systemów IoT, inteligentnych budynków czy mediów społecznościowych mogą być używane do analizy przestrzennej i optymalizacji projektów, jednakże ich nieodpowiednie przetwarzanie może prowadzić do nadużyć, w tym do nieautoryzowanego monitoringu czy profilowania użytkowników (w tym utrwalania szkodliwych wzorców i stereotypów). Kluczowym aspektem etycznym jest zapewnienie przejrzystości w sposobie pozyskiwania danych i ich przetwarzania. Architekci i badacze powinni również brać pod uwagę konsekwencje społeczne swoich działań, zwłaszcza w

kontekście gentryfikacji oraz marginalizacji określonych grup społecznych, które mogą być nieproporcjonalnie dotknięte przez technologie oparte na danych. W tym kontekście odpowiedzialne pozyskiwanie danych powinno stać się wymogiem prawnym i etycznym zobowiązaniem do ochrony praw jednostek i społeczności (Ryan i Gregory, 2019).

4.1.5. Estetyka

Dyskusja na temat estetyki w architekturze często opiera się na pojęciu „stylu”, który z jednej strony jest użytecznym narzędziem w klasyfikacji budynków, z drugiej jednak może prowadzić do nadmiernej formalizacji. Mimo prób odejścia od tego terminu, kategoryzowanie budynków na podstawie cech stylistycznych pozostaje istotnym aspektem badań nad historią i teorią architektury. Wraz z rozwojem technologii sztucznej inteligencji pojawiają się pytania: jaką rolę odgrywa styl w projektowaniu i czy może on zostać uchwycony przez algorytmy (Del Campo i Carlson, 2022)?

W ostatnich latach, postępy w dziedzinie wizji maszynowej, a zwłaszcza w głębokich sieciach neuronowych, zrewolucjonizowały sposób analizowania i rozpoznawania obrazów. Sieci neuronowe są zdolne do przetwarzania ogromnych ilości danych wizualnych, a także do nauki z tych danych, co pozwala im na wyodrębnianie kluczowych cech stylu z obrazów. Jednak sieci te nie uwzględniają kontekstu historycznego, kulturowego czy społecznego, który jest nieodłącznym elementem ludzkiej oceny estetyki. Ich analiza opiera się głównie na statystycznych wzorcach i rozkładach cech wizualnych, co prowadzi do stworzenia nowego rodzaju „stylu” opartego wyłącznie na danych. Estetyka generowana przez algorytmy opiera się na zbiorach danych treningowych, które mogą obejmować historyczne style architektoniczne, elementy geometryczne czy tekstury materiałów. Sieci neuronowe analizują te dane, tworząc nowe, często zaskakujące formy, które nie są bezpośrednią kopią istniejących stylów, ale raczej ich hybrydą lub abstrakcją. Przykładem może być generowanie nowych fasad budynków, które łączą cechy gotyckie z elementami współczesnej architektury parametrycznej. W ten sposób styl przestaje być jedynie historyczną kategorią, a staje się dynamicznym narzędziem w rękach projektantów wykorzystujących SI (Del Campo i Carlson, 2022).

Pozostaje pytanie, w jaki sposób oceniać estetykę tych nowo wygenerowanych form. Czy są one wynikiem twórczego aktu algorytmu, czy jedynie kompilacją danych? Według Demisa Hassabisa, CEO DeepMind, SI może działać w trzech głównych obszarach: interpolacji (łączenie istniejących danych w nowe konfiguracje), ekstrapolacji (przewidywanie nowych wzorców na podstawie danych) oraz wynalazczości (tworzenie zupełnie nowych form). W przypadku architektury, algorytmy są najczęściej wykorzystywane w pierwszych dwóch obszarach, jednak istnieje potencjał do rozwinięcia bardziej zaawansowanych narzędzi, które mogłyby wspierać kreatywność na poziomie projektowania nowych stylów architektonicznych (Del Campo i Carlson, 2022).

Należy jednak zauważyć, że estetyka generowana przez sieci neuronowe nie jest wolna od ograniczeń. Sieci te mogą nie rozumieć intencji projektanta ani nie brać pod uwagę kontekstu społecznego i kulturowego. Wyniki, choć mogą być innowacyjne, często stawiają pytania o ich

autentyczność i znaczenie w szerszym kontekście historii architektury (Del Campo i Carlson, 2022). Przy tej okazji pojawiają się natychmiastowo pytania o kwestie praw autorskich. W przypadku projektów generowanych przy użyciu algorytmów SI, takich jak generatywne projektowanie oparte na danych, powstaje pytanie, kto jest autorem dzieła: algorytm, projektant, czy może właściciel oprogramowania? Problemem jest określenie, w jakim stopniu projektant jest twórcą w sytuacji, gdy korzysta z algorytmu, który automatycznie generuje formy przestrzenne. Do tego dochodzą kwestie licencjonowania oprogramowania oraz pozyskiwania i praw do danych treningowych używanych przez SI. W obliczu tych wyzwań prawnicy i projektanci muszą na nowo zdefiniować granice praw autorskich w kontekście współczesnej architektury wspieranej przez technologie AI.

4.2. Metaverse

Metaverse, pojęcie stworzone przez Neala Stephensona w 1992 roku w powieści science fiction "Snowcrash", zyskuje obecnie coraz większe znaczenie w kontekście rozwoju technologii. Wizja metawersum zakłada powstanie wirtualnej rzeczywistości, która nie tylko imituje, ale i rozszerza doświadczenia znane z realnego świata. W miarę jak technologia ewoluuje, wyobrażenie o metawersum staje się coraz bardziej konkretne, przywołując skojarzenia z filmami takimi jak „Ready Player One” czy „Matrix” (Sun, 2021).

W metawersum potencjalnie można doświadczać niemal wszystkiego, co tylko wyobraźnia może stworzyć, a współczesna myśl technologiczna podkreśla, że *metaverse* powinno mieć charakter otwarty, zdecentralizowany i interoperacyjny, niekontrolowany przez jedną firmę. *Metaverse* zyskuje ogromne znaczenie w branżach technologicznych, takich jak gaming i architektura. Firmy takie jak Roblox i Epic Games kształtują podstawy wirtualnych światów, a wielu pionierów tej technologii podkreśla znaczenie decentralizacji i unikania monopolu korporacyjnych w rozwijaniu tego nowego ekosystemu (Sun, 2021).

Architekci zaczynają dostrzegać potencjał, jaki *metaverse* oferuje dla ich branży. Cyfrowa przestrzeń pozwala na kreację i sprzedaż unikalnych projektów, wspieranych przez technologie *blockchain* oraz NFT (*Non-fungible Tokens*), które zapewniają możliwość posiadania i handlu cyfrowymi aktywami. Przykładem może być artystka z Toronto, Krista Kim, która sprzedała cyfrowy dom wspierany przez NFT za ponad pół miliona dolarów. Wirtualne przestrzenie projektowe umożliwiają także eksperymentowanie z technologiami cyfrowych bliźniaków (*Digital Twin*), które pozwalają na tworzenie interaktywnych replik rzeczywistych obiektów. Autodesk podkreśla, że cyfrowe bliźniaki mogą symulować rzeczywiste właściwości budynków, umożliwiając architektom przewidywanie zachowań konstrukcji w oparciu o rzeczywiste dane oraz scenariusze użytkowania (Sun, 2021).

Rozwój *metaverse* przyczynia się również do powstania nowych modeli gospodarczych, opartych na transakcjach cyfrowych aktywów. Rynek produktów cyfrowych, takich jak sztuka NFT, wzrasta w zawrotnym tempie. Wirtualna nieruchomość sprzedana na platformie Decentraland za 900 000 dolarów stanowi przykład tego, jak wartość wirtualnych aktywów zaczyna rywalizować z rynkiem rzeczywistych nieruchomości. Trend pokazuje, jak nowa, cyfrowa

gospodarka zaczyna zyskiwać na znaczeniu, umożliwiając ludziom inwestowanie i posiadanie aktywów, które istnieją jedynie w wirtualnym świecie (Sun, 2021).

Wirtualne przestrzenie projektowe i narzędzia do modelowania 3D, takie jak Blender, Maya czy Unity, oferują architektom niespotykane wcześniej możliwości kreatywnego wyrażania się oraz współpracy z innymi branżami, takimi jak gaming. Gry takie jak SimCity inspirują architektów do wykorzystania procesów znanych z tworzenia wirtualnych światów w grach do projektowania złożonych środowisk w rzeczywistości. Przenikanie się tych dwóch światów – rzeczywistego i cyfrowego – staje się nieodłącznym elementem nowoczesnej architektury (Sun, 2021).

Rozwój metaverse jest ściśle związany z postępem w XR, a dla tej technologii kluczowym jest zatarcie granic między rzeczywistościami. Lee (2021) uważa, że po okularach XR na rynku pojawią się soczewki kontaktowe XR. Istnieją już prototypy takich rozwiązań i dzięki nim wiemy, że da się w nich zainstalować ekrany i czujniki umożliwiające wyświetlanie napisów i obrazów. Takie soczewki będą potrzebowały zewnętrznego procesora, który można by umieścić w telefonie komórkowym. Lee przewiduje także, że do 2030 r. dobre słuchawki staną się niemal niewidoczne i będą wykorzystywały m.in. przewodnictwo kostne i immersyjną technologię dźwięku. Połączenie tych możliwości zaowocowałoby powstaniem "niewidzialnego smartstreamu", czyli smartfonu przyszłości, który po uruchomieniu wyświetli przed oczami użytkownika wirtualny ekran, który będzie obejmował całe pole widzenia. Sterowanie odbywałoby się za pomocą głosu, gestów i wirtualnej klawiatury. Lee przewiduje rozwój technologii haptycznych, np. rękawiczek i kombinezonów, dzięki którym będziemy mogli odczuwać w niemal fizyczny sposób obiekty wirtualne. Warto także wspomnieć o interfejsie mózg-komputer (BCI, *brain-computer interface*), który wywołuje duże emocje i wątpliwości etyczne. Firma Neuralink należąca do Elona Muska już testuje takie technologie. Natomiast w związku z tym wynalazkiem istnieje wiele problemów, których raczej nie będzie dało się rozwiązać w ciągu kilku kolejnych dekad (Lee, 2021).

W ciągu najbliższych kilku dekad znaczna część obecnej pracy i rozrywki będzie powiązana z technologiami XR i rozwojem metawersum. Wszystkie branże będą się oswajały i zmagaly z tą technologią, tak jak dzieje się to teraz ze sztuczną inteligencją.

4.3. Biomateriały i cyfrowa fabrykacja

W obliczu rosnącej potrzeby zrównoważonego rozwoju i walki z nadmierną eksploatacją zasobów naturalnych, biomateriały oraz cyfrowa fabrykacja odgrywają coraz bardziej kluczową rolę w kształtowaniu przyszłości architektury. Ich znaczenie przejawia się w wymiarze technologicznym oraz w kontekście społecznym i ekologicznym, tworząc nowe możliwości projektowe, jak i wpływając na sposoby produkcji materiałów budowlanych (Tovar, 2023).

Biomateriały, takie jak te pozyskiwane z odpadów organicznych, grzybów czy odpadów rolniczych, oferują przyjazne dla środowiska alternatywy, które wspierają gospodarkę o obiegu zamkniętym. Przykładem zastosowania tego rodzaju rozwiązań jest inicjatywa badawcza "The Wood Project" (rys. 4.1.), której celem było ponowne wykorzystanie trocin z procesu obróbki drewna. Dzięki odpowiedniej technologii oraz wiedzy chemicznej opracowano biokompozyt na

bazie trocin drzewa *tzalam*, charakterystycznego dla regionu Majów w Meksyku. Tego rodzaju działania zmniejszają ilość odpadów oraz promują lokalną tożsamość materiałową, tworząc połączenie między tradycją a nowoczesnością (Tovar, 2023).



Rys. 4.1. Instalacje z biomateriałów wydrukowane w 3D.

Źródło: <https://www.archdaily.com/1004830/digital-fabrication-and-biomaterials-in-architecture-fusing-identity-and-technology>

Cyfrowa fabrykacja, wykorzystująca technologie takie jak druk 3D, odgrywa istotną rolę w procesie projektowania i produkcji biomateriałów. Przejście od procesów produkcji subtraktywnych do addytywnych, jak miało to miejsce w przypadku "The Wood Project", otworzyło nowe perspektywy dla rozwoju architektury. Dzięki cyfrowym narzędziom, możliwe stało się precyzyjne tworzenie form, kontrolowanie parametrów technicznych, takich jak prędkość wytłaczania oraz optymalizacja kształtów pod kątem wytrzymałości i estetyki. Testy różnych geometrii pozwoliły na lepsze zrozumienie właściwości nowo powstałych materiałów, co w efekcie umożliwiło skalowanie procesu produkcji oraz tworzenie modułowych struktur gotowych do dalszego użytku (Tovar, 2023).

Ważnym aspektem cyfrowej fabrykacji i biomateriałów jest ich potencjał w kontekście lokalnym. Inicjatywy takie jak Manufactura, w której współpracowano z lokalnymi warsztatami, pokazują jak innowacje mogą zostać wdrożone w oparciu o lokalne zasoby, wiedzę i tradycję. To podejście wzmacnia lokalną gospodarkę, inspirowane do poszukiwania rozwiązań, które uwzględniają specyficzne potrzeby i warunki środowiskowe danego regionu (Tovar, 2023).

Biomateriały i cyfrowa fabrykacja mają potencjał, aby zmienić współczesne metody produkcji architektonicznej. Stanowią one odpowiedź na wyzwania związane z nadmiernym zużyciem zasobów, problemami środowiskowymi i ekonomicznymi. Biomateriały oraz cyfrowa fabrykacja oferują nowe podejście do projektowania i produkcji w architekturze, które ma na celu innowacyjność, zrównoważony rozwój i dostosowanie do lokalnych warunków. W miarę jak

rozwijają się technologie i powstają kolejne projekty bazujące na cyfrowej fabrykacji i biomateriałach, możemy spodziewać się dalszych przełomów w architekturze (Tovar, 2023).

4.4. Adaptacyjność

Współczesna architektura przechodzi dynamiczną transformację, polegającą na integracji nowych technologii, które umożliwiają budynkom reagowanie na zmieniające się warunki zewnętrzne oraz potrzeby użytkowników w czasie rzeczywistym. Tradycyjne rozumienie architektury jako stałej i niezmiennej struktury jest zastępowane nowym paradygmatem, w którym budynki stają się dynamicznymi, interaktywnymi organizmami, zdolnymi do adaptacji. Adaptacyjna architektura, opierająca się na zaawansowanych technologiach komputerowych, sensorach oraz systemach mechanicznych ma potencjał do dostosowywania swoich form i funkcji oraz do kształtowania przestrzeni w sposób responsywny i inteligentny (Słyk, 2012).

Jednym z ważniejszych przykładów takich rozwiązań jest wieżowiec Lloyd's Bank w Londynie, zaprojektowany przez Richarda Rogersa w 1986 roku, który został uznany za jeden z pierwszych inteligentnych budynków. Jego systemy zarządzania automatycznie sterują windami, diagnozują usterki i wymieniają moduły, demonstrując zdolność budynku do samodzielnego reagowania na różne sytuacje. Przykład ten pokazuje, jak architektura w przyszłości może dostosowywać się do potrzeb użytkowników, minimalizując konieczność interwencji człowieka (Słyk, 2012).

Rozwój adaptacyjnej architektury związany jest również z ideami Kas Oosterhuisa, który wprowadził pojęcie interaktywnej przestrzeni reagującej na bodźce fizyczne. Oosterhuis podkreśla, że architektura przyszłości nie powinna jedynie odpowiadać na zmienne potrzeby użytkowników, ale aktywnie uczestniczyć w ich doświadczeniach. Jego projekty, takie jak „Muscle Body” i „Muscle Tower”, korzystają z siłowników pneumatycznych i czujników, które umożliwiają budynkom zmianę swojej formy pod wpływem takich czynników jak ruch użytkowników, temperatura czy dźwięk (Słyk, 2012).

Jedną z najważniejszych cech adaptacyjnej architektury jest jej zdolność do zapewnienia elastyczności w użytkowaniu przestrzeni. Mobilne konstrukcje z „mięśniowymi szkieletami”, o których wspomina Oosterhuis, mogą dostosowywać swoją formę do bieżących potrzeb użytkowników, np. poprzez zmianę przezroczystości ścian, regulację oświetlenia czy modyfikację kształtu przestrzeni. Dzięki temu budynki mogą stać się bardziej zrównoważone i efektywne energetycznie, minimalizując zużycie energii i zasobów, jednocześnie maksymalizując komfort użytkowników (Słyk, 2012).

W kontekście przyszłości, adaptacyjna architektura otwiera nowe perspektywy dla projektowania środowisk zintegrowanych z naturą i technologią. Włączenie elementów takich jak czujniki, pneumatyczne siłowniki i systemy komputerowe pozwala architektom tworzyć budynki, które reagują na potrzeby człowieka w sposób intuicyjny i automatyczny. W związku z tym, rola architektury przyszłości może być rozumiana nie tylko w kontekście zapewnienia schronienia i funkcji użytkowych, ale także jako aktywnego uczestnika codziennych doświadczeń człowieka (Słyk, 2012).

4.5. Rola architekta

Architekci stoją w obliczu kryzysu tożsamości w dzisiejszym świecie. Kiedyś byli mistrzami budownictwa, posiadającymi ogromną wiedzę techniczną i budowlaną. Współcześnie jednak wiele dziedzin, takich jak konstrukcja czy mechanika, zostało odseparowanych od architektury, a zadania architekta zostały zredukowane głównie do tworzenia koncepcji, wizualizacji, koordynacji oraz przedstawiania projektów. Brakuje technologii, która mogłaby wesprzeć te działania i przywrócić architektom większą kontrolę (Sun, 2021).

Jak zauważa Rem Koolhaas, holenderski architekt, zdobywca nagrody Pritzкера, „Architektura to zawód wymagający ogromnej ilości czasu. Najmniejszy wysiłek architektoniczny zajmuje co najmniej cztery, pięć lub sześć lat, a tempo to jest naprawdę zbyt wolne dla zachodzącej rewolucji” (Sun, 2021).

Współczesna architektura zmierza ku fundamentalnym zmianom, zainicjowanym przez wprowadzenie zaawansowanych technologii, takich jak sztuczna inteligencja. Technologie te odgrywają coraz większą rolę w procesach projektowych i zarządzaniu budynkami, usprawniając pracę architekta, a nawet zmieniając samo rozumienie zawodu. W przyszłości architekt będzie musiał łączyć swoje tradycyjne umiejętności z zarządzaniem technologiami i odpowiedzialnym wykorzystaniem danych (Bernstein, 2022).

Kluczowym elementem przyszłości zawodu architekta jest umiejętność zarządzania i interpretowania danych. Dane stanowią dziś podstawę nowoczesnych narzędzi projektowych, takich jak BIM, a systemy SI oferują nowe perspektywy w analizie oraz przewidywaniu wyników projektowych. Architekt musi rozwijać swoje umiejętności w analizie danych, aby właściwie wykorzystać te informacje w procesie projektowania i rozumieć procesy zachodzące w strukturach algorytmów. Zbieranie, przetwarzanie i interpretacja danych dostarczonych przez platformy cyfrowe będą kluczowe w podejmowaniu decyzji projektowych. Przyszli architekci będą musieli opierać swoje decyzje nie tylko na intuicji, ale także na precyzyjnych analizach dostarczanych przez nowoczesne technologie (Bernstein, 2022).

Wraz z rozwojem technologii pojawiają się nowe wyzwania, w tym odpowiedzialność społeczna i etyczna architekta. Przyszłość projektowania wymaga większego zaangażowania architektów w tworzenie przestrzeni, które spełniają nie tylko estetyczne i funkcjonalne wymagania, ale również rozwiązują problemy społeczne, takie jak nierówności czy dostęp do zasobów. Odpowiedzialność za zarządzanie danymi oraz krytyczna analiza wyników dostarczanych przez SI staną się fundamentem pracy architekta przyszłości (Bernstein, 2022).

Mimo że nowe narzędzia mają ogromny potencjał, to architekt musi pełnić rolę „zarządcy” tych technologii, nie pozwalając, by zastąpiły one jego intuicję i kreatywność. Sztuczna inteligencja powinna wspierać procesy projektowe poprzez analizę danych i przewidywanie możliwych scenariuszy, ale to człowiek będzie odpowiedzialny za ostateczne decyzje. Technologia ma być wsparciem, a nie zastępstwem dla człowieka (Bernstein, 2022).

5. PODSUMOWANIE

Rozwój technologii cyfrowych i algorytmów ma głęboki wpływ na architekturę, zmieniając zarówno sposób projektowania, jak i interakcji między budynkiem a jego użytkownikiem. Algorytmy pozwalają na optymalizację procesów i zmieniają sposób w jaki rozumiemy architekturę w ogóle. Dawniej projektowanie architektoniczne opierało się głównie na intuicyjnym podejściu, polegającym na ręcznych obliczeniach i projektach tworzonych na papierze. Współcześnie zdecydowana większość procesu projektowego odbywa się za pośrednictwem cyfrowych metod. Komputeryzacja zupełnie zmieniła perspektywę rozwoju. Dzięki niej pojawiły się szanse na realizację koncepcji, które pozostawały dotychczas czysto teoretyczne.

Współczesna architektura informacyjna otwiera drzwi do nowych form interakcji między przestrzenią a jej użytkownikiem. Użytkownicy mogą teraz wchodzić w interakcje z architekturą na zupełnie nowym poziomie, co Słyk (2012) porównuje do „surfowania w Internecie”. Przestrzeń staje się dynamiczna i dostosowuje się do potrzeb użytkowników dzięki zastosowaniu sensorów, technologii wirtualnej rzeczywistości oraz dostępu do sieci. Przykłady takie jak inteligentne budynki czy przestrzenie publiczne, które automatycznie dostosowują oświetlenie, temperaturę czy dźwięk w zależności od liczby osób i ich aktywności, pokazują jak dogłębnie technologie wnikają we współczesną architekturę. Budynki oraz inne formy architektoniczne przestają być jedynie statycznymi obiektami, stają się adaptacyjne, interaktywne i „uczące się”. Współczesne społeczeństwa coraz bardziej potrzebują przestrzeni, które są w stanie dostosować się do ich zmieniających się potrzeb, a architektura informacyjna oferuje takie możliwości.

Zmienia się także rola architekta. Tradycyjny projektant, który pracował przy deskach kreślarskich, ustępuje miejsca architektowi, który musi być jednocześnie programistą, projektantem systemów i menedżerem danych. Narzędzia cyfrowe pozwalają na większą swobodę kreacji i wprowadzają nowe wyzwania w zakresie zarządzania informacją i danymi. W parze z szansami związanymi z nowymi technologiami idą także ryzyka i wyzwania, które wymagają uwagi. Jednym z głównych zagrożeń jest nadmierna zależność od technologii, która może doprowadzić do dehumanizacji procesu projektowego i użytkowania przestrzeni. W miarę jak architektura staje się coraz bardziej oparta na algorytmach i systemach cyfrowych, istnieje ryzyko, że tradycyjna intuicja i zmysł estetyczny, które od wieków stanowiły fundament projektowania, zostaną zepchnięte na dalszy plan. Ponadto, algorytmy projektowe mogą ograniczać kreatywność, wprowadzając standaryzację i optymalizację kosztem unikalności i ekspresji artystycznej. Wzrasta ryzyko związane z prywatnością i bezpieczeństwem, zwłaszcza w przypadku inteligentnych budynków, które zbierają dane o użytkownikach. Niekontrolowana automatyzacja w architekturze może prowadzić do alienacji użytkowników, którzy mogą czuć się wyobcowani w przestrzeniach, nad którymi mają minimalną kontrolę, co zagraża ludzkiemu wymiarowi architektury. Do tego pakietu można dodać kwestię praw autorskich przy trenowaniu algorytmów SI i aspekty etyczne związane z odpowiedzialnością za błąd maszyny bądź algorytmu. Z tymi problemami już mamy do czynienia, a bardzo prawdopodobnym jest, że w następnych latach będą one się nasilać.

Podsumowując, nowoczesne technologie w architekturze rewolucjonizują sposób, w jaki postrzegamy i tworzymy przestrzeń. Algorytmy stały się nieodłącznym elementem procesu projektowego, umożliwiając bardziej złożone formy architektury. Ich rola będzie nadal rosła w przyszłości, prowadząc do jeszcze większej integracji technologii z naszym otoczeniem, co może całkowicie zmienić nasze podejście do projektowania i korzystania z przestrzeni. Architekci powinni zrozumieć, że algorytmy nie są jedynie narzędziami ułatwiającymi proces projektowy, ale stanowią jeden z najistotniejszych elementów umożliwiających tworzenie nowoczesnych form przestrzennych dostosowanych do zmieniających się potrzeb społeczeństwa.

Całość dobrze podsumowuje wypowiedź architekta Jana Słyka (2012): "Informatyzacja zwiększa zakres osobistej swobody. Decentralizuje. Umożliwia automatyczną produkcję indywidualizowanych przedmiotów. Architekt zanurzony w informacyjnej sieci globalnych powiązań przestaje kontrolować utrwalane w tektonicznym sensie detale. Mimo to jego odpowiedzialność rośnie. Dotyczy zagadnień znajdujących się o szczebel wyżej w hierarchii - programowania procesu wielowarstwowej kreacji, budowania, eksploatacji. W każdym z tych działań pozostawia autor twórczy ślad. W każdym musi zadbać o harmonię skutków, trwałość, użyteczność i piękno".

CZĘŚĆ II. UWARUNKOWANIA PROJEKTOWE

6. PROJEKTOWANA FUNKCJA I LOKALIZACJA

6.1. Idea projektowa

Punktem wyjściowym do koncepcji projektowej stało się hasło „proces”, które także zostało symboliczną nazwą obiektu. Projektowany budynek ma być żywym laboratorium, w którym procesy związane z edukacją, działalnością badawczą i twórczą splatają się z procesami projektowania i wytwarzania. Hasło może być interpretowane na różne sposoby, z jednej strony jako ciągła droga, otwarta i iteracyjna, z drugiej jako narzędzie badawcze i kreatywne, które pozwala na generowanie przestrzeni nowych jakości. Warto dodać, że coraz częściej można spotkać się ze stwierdzeniami, że architekci w przyszłości przestaną być projektantami docelowych form, a staną się projektantami procesów, które te formy będą tworzyć.

Jednym z kluczowych aspektów koncepcji jest wykorzystanie technologii cyfrowych w projektowaniu architektury. Początkowa faza projektu twórczego została oparta na narzędziach parametrycznych i generatywnych, w tym na algorytmach genetycznych, które umożliwiły eksplorację różnych wariantów i ich optymalizację. Głównym elementem badań projektowych była optymalizacja układu brył budynku, ich orientacji i rozmieszczenia na działce w odniesieniu do czynników środowiskowych, w tym przypadku skupiając się na nasłonecznieniu i energochłonności. Takie podejście pozwala na wyjście poza tradycyjny sposób kształtowania architektury, otwierając pole do eksperymentowania z różnymi wariantami. Końcowy projekt jest także zapisem iteracyjnego procesu poszukiwania optymalnej formy.

Celem projektowanego budynku było także wyjście poza bazową grupę docelową, którą stanowią studenci i kadra akademicka. Dzięki wprowadzeniu otwartych przestrzeni wspólnych, takich jak zielone tarasy, parter o półpublicznym charakterze i przestrzenie rekreacyjne wokół budynku sprzyjające spotkaniom, budynek wpisuje się w tkankę społeczną kampusu i miasta. „Proces” staje się miejscem spotkań i wymiany wiedzy, w którym możliwe jest organizowanie warsztatów, wystaw, hackathonów czy wydarzeń kulturalnych, które mają na celu integrację społeczności akademickiej i lokalnej. Budynek staje się mostem między środowiskiem akademickim a mieszkańcami miasta.

Modułowość konstrukcji również odzwierciedla hasło „proces”, układ może być rozwijany i modyfikowany w czasie. Zdolność adaptacji obiektu była jednym z głównych założeń projektowych, wpływają na to środki architektoniczne takie jak kinetyczna fasada i ruchome ściany wewnątrz. Symbolicznym wyrazem formy stało się zastosowanie kształtów owalnych, których celem jest upłynnienie i wprowadzenie organiczności w kontrze do ortogonalnego układu modułów.

Całość idei projektowej łączy wątki części teoretycznej i badawczej pracy. „Proces” jest obrazem metod projektowania wspomaganego cyfrowo, jednocześnie będąc realną propozycją przestrzeni dydaktyczno-badawczej, która ma za zadanie inspirować studentów architektury. To miejsce, w którym eksperyment, iteracja i poszukiwanie nowych form są naturalnym elementem edukacji.

6.2. Funkcja

Projektowany obiekt pełni funkcję dydaktyczną i badawczą, dedykowany Wydziałowi Architektury Politechniki Gdańskiej. W budynku znajdują się takie przestrzenie jak audytorium, strefy pracy, makiecie, pracownia rzeźby, pomieszczenia dla kół naukowych, biblioteka, laboratorium robotyczne, druku 3D i VR, a także kawiarnia, hol przeznaczony do różnych wydarzeń jak wystawy i warsztaty, a także zielone tarasy z miejscami rekreacji. Obecność tych funkcji ma wprowadzać nową jakość edukacji architektonicznej, która zakłada bezpośredni kontakt studentów i badaczy z narzędziami kształtującymi przyszłość zawodu.

6.4. Lokalizacja

Projektowany budynek dydaktyczno-badawczy znajduje się w bezpośrednim sąsiedztwie kampusu Politechniki Gdańskiej, w dzielnicy Wrzeszcz Górny. Działka³¹ usytuowana jest na skrzyżowaniu ulic Fiszera, Brackiej, Siedlickiej oraz Łukasiewicza, na zakończeniu osi ulicy Siedlickiej. Lokalizacja ta pełni istotną rolę w kompozycji urbanistycznej kampusu, zamyka perspektywę jednej z głównych dróg dojazdowych i jednocześnie otwiera przestrzeń w stronę kompleksu akademickiego. Obecnie teren zajmuje zamknięty parking przeznaczony dla pracowników i gości uczelni. Funkcja, mimo że praktyczna, nie wykorzystuje w pełni potencjału przestrzennego oraz reprezentacyjnego działki. Z uwagi na położenie względem kampusu i bliskie sąsiedztwo najważniejszych obiektów dydaktycznych, miejsce to stwarza wyjątkową okazję do realizacji nowego budynku akademickiego, odpowiadającego współczesnym potrzebom dydaktyki, badań i integracji społeczności.

W kontekście architektonicznym lokalizacja charakteryzuje się zróżnicowanym otoczeniem. Od strony południowo-wschodniej znajdują się historyczne zabudowania kampusu. W bezpośrednim sąsiedztwie południowym dominują nowsze obiekty, takie jak budynki Centrum Nanotechnologii B oraz Centrum Ekoinnowacji. Działka stanowi styk różnych epok i stylów architektonicznych, co generuje szczególne wyzwanie projektowe.

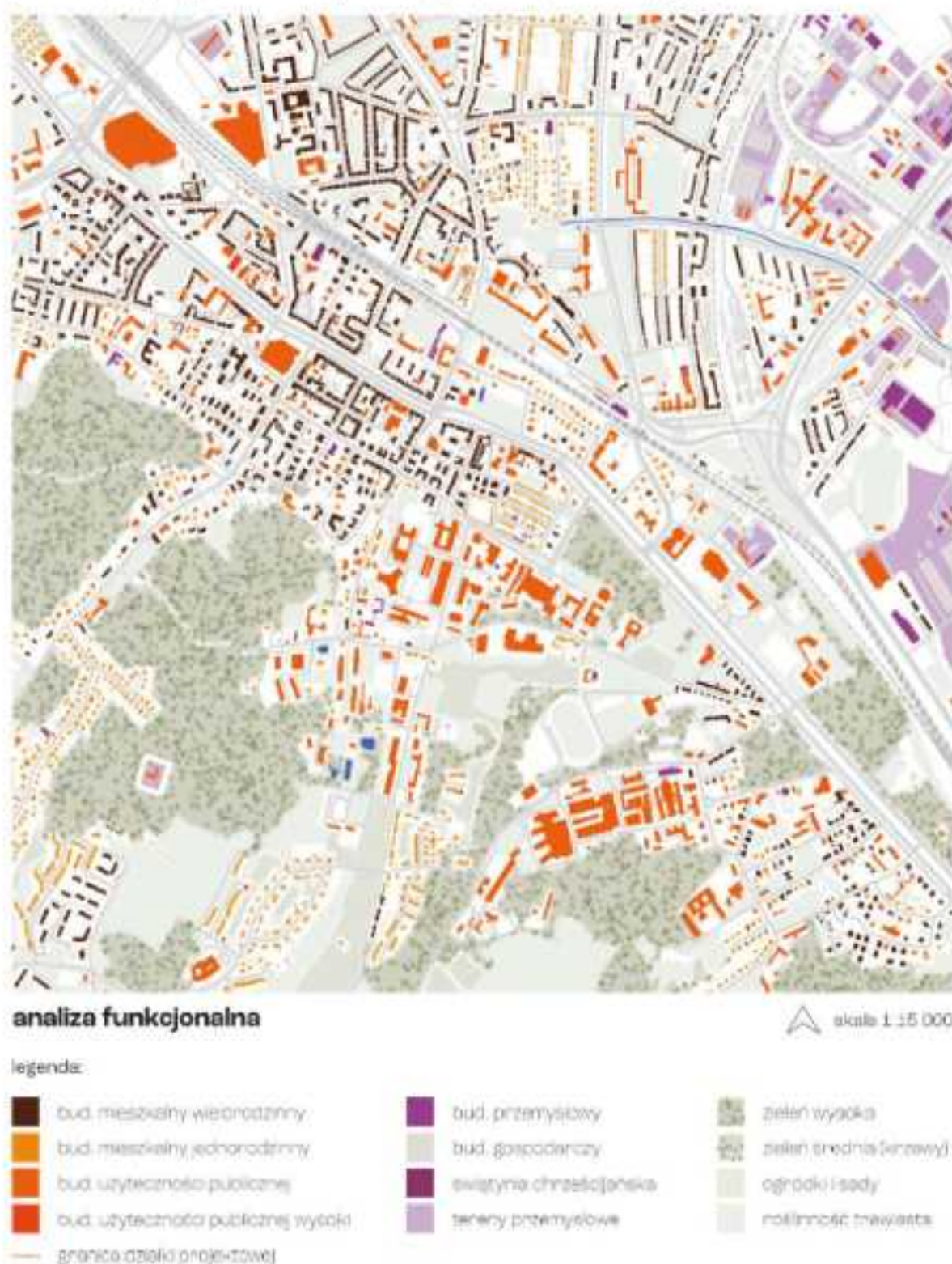
Pod względem komunikacyjnym teren jest dobrze powiązany zarówno z układem drogowym Wrzeszcza, jak i wewnętrznymi trasami pieszymi kampusu. Natomiast poprzez lokalizację na obrzeżu kampusu, obiekt może pełnić rolę wprowadzającą w strukturę politechnicznego kompleksu. W ujęciu symbolicznym i kompozycyjnym budynek ma szansę stać się nowym elementem tożsamości kampusu. Jego lokalizacja, m.in. naprzeciwko Audytorium Novum pozwala na dialog między tradycją a nowoczesnością.

³¹ Na obszar projektowy składają się dwie działki o numerach: 529 i 530/1 we Wrzeszczu Górnym. Teren w momencie procesu projektowego nie był objęty miejscowym planem zagospodarowania przestrzennego, trwają prace nad planem ogólnym gminy, źródło: <https://geogdansk.pl/app/pl/>.

7. KONTEKST PRZESTRZENNY

7.1. Analiza funkcjonalna

Analiza funkcjonalna (rys. 7.1) stanowi ważny etap procesu projektowego, pozwalający na rozpoznanie i ocenę struktury przestrzennej. Opracowanie zostało wykonane w granicach obejmujących promień ok. 1 km od projektowanej działki. Na analizowanym obszarze dominuje zabudowa mieszkaniowa, jednorodzinna i wielorodzinna. Znaczną rolę odgrywa **zabudowa użyteczności publicznej**. We wschodniej części opracowanego terenu zlokalizowane są tereny przemysłowe, obejmujące zakłady produkcyjne, składy i obiekty gospodarcze.



Rys. 7.1. Analiza funkcjonalna w promieniu ok. 1 km od projektowanej działki.

Analiza wykazała znaczący udział terenów zielonych, które pełnią ważną rolę ekologiczną i rekreacyjną. Zieleni wysoka w postaci parków i kompleksów leśnych dominuje

w południowo-zachodniej części opracowania. Zieleń średnia i niska pełni funkcje uzupełniające i rekreacyjne w obrębie osiedli.

Omawiany fragment miasta cechuje się dużym zróżnicowaniem funkcjonalnym. Występuje intensywna zabudowa mieszkaniowa i usługowa, jak i tereny zielone oraz przemysłowe. Taki układ stwarza potencjał dla lokalizacji obiektów o funkcji społecznej i edukacyjnej, które mogą pełnić rolę mediatora pomiędzy różnymi tkankami miasta.

7.2. Analiza wysokości zabudowy

Analiza (rys. 7.2.) wskazuje, że zabudowa niska, obejmująca 1-3 kondygnacje, stanowi największy procent i skupia w sobie głównie budynki jednorodzinne oraz niższe obiekty usługowe. Koncentruje się na obrzeżach opracowania, w szczególności w jego południowej i południowo-zachodniej części. Kolejną kategorię stanowi zabudowa średniowysoka, licząca od 4 do 7 kondygnacji, która zlokalizowana jest głównie w centralnych kwartałach oraz wzdłuż głównych ciągów komunikacyjnych, tworząc zwartą tkankę miejską. Najmniejszy udział stanowi zabudowa wysoka, przekraczająca 8 kondygnacji, która pojawia się punktowo jako dominanty przestrzenne. Obiekty te usytuowane są przede wszystkim wzdłuż głównych tras oraz w rejonach o bardziej intensywnej zabudowie, podkreślając znaczenie kluczowych węzłów urbanistycznych.



Rys. 7.2. Analiza wysokości zabudowy w promieniu ok. 1 km od projektowanej działki.

7.3. Analiza komunikacji kołowej i torowej

Na obszarze opracowania (rys. 7.3.) występuje zróżnicowana hierarchia dróg. Główne powiązania tworzą drogi ruchu przyspieszonego, przebiegające przez wschodnią część terenu i zapewniające połączenie z innymi dzielnicami miasta. Drogi główne przecinają centralną część obszaru, stanowiąc podstawowy układ komunikacyjny. Sieć uzupełniają drogi zbiorcze i lokalne, rozprowadzające ruch w głąb kwartałów zabudowy mieszkaniowej.



Rys. 7.3. Analiza komunikacji kołowej i torowej w promieniu ok. 1 km od projektowanej działki.

W strukturze widoczna jest także infrastruktura kolejowa, jej obecność kolei stanowi istotny element systemu transportowego, umożliwiając powiązania pasażerskie i towarowe.

7.4. Analiza komunikacji pieszej

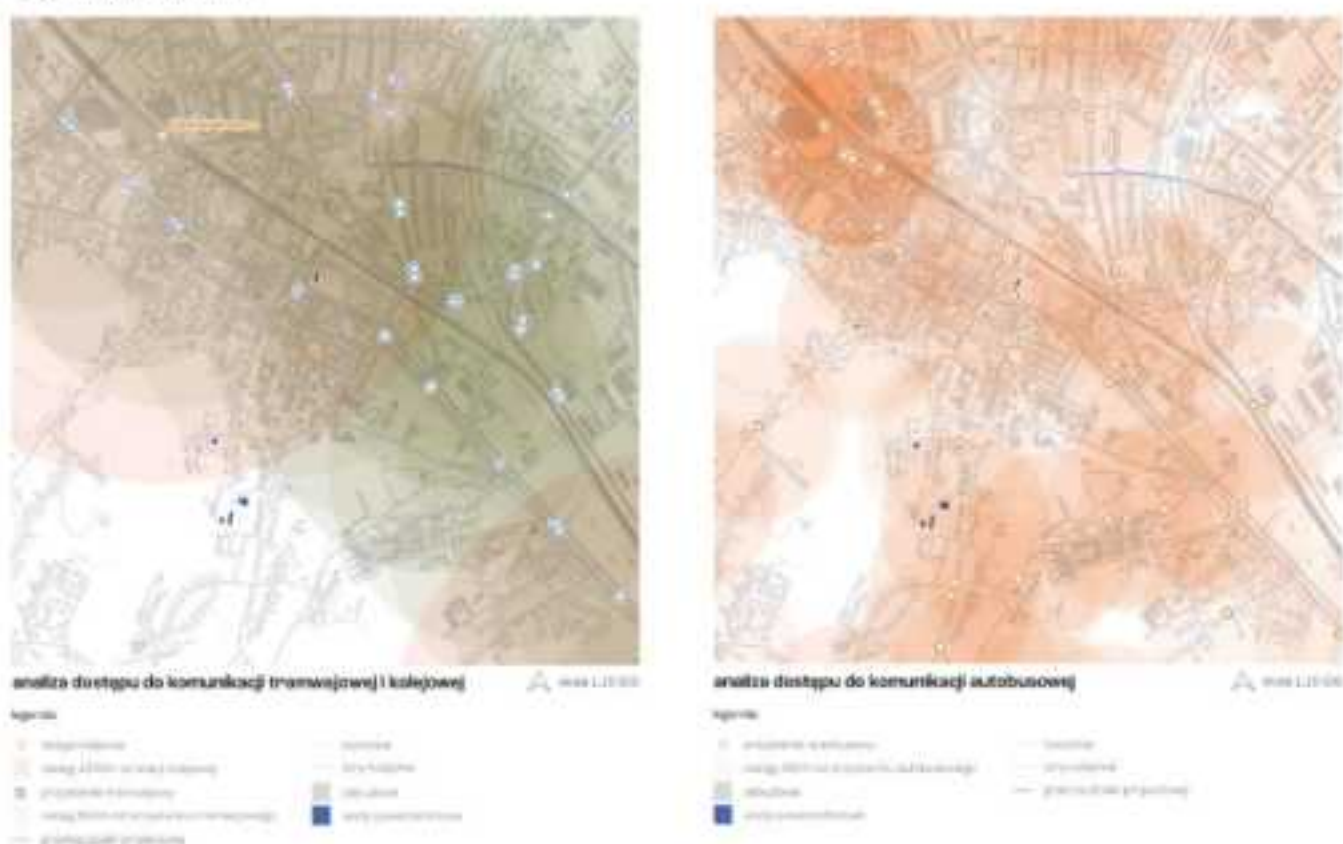
Na obszarze opracowania (rys. 7.4.) widoczna jest rozbudowana sieć ciągów pieszych powiązana z układem drogowym. Przejścia dla pieszych występują głównie wzdłuż dróg głównych i zbiorczych, koncentrując się przy skrzyżowaniach i węzłach komunikacyjnych. Tworzą one podstawowy system łączący kwartały zabudowy mieszkaniowej z usługami i przystankami transportu publicznego.



Rys. 7.4. Analiza komunikacji pieszej w promieniu ok. 1 km od projektowanej działki.

7.5. Transport publiczny

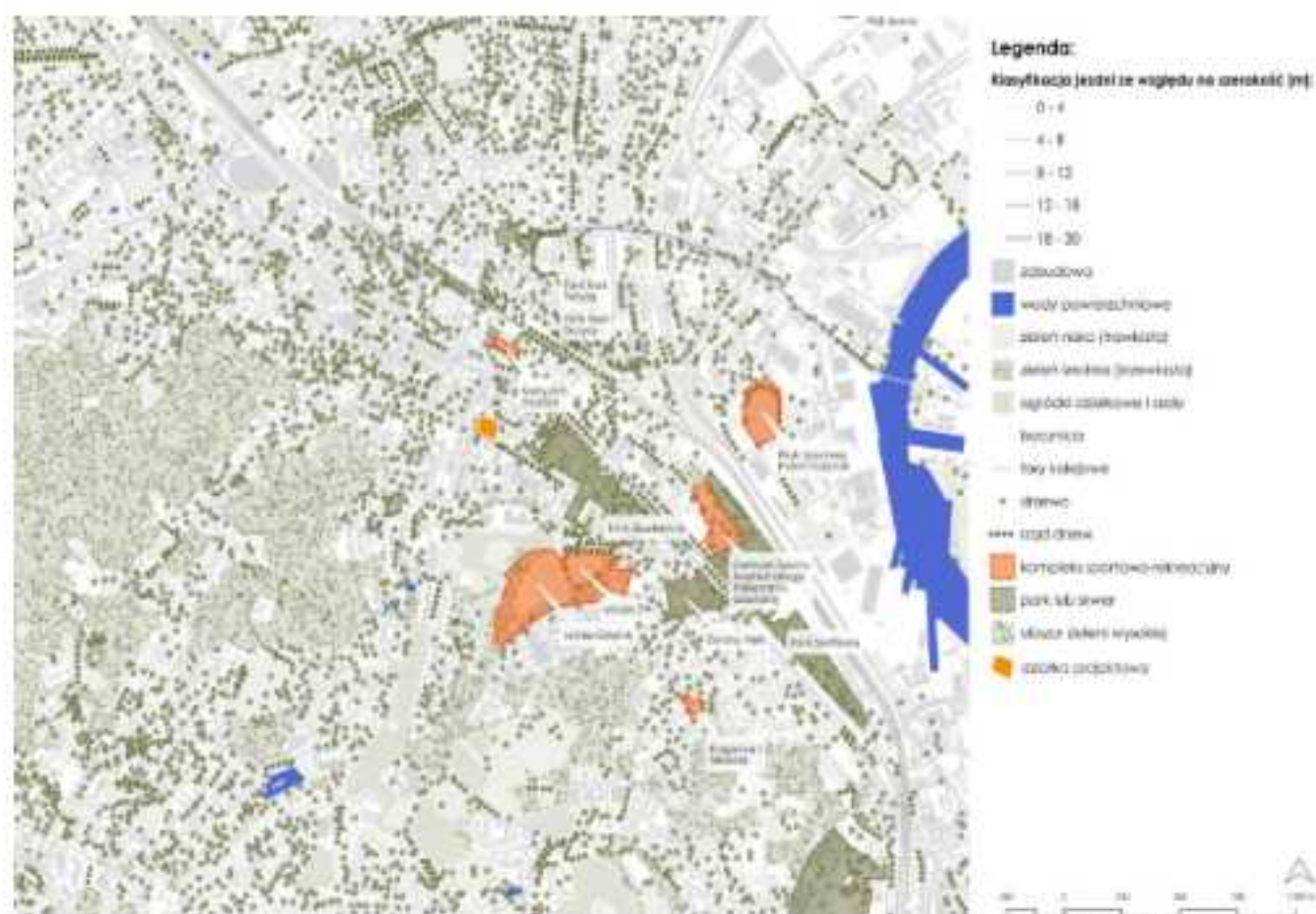
Na obszarze opracowania (rys. 7.5.) występuje rozbudowany system transportu publicznego obejmujący kolej, tramwaje i autobusy. Transport kolejowy reprezentowany jest przez stację Gdańsk Wrzeszcz, której zasięg dostępności pieszej wynosi około 1500 m. Stanowi główny węzeł przesiadkowy, łączący lokalne i regionalne kierunki. Transport tramwajowy obsługiwany jest przez liczne przystanki rozmieszczone wzdłuż głównych ulic, a ich standardowy zasięg pieszy obejmuje około 800 m. Gęstość sieci tramwajowej zapewnia dostępność centralnych kwartałów zabudowy oraz powiązanie z sąsiednimi dzielnicami. Transport autobusowy uzupełnia sieć komunikacji, z przystankami rozlokowanymi równomiernie w obrębie całego terenu. Zasięg pieszy wynosi około 400 m, co pozwala na obsługę obszarów mieszkaniowych położonych dalej od linii tramwajowych i stacji kolejowej. Układ transportu publicznego zapewnia spójne powiązania wewnętrzne oraz dobre skomunikowanie z innymi częściami miasta.



Rys. 7.5. Analiza transportu publicznego w promieniu ok. 1 km od projektowanej działki. Od lewej dostępność do przystanków autobusowych, po prawej dostępność do przystanków tramwajowych i kolei.

7.6. Obiekty przyrodnicze

W obrębie opracowania (rys. 7.6) znajduje się rozbudowany system zieleni, obejmujący parki, skwery, ogrody działkowe oraz zielenią wysoką w postaci kompleksów leśnych. Istotną rolę odgrywa Trójmiejski Park Krajobrazowy, którego granica styka się z obszarem od strony południowo-zachodniej. W strukturze zieleni znajdują się także tereny sportowo-rekreacyjne, parki miejskie oraz rozproszone układy drzew i szpalery. Na analizowanym terenie występują również pomniki przyrody w postaci pojedynczych drzew, zlokalizowane głównie w rejonach parkowych i osiedlowych, ich obecność wzmacnia walory przyrodnicze. Układ zieleni zapewnia powiązania ekologiczne i rekreacyjne, podnosząc dostępność terenów wypoczynkowych w skali obszaru.



Rys. 7.6. Analiza terenów zielonych w promieniu ok. 1 km od projektowanej działki.

7.7. Dostęp do rekreacji

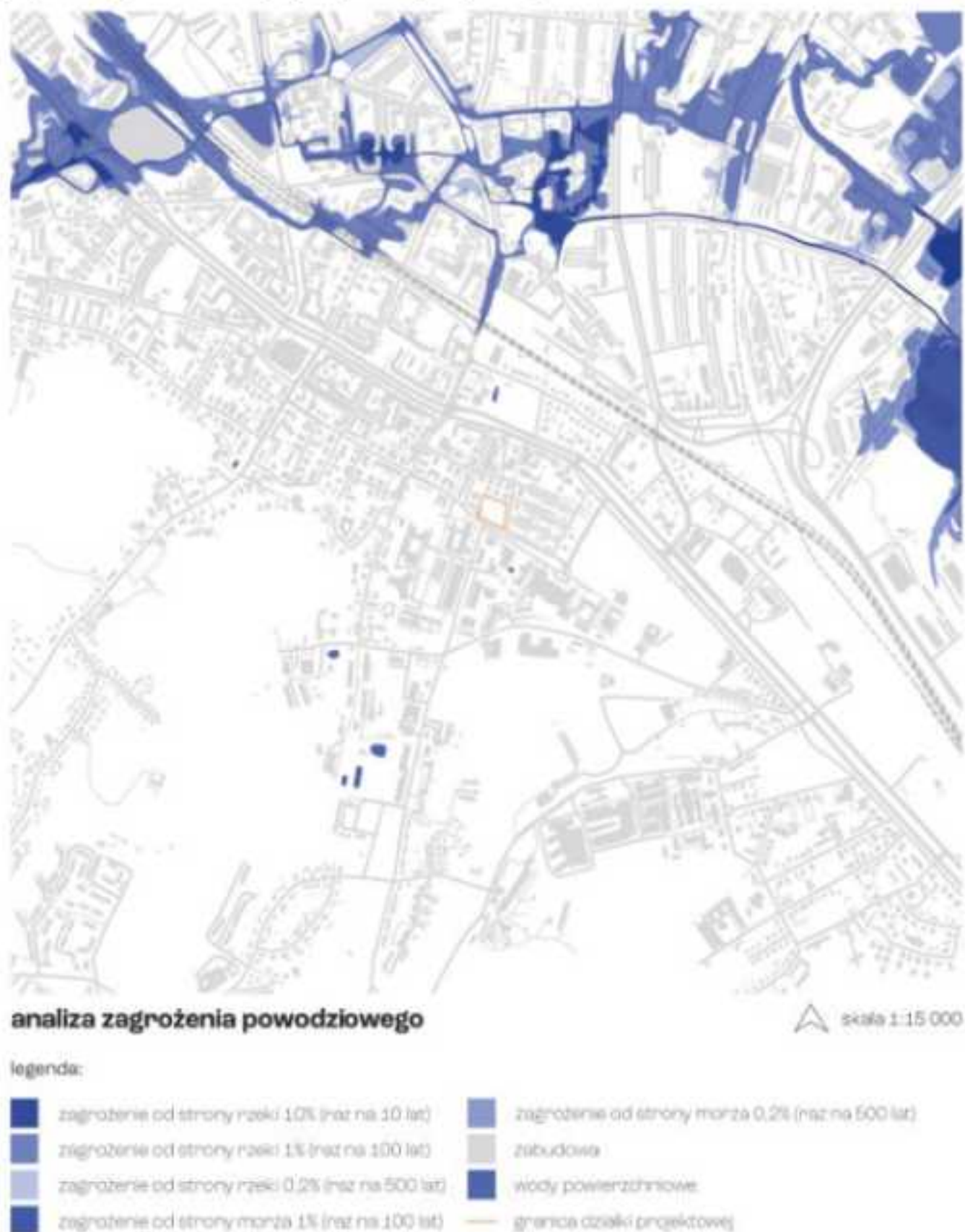
W granicach opracowania (rys. 7.7) dostępność do terenów rekreacyjnych kształtowana jest przez parki miejskie, skwery oraz kompleksy sportowo-rekreacyjne. Najbliżej działki znajduje się Park Akademicki. Dodatkowo na obszarze znajdują się obiekty sportowe. Zasięgi piesze wskazują, że większość analizowanego obszaru mieści się w odległości 600 m od parków i 1000 m od terenów sportowych. Taki układ zapewnia mieszkańcom szeroki dostęp do przestrzeni wypoczynkowych i sportowych, a także powiązania z Trójmiejskim Parkiem Krajobrazowym.



Rys. 7.7. Analiza dostępu do rekreacji w promieniu ok. 1 km od projektowanej działki.

7.8. Zagrożenie powodziowe

Obszar opracowania (rys.7.8.) znajduje się w zasięgu potencjalnych zagrożeń powodziowych związanych zarówno z rzeką, jak i z morzem. Strefy zalewowe obejmują głównie tereny wzdłuż koryta rzecznego, gdzie ryzyko wystąpienia powodzi wynosi od 10% (raz na 10 lat) do 0,2% (raz na 500 lat). Dodatkowo część wschodnia obszaru, w sąsiedztwie terenów nadrzecznych i portowych, objęta jest ryzykiem zalania od strony morza. Zasięgi te odpowiadają prawdopodobieństwu od 1% (raz na 100 lat) do 0,2% (raz na 500 lat). Układ zagrożeń wskazuje, że najbardziej narażone są tereny położone wzdłuż rzeki i wschodnia część opracowania. Działka projektowa jednak nie znajduje się w obrębie tych zagrożeń.



Rys. 7.8. Analiza zagrożenia powodziowego w promieniu ok. 1 km od projektowanej działki.

7.9. Analiza kampusu Politechniki Gdańskiej

Kampus Politechniki Gdańskiej zlokalizowany jest w dzielnicy Wrzeszcz. Główna oś kompozycyjna kampusu przebiega przez ul. Narutowicza, prowadząc do Gmachu Głównego, który pełni rolę dominanty przestrzennej i symbolicznej. Zespół budynków kampusowych rozwijał się etapami, co skutkuje różnorodnością stylistyczną i funkcjonalną zabudowy (Szczepański, 2019).

Na terenie kampusu znajdują się budynki dydaktyczne, laboratoryjne, administracyjne, akademiki, obiekty sportowe i rekreacyjne oraz przestrzenie zielone. Funkcje akademickie koncentrują się w części północnej i centralnej, natomiast zaplecze mieszkaniowe i sportowe ulokowane jest w południowej części kampusu. Taki układ umożliwia wyraźny podział na strefy intensywnej aktywności edukacyjnej i te wspierające funkcje codziennego życia studentów. Kampus charakteryzuje się różnorodnością wysokości zabudowy. Historyczna zabudowa z czerwonej cegły, wpisana do rejestru zabytków, współistnieje z nowoczesnymi budynkami. Istotnym elementem jest zielen, szczególnie Park Akademicki, który pełni funkcję rekreacyjną (Szczepański, 2019).

Kampus posiada dobrze rozwinięty system komunikacji pieszej, rowerowej i samochodowej. Położenie w sąsiedztwie stacji kolejowej Gdańsk Wrzeszcz oraz linii tramwajowych i autobusowych zapewnia dostępność z poziomu całego Trójmiasta. Główne ciągi piesze prowadzą do Gmachu Głównego i są powiązane z przestrzeniami publicznymi kampusu, tworząc czytelny układ orientacyjny. Natomiast układ i forma tych przestrzeni publicznych mogłyby być lepiej rozwinięte. Brakuje otwartych przestrzeni integrujących użytkowników uczelni. Większość terenów zielonych ma charakter przejściowy, a nie miejsc spotkań czy aktywności społecznych. W rezultacie kampus funkcjonuje bardziej jako zespół budynków powiązanych komunikacyjnie niż jako spójna przestrzeń publiczna wspierająca interakcje akademickie i społeczne. To ograniczenie wskazuje na potrzebę tworzenia nowych przestrzeni wspólnych o charakterze integracyjnym, które mogłyby zwiększyć atrakcyjność i funkcjonalność kampusu.

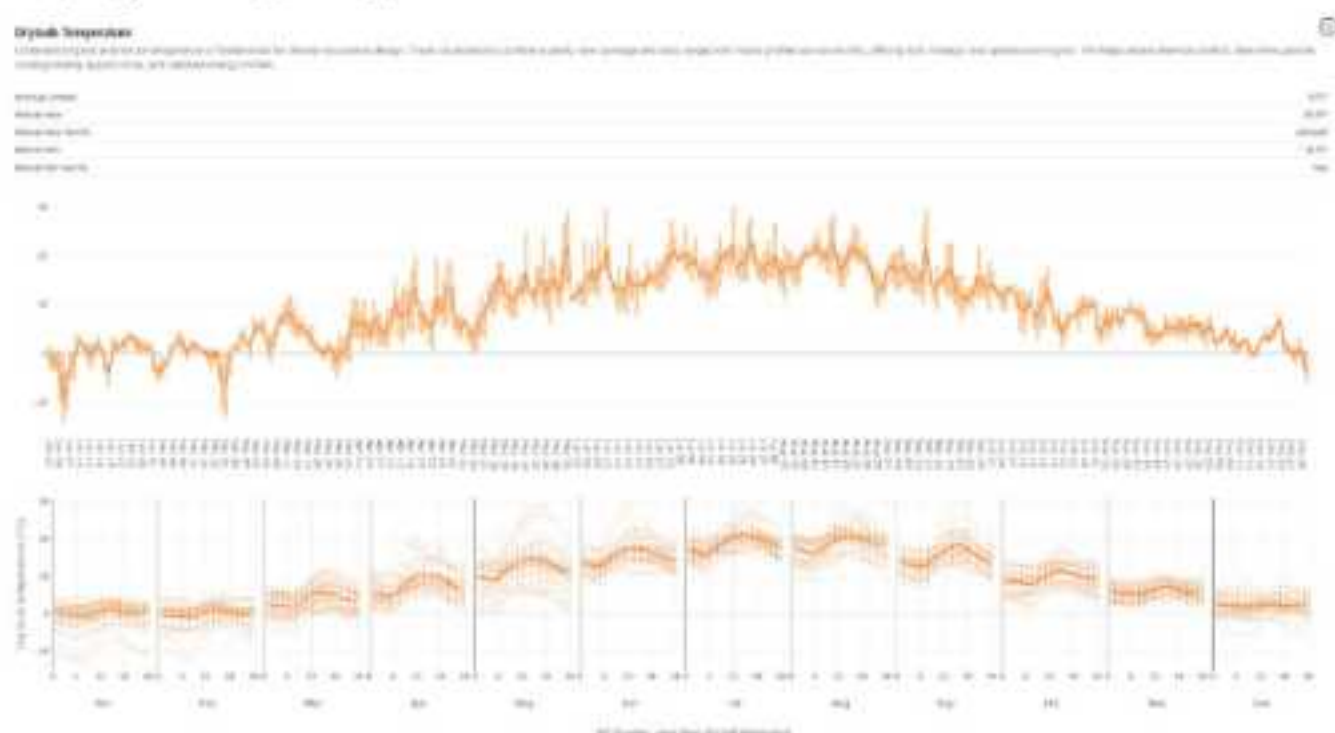
Politechnika Gdańska pełni rolę ośrodka naukowego, przestrzeni kulturowej i integracyjnej. Organizowane są tu wydarzenia akademickie, kulturalne i sportowe. Historyczna architektura i tradycja uczelni wzmacniają jej tożsamość i znaczenie w przestrzeni Gdańska.

8. KLIMAT

W niniejszym rozdziale przedstawiono zestawienia i wykresy obrazujące charakterystykę klimatu Gdańska, które stały się podstawą do dalszych analiz optymalizacyjnych i decyzji projektowych. Analiza klimatu stanowi ważny etap procesu projektowego, pozwalający na dostosowanie budynku do lokalnych warunków środowiskowych. Dane dotyczące temperatury, wilgotności powietrza, nasłonecznienia czy opadów umożliwiają określenie podstawowych wyzwań związanych z komfortem użytkowników oraz efektywnością energetyczną obiektu.

8.1. Temperatura

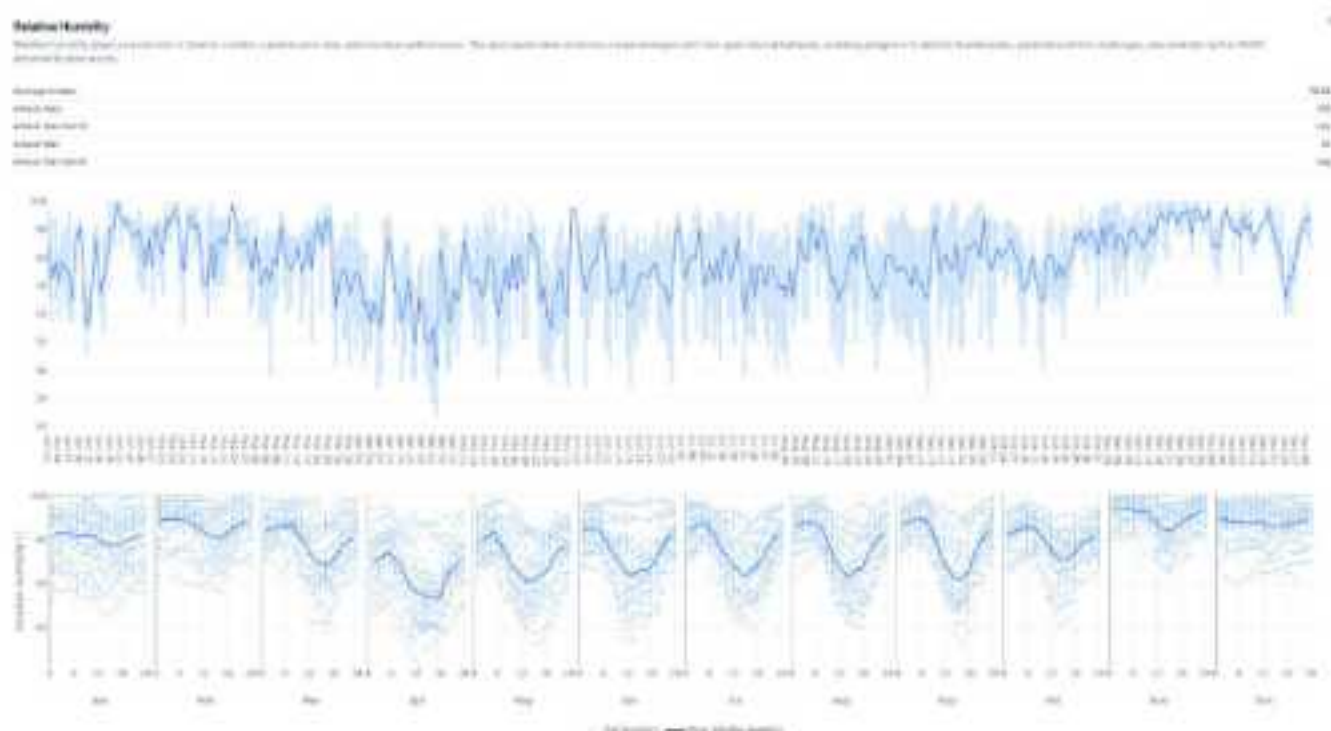
Średnia roczna temperatura (rys. 8.1.) powietrza wynosi $9,17^{\circ}\text{C}$, przy wartościach ekstremalnych sięgających $30,1^{\circ}\text{C}$ w sierpniu oraz $-14,1^{\circ}\text{C}$ w lutym. Roczny przebieg wskazuje na wyraźną sezonowość, z długim okresem wymagającym ogrzewania i dosyć krótkim, w którym istnieje ryzyko przegrzewania. W związku z tym do wskazań projektowych można zaliczyć wykorzystanie pasywnych zysków słonecznych zimą (np. dzięki południowym przeszkleniom) i wprowadzenie rozwiązań chroniących przed przegrzewaniem w miesiącach letnich (np. poprzez adaptacyjne fasady, żaluzje).



Rys. 8.1. Wykres średniej rocznej temperatury, źródło: aplikacja Infrared.city.

8.2. Wilgotność

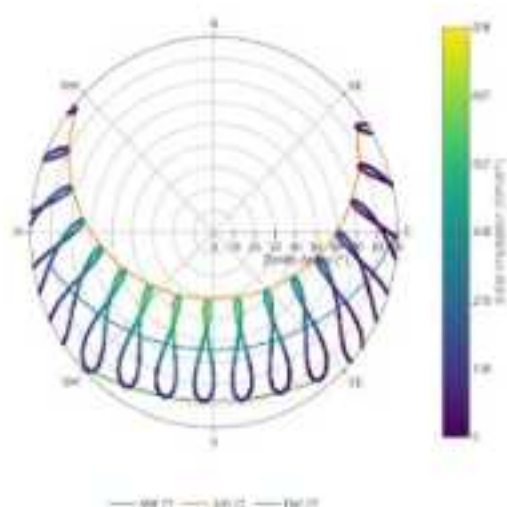
Średnia roczna wilgotność powietrza (rys. 8.2.) wynosi 78,83%. Maksymalna wartość (100%) występuje zimą, minimalna (23%) w maju. Wysoka wilgotność zimą sprzyja kondensacji pary wodnej na powierzchniach chłodnych i zwiększa ryzyko rozwoju grzybów. Do wskazań projektowych można zaliczyć stosowanie wentylacji mechanicznej z odzyskiem ciepła i kontrolą wilgotności, dobranie materiałów odpornych na zawilgocenie i unikanie mostków cieplnych.



Rys. 8.2. Wykres średniej rocznej wilgotności, źródło: aplikacja Infrared.city.

8.3. Ścieżki słońca

Analiza ścieżek słońca (rys. 8.3.) wskazuje na znaczny dopływ energii w okresie letnim i ograniczony w zimowym. Największe wartości promieniowania rejestrowane są w godzinach południowych w miesiącach czerwiec-sierpień. Co potwierdza, że warto orientować przeszklenia na południe w celu maksymalizacji zysków zimą i stosować zewnętrzne systemy zacięniające w okresie letnim.



Rys. 8.3. Ścieżka słońca, źródło: aplikacja Infrared.city.

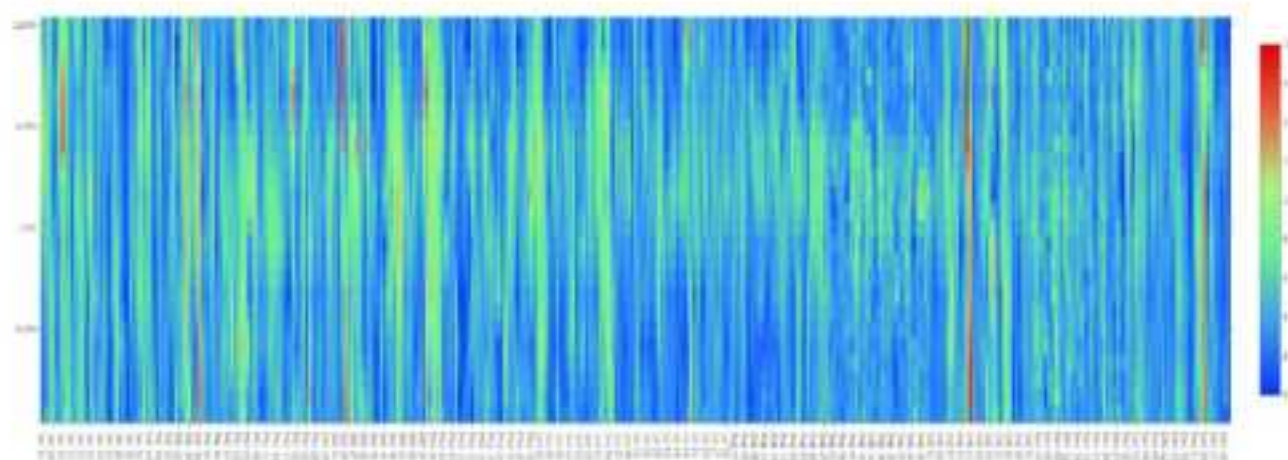
8.4. Roza wiatrów i prędkość wiatru

Dominującym kierunkiem wiatru (rys. 8.4.) jest sektor zachodni i południowo-zachodni, z prędkościami średnimi 3-5 m/s. Najczęściej występują prędkości (rys. 8.5.) w zakresie 1-6 m/s. Sporadycznie obserwuje się podmuchy przekraczające 10 m/s. Dzięki temu można wykorzystać wiatr w naturalnej wentylacji, natomiast warto planować wejścia i strefy rekreacyjne w bardziej osłoniętych lokalizacjach.



Rys. 8.4. Ścieżka słońca, źródło: aplikacja Infrared.city.

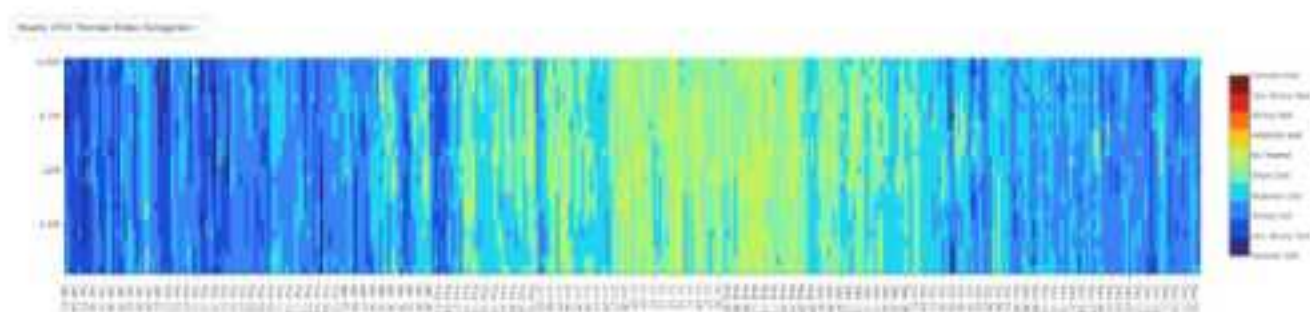
Wind Speed



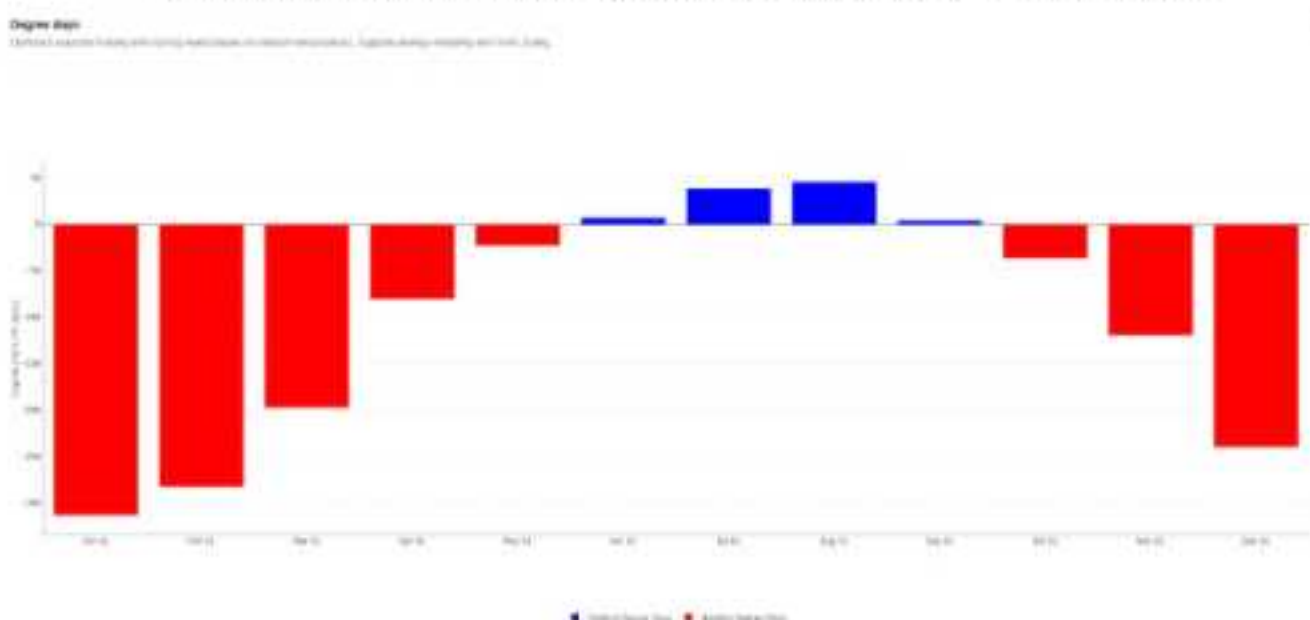
Rys. 8.5. Prędkość wiatru, wykres roczny, źródło: aplikacja Infrared.city.

8.5. Komfort cieplny

Analiza UTCI (rys. 8.6.) wskazuje na przewagę stresu zimna w miesiącach październik-kwiecień, natomiast w okresie letnim (czerwiec-sierpień) obserwuje się umiarkowany stres ciepła lub komfort termiczny. Zatem priorytetowym staje się zapewnienie ochrony przed zimnem i wykorzystanie pasywnego chłodzenia i wentylacji naturalnej w lecie. Analiza *degree days* (rys. 8.7.) wskazuje na wyraźną przewagę zapotrzebowania na ogrzewanie (styczeń-kwiecień oraz październik-grudzień). Zapotrzebowanie na chłodzenie występuje tylko w lipcu i sierpniu.



Rys. 8.6. Analiza komfortu termicznego, wykres roczny, źródło: aplikacja Infrared.city.



Rys. 8.7. Analiza *degree days*, wykres roczny, źródło: aplikacja Infrared.city.

Największe natężenie promieniowania słonecznego (rys. 8.8) występuje w miesiącach wiosenno-letnich. Zimą dominują dni pochmurne, ograniczające potencjał pasywnych zysków cieplnych. Do wskazań projektowych może należeć planowanie instalacji fotowoltaicznych z uwzględnieniem szczytów wiosenno-letnich i maksymalizacja dostępu światła dziennego w miesiącach zimowych.



Rys. 8.8. Analiza natężenia promieniowania słonecznego, wykres roczny, źródło: aplikacja Infrared.city.

Z analizy (rys. 8.9.) wynika, że działka projektowa nie jest bezpośrednio zagrożona miejską wyspą ciepła. Największe wartości anomalii termicznej występują w gęsto zabudowanych kwartałach mieszkaniowych oraz wzdłuż głównych ciągów komunikacyjnych, gdzie udział powierzchni nieprzepuszczalnych jest wysoki. Obszary oznaczone w odcieniach czerwieni wskazują wzrost temperatury względem terenów zielonych nawet o $+7^{\circ}\text{C}$ do $+9^{\circ}\text{C}$.



Rys. 8.9. Analiza miejskiej wyspy ciepła, źródło: urbanheat.app.

8.6. Cele środowiskowe

Analiza warunków klimatycznych wykazała, że lokalne uwarunkowania, czyli znaczna sezonowość temperatury, wysoka wilgotność powietrza, przewaga zapotrzebowania na ogrzewanie oraz zmienne warunki radiacyjne i wietrzne powinny stać się punktem wyjścia dla określenia priorytetów środowiskowych w projektowaniu budynku dydaktyczno-badawczego. Główne cele to:

- redukcja zapotrzebowania na energię do ogrzewania i chłodzenia poprzez ograniczenie strat ciepła dzięki wysokiej izolacyjności, maksymalizację pasywnych zysków słonecznym w okresie zimowym przy jednoczesnej ochronie przed przegrzewaniem latem, wykorzystanie wentylacji naturalnej);
- optymalizacja jakości środowiska wewnętrznego poprzez integrację systemów pasywnych i aktywnych, kontrolę wilgotności powietrza i ograniczenie ryzyka kondensacji poprzez zastosowanie wentylacji mechanicznej z odzyskiem ciepła i regulacją wilgotności;
- wykorzystanie zasobów energii odnawialnej poprzez integrację systemów fotowoltaicznych, których największa wydajność przypada na okres wiosenno-letni;
- minimalizacja wpływu na środowisko zewnętrzne poprzez kształtowanie zielonych przestrzeni publicznych wokół obiektu w sposób zwiększający komfort mikroklimatyczny, zwiększenie udziału powierzchni biologicznie czynnych oraz zielonych dachów i tarasów, co wspiera retencję wody opadowej i łagodzenie efektu miejskiej wyspy ciepła, redukcję śladu

węglowego poprzez wykorzystanie niskoemisyjnych technologii i materiałów (np. CLT, drewno klejone).

- osiągnięcie długofalowej adaptacyjności poprzez integrację systemów monitoringu środowiskowego (IoT) w celu bieżącej oceny warunków i automatycznej regulacji systemów HVAC i osłon przeciwsłonecznych.

9. WSTĘPNE ZAŁOŻENIA PROJEKTOWE

Założenia projektowe stanowią fundament dalszych decyzji i są punktem wyjścia do opracowania spójnego programu funkcjonalno-przestrzennego budynku. Przyjęto je w oparciu o analizę kontekstu urbanistycznego kampusu Politechniki Gdańskiej, aktualne tendencje w projektowaniu obiektów akademickich oraz możliwości, jakie dają współczesne technologie i narzędzia projektowe.

9.1. Główne założenia

Projektowany budynek dydaktyczno-badawczy ma stanowić uzupełnienie kampusu Politechniki Gdańskiej, w szczególności Wydziału Architektury. Jego nadrzędnym celem jest harmonijne współistnienie z otaczającą zabudową przy jednoczesnym wprowadzaniu nowej jakości architektonicznej i przestrzennej. Obiekt łączy w sobie funkcje dydaktyczne i badawcze z przestrzeniami o charakterze półpublicznym i publicznym. Parter budynku został zaprojektowany jako przestrzeń otwarta, stanowiąca łącznik pomiędzy poszczególnymi bryłami oraz pomiędzy budynkiem a otoczeniem, co sprzyja dostępności i intensywnej wymianie pomiędzy różnymi grupami użytkowników.

Założenia projektowe koncentrują się na wprowadzeniu nowej jakości poprzez zastosowanie innowacyjnych rozwiązań materiałowych, takich jak konstrukcje z drewna klejonego warstwowo (CLT), fasady adaptacyjne czy przeszklone elementy z powłokami niskoemisyjnymi. Równolegle kładzie się nacisk na maksymalne wykorzystanie potencjału klimatycznego działki, poprzez strategie pasywne, odnawialne źródła energii i ograniczenie wpływu na zjawisko miejskiej wyspy ciepła. Istotnym elementem koncepcji jest także elastyczność przestrzenna, budynek ma umożliwiać adaptację do zmieniających się w czasie potrzeb dydaktycznych i badawczych, co odpowiada aktualnym tendencjom w projektowaniu obiektów akademickich.

9.2. Aspekty poddane algorytmom

Proces projektowy został wsparty narzędziami parametrycznymi i algorytmami optymalizacyjnymi, które pozwoliły na zbadanie szerokiego spektrum wariantów przestrzennych i środowiskowych. Punktem wyjścia było sześć brył wynikających z siatki geometrycznej, opracowanej na podstawie analizy otaczającej zabudowy. Tak duża liczba elementów miała charakter eksperymentalny, pozwalający na rozpoznanie maksymalnych możliwości układu i jego relacji z działką. W kolejnych etapach liczba brył została ograniczona do czterech, a ostateczne

obliczenia przeprowadzono dla trzech, co odpowiada realnym potrzebom funkcjonalnym oraz kontekstowi przestrzennemu.

Analizy objęły przede wszystkim powierzchnie powyżej poziomu parteru, gdyż ta część budynku pełni funkcję łącznika i zajmuje znaczną część działki, a tym samym nie generuje istotnych wariantów przestrzennych. Kondygnacje wyższe determinują natomiast relacje brył z otoczeniem i mają największy wpływ na kształtowanie bilansu energetycznego oraz dostęp światła dziennego. Powierzchnie ścian zewnętrznych zostały w modelu parametrycznym podzielone na siatkę o module 1x1 m, co umożliwiło szczegółową analizę nasłonecznienia w przedziale godzin 8:00-16:00. Taki zakres został przyjęty ze względu na rytm funkcjonowania budynku i lokalne uwarunkowania klimatyczne. Celem optymalizacji była zarówno maksymalizacja dostępu do światła w okresie zimowym, jak i minimalizacja ryzyka przegrzewania latem.

Ważnym parametrem poddanym badaniu była możliwość rotacji brył o 180 stopni, co w przypadku planu zbliżonego do regularnych form pozwalało uniknąć powtarzalności i zwiększało różnorodność testowanych konfiguracji. Początkowo bryły mogły poruszać się swobodnie w obrębie działki, co umożliwiałoby algorytmom przetestowanie pełnego spektrum potencjalnych rozwiązań. W kolejnych etapach wprowadzono jednak ograniczenia, między innymi w odniesieniu do bryły południowo-zachodniej, której zadaniem stało się domknięcie kompozycyjne ulicy Siedlickiej i stworzenie wyraźnego naprowadzenia na wnętrze kampusu. Równolegle kontrolowano liczbę kondygnacji, aby uniknąć wysokości nieadekwatnych do kontekstu urbanistycznego, a także analizowano wysunięcia stropów powyżej kondygnacji, mogące pełnić funkcję pasywnych osłon przeciwsłonecznych.

Choć podstawowym zakresem analiz było nasłonecznienie, wyniki te stanowią jedynie wstęp do dalszego procesu projektowego. Wyniki optymalizacji nie mają odzwierciedlać idealnych rozwiązań formy, lecz stanowią narzędzie wskazujące racjonalne kierunki projektowe i wspierające podejmowanie decyzji zgodnych z kryteriami środowiskowymi oraz funkcjonalnymi.

CZĘŚĆ III. PARAMETRYKA I OPTYMALIZACJA

10. MODEL PARAMETRYCZNY I PROCES OPTYMALIZACJI

Poniższy rozdział stanowi kluczowy element części badawczo-projektowej pracy. Jego celem jest przedstawienie sposobu, w jaki narzędzia cyfrowe i algorytmiczne zostały wykorzystane do zdefiniowania i testowania zmiennych wpływających na kształt i funkcjonowanie projektowanego obiektu dydaktyczno-badawczego. Model parametryczny nie jest tu jedynie narzędziem wizualizacji, lecz przede wszystkim mechanizmem analizy i optymalizacji, pozwalającym na dynamiczne kształtowanie bryły budynku w odpowiedzi na czynniki środowiskowe, urbanistyczne i funkcjonalne.

10.1. Zmienne decyzyjne

Podstawą procesu modelowania parametrycznego jest określenie zmiennych decyzyjnych, czyli parametrów, które mogą ulegać modyfikacji w trakcie optymalizacji. W niniejszym projekcie ich wybór został podyktowany zarówno analizą uwarunkowań lokalizacji na kampusie Politechniki Gdańskiej, jak i wymaganiami funkcjonalno-przestrzennymi obiektu dydaktyczno-badawczego.

Zmiennymi sterującymi były przede wszystkim te parametry, które mają istotny wpływ na nasłonecznienie, przewietrzanie, bilans energetyczny oraz integrację z otoczeniem urbanistycznym. Dzięki ich odpowiedniemu zdefiniowaniu możliwe było przeprowadzenie procesu optymalizacji z wykorzystaniem algorytmów genetycznych w środowisku Grasshopper i narzędzia Wallacei X.

W projekcie wyróżniono następujące zmienne decyzyjne:

- orientacja brył względem stron świata, parametr umożliwiający rotację każdej bryły układu względem własnej osi;
- przemieszczenie modułów w obrębie działki, określane poprzez przesunięcia w osi X i Y;
- wysunięcia stropów nad poszczególnymi kondygnacjami, wprowadzono zmienną umożliwiającą kontrolę wielkości okapów, które pełniły rolę elementów zacieniających oraz akcentów architektonicznych;
- liczba kondygnacji w poszczególnych modułach, parametr (2-4 kondygnacje), związany zarówno z wymogami programu funkcjonalnego, jak i skalą zabudowy otoczenia.

Wszystkie zmienne zdefiniowano jako parametry wejściowe modelu Grasshopper, połączone następnie z komponentami optymalizacyjnymi w Wallacei X (wtyczka do Grasshoppera). Zakresy ich wartości zostały określone na podstawie analizy kontekstu przestrzennego (wysokość i odległości zabudowy) i badań środowiskowych (analizy słońca i wiatru). Dzięki takiemu zestawowi zmiennych możliwe było wygenerowanie szerokiego spektrum rozwiązań przestrzennych, zróżnicowanych zarówno pod względem formy, jak i charakterystyki środowiskowej. To z kolei umożliwiło późniejszą analizę wyników optymalizacji i wybór wariantów najlepiej odpowiadających założonym funkcjom i idei projektowej.

10.2. Ograniczenia i warunki brzegowe

Definiowanie ograniczeń oraz warunków brzegowych stanowiło kluczowy etap budowy modelu parametrycznego. Ich rolą było zapewnienie, że generowane w procesie optymalizacji warianty nie tylko odpowiadają na przyjęte cele projektowe, lecz również pozostają zgodne z realiami lokalizacyjnymi, prawnymi i technicznymi. W kontekście budynku dydaktyczno-badawczego dla Wydziału Architektury Politechniki Gdańskiej ograniczenia można podzielić na urbanistyczne i środowiskowe.

Lokalizacja budynku w środkowej części kampusu Politechniki Gdańskiej wymagała respektowania istniejącej tkanki urbanistycznej o silnie ugruntowanej tożsamości. Do najważniejszych ograniczeń urbanistycznych należały:

- maksymalna wysokość zabudowy ustalona na poziomie 4 kondygnacji, co odpowiada skali sąsiadujących obiektów uczelnianych;
- relacje widokowe, ochrona osi ekspozycyjnych prowadzących w stronę historycznych obiektów Politechniki.

Istotnym aspektem były również ograniczenia wynikające z analizy warunków klimatycznych i środowiskowych:

- nasłonecznienie, zapewnienie minimalnego dostępu światła słonecznego do przestrzeni dydaktycznych i dziedzińca w okresie zimowym;
- zacienienie, unikanie nadmiernego przegrzewania się pomieszczeń latem poprzez kontrolę geometrii stropów i adaptacyjnych fasad;
- mikroklimat - utrzymanie części istniejącej zieleni wysokiej oraz zapewnienie powierzchni biologicznie czynnej na możliwie najwyższym poziomie.

Na potrzeby przeprowadzenia symulacji parametrycznych i optymalizacji konieczne było określenie dodatkowych warunków brzegowych:

- granice obszaru symulacji, model obejmował działkę wraz z 100-metrowym pasem otoczenia, aby uwzględnić wpływ sąsiedniej zabudowy;
- parametry klimatyczne, wprowadzono dane z pliku EPW dla Gdańska;
- czas symulacji, analizę nasłonecznienia ograniczono do kluczowych dni roku: przesilenia zimowego, równonocy wiosennej/jesiennej oraz przesilenia letniego.

Podsumowując, przyjęte ograniczenia i warunki brzegowe zapewniły równowagę między eksperymentalnym charakterem badań opartych na algorytmach genetycznych a koniecznością spełnienia realnych wymogów funkcjonalnych i środowiskowych. Dzięki nim wygenerowane warianty miały charakter eksperymentalny i jednocześnie możliwy do zaimplementowania w praktyce architektonicznej.

10.3. Definicja funkcji celu

Funkcje celu wyznaczono w oparciu o trzy główne kryteria:

- komfort środowiskowy, związany z dostępem do światła dziennego;
- efektywność energetyczna, redukcja zapotrzebowania na energię w cyklu rocznym;

- aspekty urbanistyczne, relacje przestrzenne.

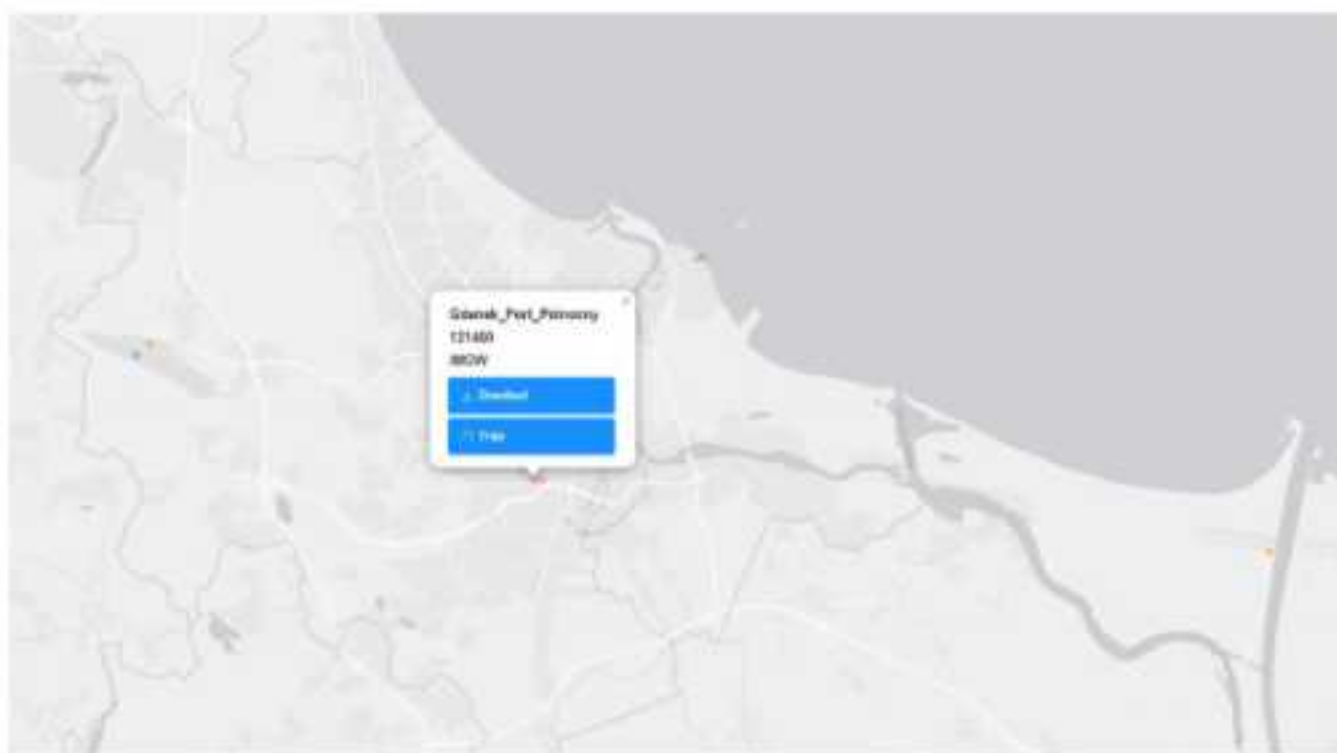
W badaniach przyjęto zarówno funkcje celu o charakterze maksymalizującym (nasłonecznienie zimą), jak i minimalizującym (redukcja przegrzewania w okresie letnim). Dzięki temu możliwe było zrównoważenie przeciwstawnych wymagań i uzyskanie rozwiązań kompromisowych.

10.4. Środowisko symulacji

10.4.1. Ladybug Tools i dane EPW

Do analiz środowiskowych w środowisku Ladybug Tools wykorzystano plik EPW dla Gdańska, opracowany na podstawie pomiarów stacji meteorologicznej IMGW Gdańsk Port Północny-121400 (mimo mylącej nazwy, stacja znajduje się we Wrzeszczu, rys. 10.1.). Stacja ta została wybrana jako źródło danych wejściowych z uwagi na trzy główne czynniki: bliskość względem działki projektowej, położenie na bardzo zbliżonej wysokości n.p.m., ciągłość i kompletność serii pomiarowych. W rejonie Gdańska dostępne są cztery stacje meteorologiczne, więc teoretycznie możliwe byłoby przeprowadzenie ekstrapolacji³² danych pomiędzy tymi punktami pomiarowymi, co pozwoliłoby na uwzględnienie różnic w mikroklimacie i uzyskanie danych interpolowanych dla działki projektowej.

W projekcie zrezygnowano jednak z ekstrapolacji, ponieważ wskazana stacja znajduje się najbliżej działki projektowej i najlepiej odzwierciedla jej warunki, różnice wysokości n.p.m. pomiędzy stacją a działką są pomijalne, uwzględnienie stacji z lotniska w Rębiechowie mogłoby wprowadzić istotne rozbieżności, ze względu na jej położenie na znacznie wyższej wysokości (mikroklimat bardziej przewiewny, chłodniejszy, mniej reprezentatywny dla Wrzeszcza).



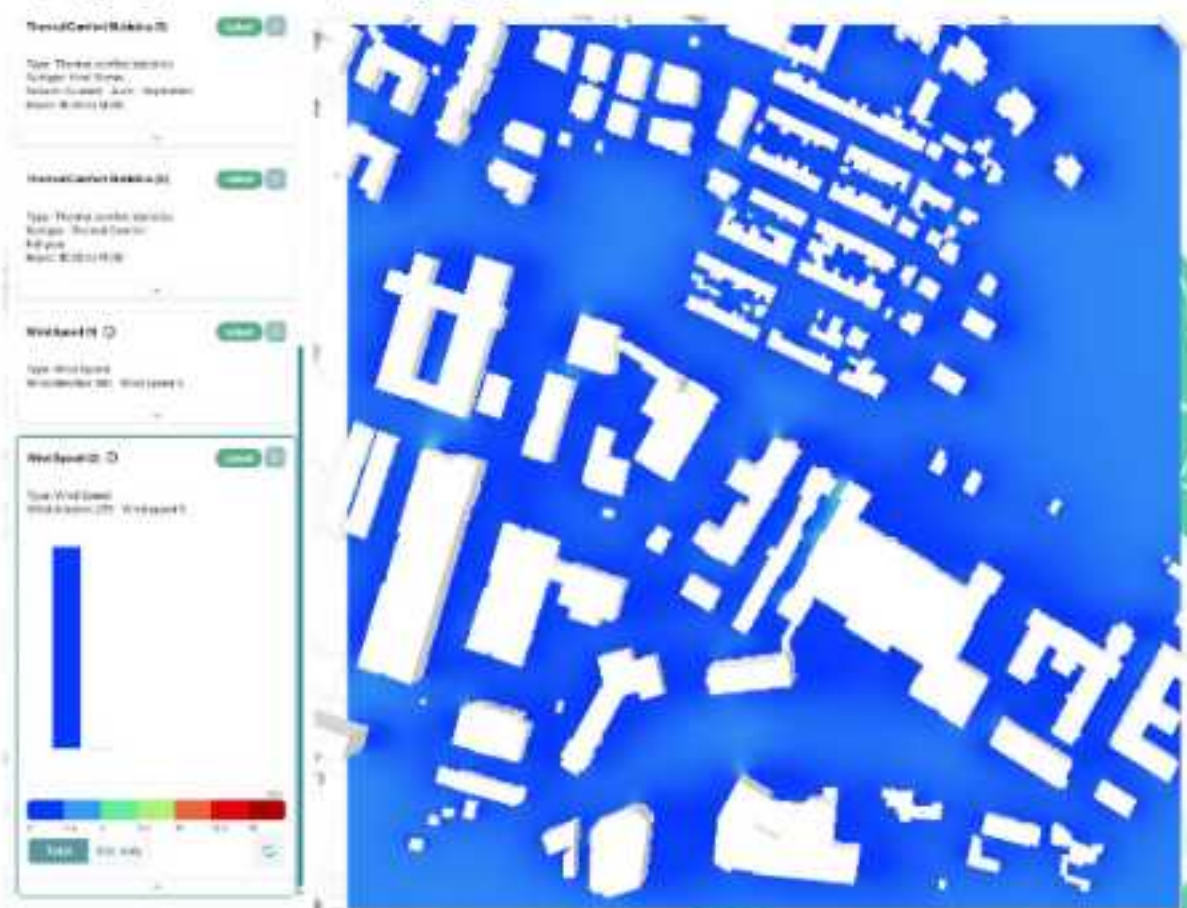
Rys. 10.1. Stacja pomiarowa, z której wykorzystano dane.

³² Ekstrapolacja to prognozowanie wartości pewnej zmiennej lub funkcji poza zakresem, dla którego są dostępne dane, przez dopasowanie do istniejących danych pewnej funkcji, następnie wyliczenie jej wartości w szukanym punkcie (Encyklopedia PWN).

10.4.2. Uczenie głębokie w analizach przewietrzania

Infrared.city to zaawansowane narzędzie symulacyjne wspierane sztuczną inteligencją, zaprojektowane z myślą o architektach, projektantach miejskich i specjalistach ds. środowiska. Umożliwia szybką i precyzyjną analizę mikroklimatu: wiatru, komfortu termicznego (np. za pomocą wskaźnika UTCI) oraz promieniowania słonecznego, integrując dane klimatyczne EPW z geometrią urbanistyczną. Narzędzie oferuje integrację z *Grasshopperem* w *Rhino*, co ułatwia bezpośrednie włączanie analiz środowiskowych w proces parametrycznego projektowania (Grossi, 2025).

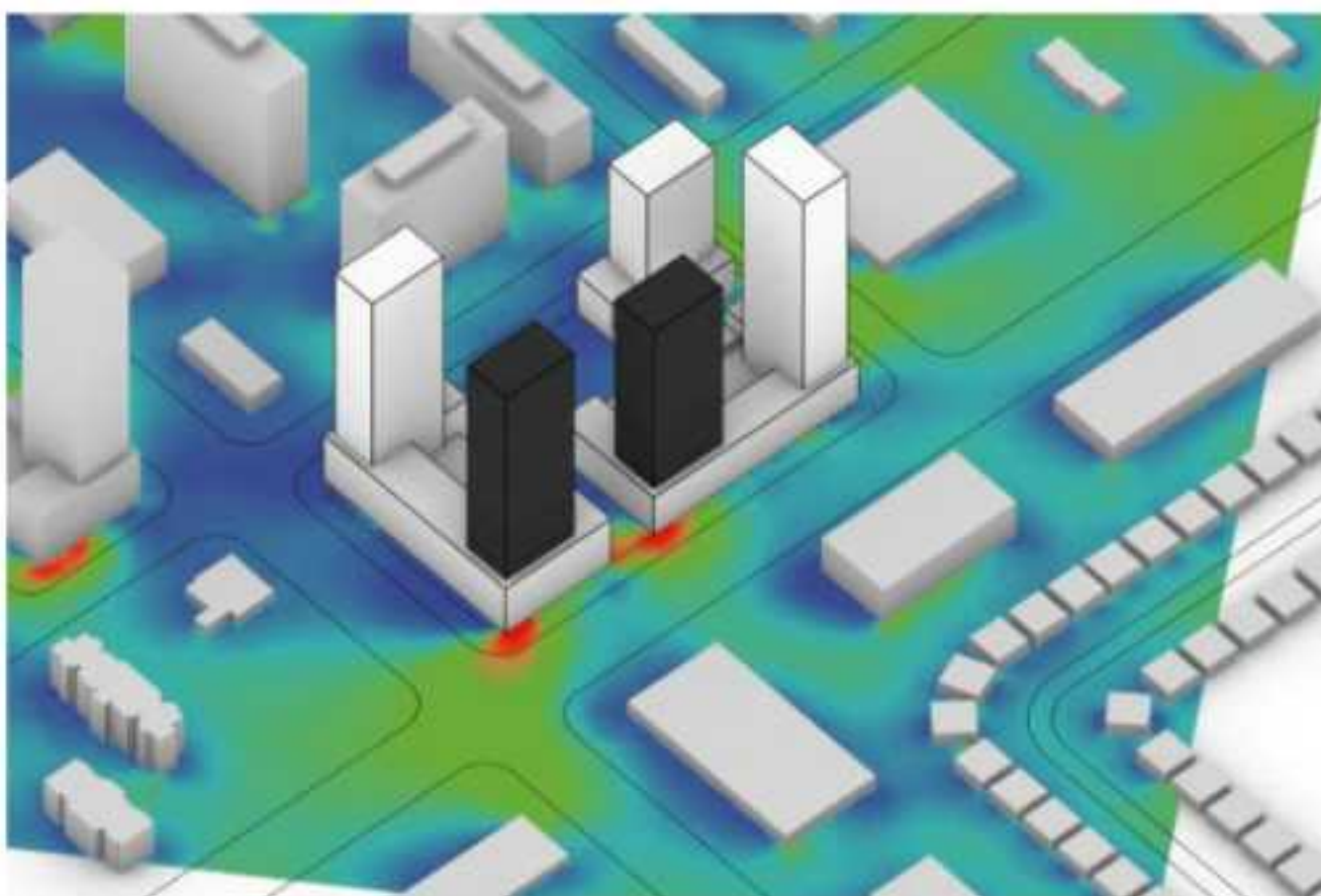
W ramach projektu budynku dydaktyczno-badawczego na kampusie Politechniki Gdańskiej wykonano analizę przewietrzania (rys. 10.2.) i komfortu termicznego z wykorzystaniem Infrared.city, mimo że uzyskane dane nie zostały wprowadzone do procesu optymalizacji. Powody są następujące, brak istotnego wpływu na kształtowanie bryły, działka nie znajduje się w strefie miejskiej wyspy ciepła, nie ma tam silnych wiatrowych dominant, więc choć możliwe, tego typu dane nie przesądziłyby o formie obiektu.



Rys. 10.2. Analiza przewietrzania wykonana w Infrared.city

Mimo braku znacznego wpływu przewietrzania na optymalizację formy, analiza pozwoliła na oswojenie się z narzędziem i jego możliwościami, weryfikację warunków mikroklimatycznych terenu, zdobycie wiedzy przydatnej w przyszłości, szczególnie w przypadkach większych obiektów czy urbanistyki, gdzie komfort wiatrowy jest ważnym parametrem.

Największy potencjał dla analiz tego typu leży w projektach o dużej skali i intensywnej zabudowie. Dobrym przykładem jest realizacja firm SvN Architects + Planners, którzy przy projekcie wieżowców w Mississauga w Kanadzie (rys. 10.3) zastosowali Infrared.city wraz z algorytmami genetycznymi do optymalizacji brył względem komfortu wiatrowego, redukując obszary z niekomfortowymi wiatrami o ok. 12 % (Taut, 2025).

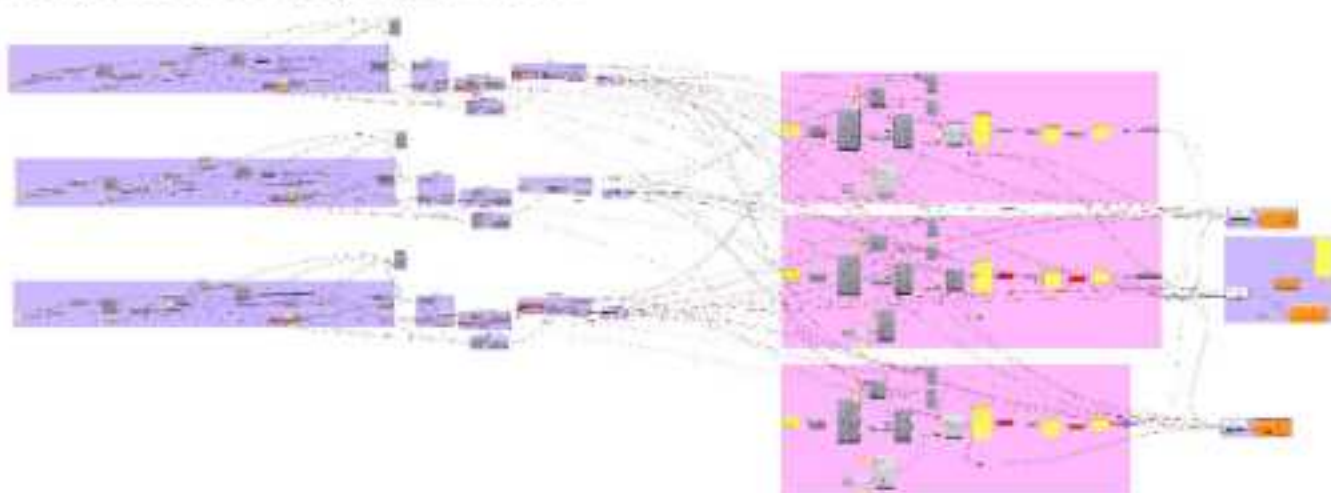


Rys. 10.3. Wykorzystanie Infrared.city przy projekcie wieżowców w Mississauga w Kanadzie.

10.5. Optymalizacja

10.5.1. Algorytmy genetyczne i Wallacei X

Do przeprowadzenia procesu optymalizacji zastosowano algorytmy genetyczne, implementowane w środowisku *Grasshopper* (Rys. 10.4.) przy użyciu wtyczki *Wallacei X*. Algorytmy te bazują na zasadach ewolucji biologicznej, gdzie zdefiniowana populacja rozwiązań podlega selekcji, krzyżowaniu i mutacjom, w wyniku czego generowane są kolejne pokolenia rozwiązań o coraz lepszych parametrach.



Rys. 10.4. Skrypt w *Grasshopperze* generujący geometrię, analizę nasłonecznienia i proces optymalizacji.

Wallacei X umożliwia definiowanie populacji startowej, liczby pokoleń i parametrów mutacji, analizę multykryterialną, opartą na zbiorze funkcji celu, wizualizację wyników, wybór rozwiązań kompromisowych (Pareto) w kontekście konkurujących kryteriów.

W projekcie algorytmy genetyczne zostały zastosowane do optymalizacji układu brył budynku względem zdefiniowanych funkcji celu, takich jak maksymalizacja nasłonecznienia zimą i ograniczenie przegrzewania latem.

10.5.2. Ustawienia, przebieg i analiza wyników

Na początku zdefiniowano podstawowe parametry: wielkość populacji (liczbę testowanych wariantów w każdej rundzie), liczbę pokoleń (ile razy warianty były „udoskonalane”), a także intensywność mutacji i krzyżowania. Można to porównać do serii prób, w których kolejne rozwiązania są mieszane i modyfikowane, aby stopniowo zbliżać się do lepszych wyników.

Przebieg optymalizacji można opisać jak serię iteracji. Pierwsze pokolenie jest losowe, algorytm generuje zestaw różnych układów brył w dopuszczalnych zakresach. Następnie wybiera najlepiej rokujące rozwiązania, łączy ich cechy (np. obrót, wysunięcia stropów) i od czasu do czasu wprowadza niewielką mutację, aby utrzymać różnorodność i nie utknąć w jednym pomysle. Ten cykl powtarza się wielokrotnie. Z każdą generacją rośnie odsetek rozwiązań, które jednocześnie dobrze wypadają zimą i nie przegrzewają się latem. Zakończenie następuje po osiągnięciu zadanej liczby generacji lub gdy poprawa między generacjami staje się marginalna (Chaillou, 2022).

W projekcie każda kombinacja brył była oceniana pod kątem kilku celów: nasłonecznienia zimą i w równonoc oraz ograniczenia przegrzewania latem. Wallacei X gromadził te dane i przedstawiał je w formie wizualizacji (które będą widoczne w kolejnych rozdziałach przy obliczeniach). Dzięki temu możliwe było zrozumienie jak różne decyzje projektowe oddziałują na siebie. Ostateczny wybór wariantu opierał się na kompromisie między wynikami symulacji a uwarunkowaniami funkcjonalnymi i przestrzennymi kampusu. Ten etap jest istotny, ponieważ najlepszy matematycznie wariant nie zawsze jest najlepszym budynkiem, składa się na to wiele innych kwestii niepoddanych algorytmom.

11. ETAP I – 6 BRYŁ

11.1. Punkt wyjściowy

Punktem wyjścia do procesu optymalizacji było sześć brył projektowych, powstałych w wyniku analizy geometrycznej siatki działki oraz relacji przestrzennych z kampusem Politechniki Gdańskiej (rys. 11.1). Układ ten potraktowano jako zestaw wariantów bazowych, które następnie poddano procesowi optymalizacji algorytmami genetycznymi. Celem nie było znalezienie jednej idealnej formy, lecz eksploracja przestrzeni rozwiązań i zrozumienie, jakie zależności występują pomiędzy zmiennymi projektowymi a wybranymi kryteriami oceny. Takie podejście jest zgodne z praktyką badań parametrycznych w architekturze, gdzie kluczowe znaczenie ma analiza relacji, a nie pojedynczy wynik (Bonenberg et al., 2019).



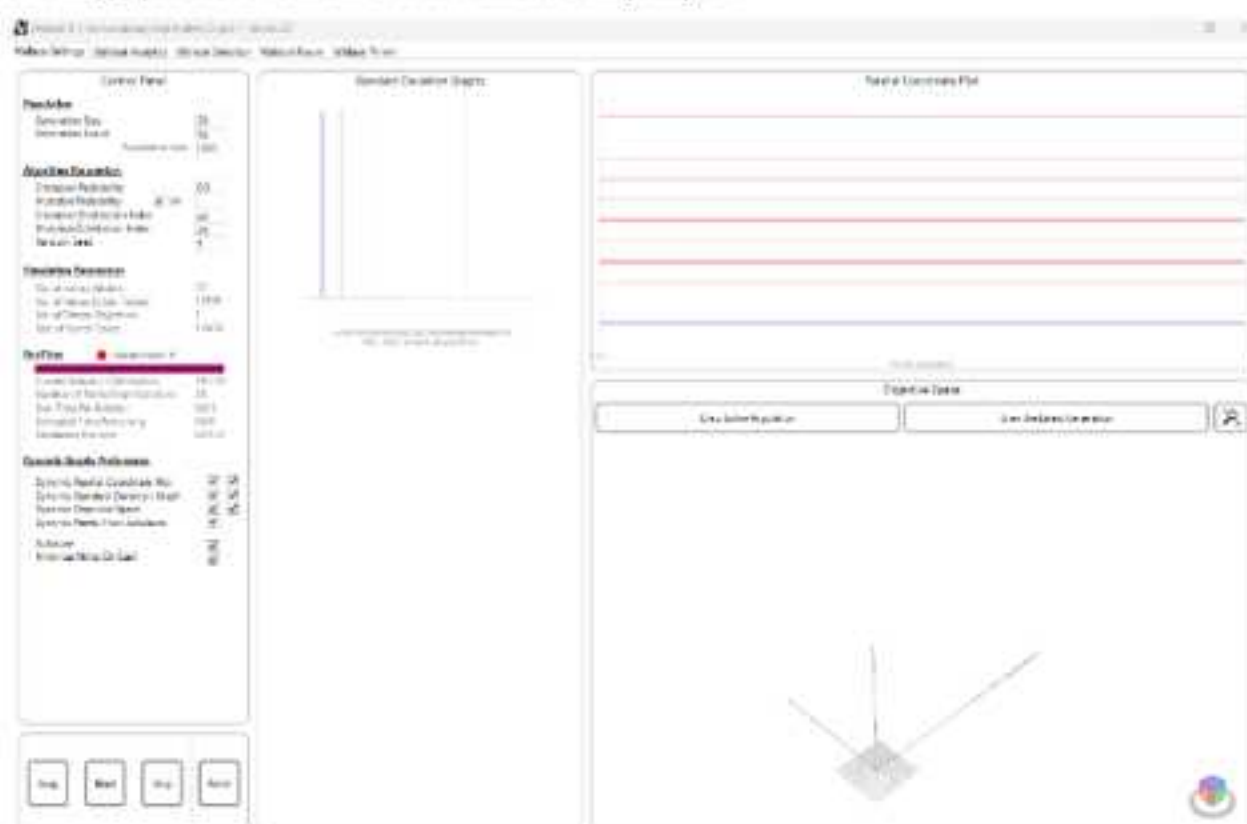
Rys. 11.2. Wstępny układ kształtu brył, na podstawie siatki utworzonej na podstawie analizy sąsiedniej zabudowy (zwłaszcza tej na północ i na zachód od działki).

11.2. Optymalizacja jednokryterialna nasłonecznienia

Na pierwszym etapie przeprowadzono optymalizację jednokryterialną w środowisku. Analizy skupiono na dwóch celach rozpatrywanych oddzielnie, czyli maksymalizacji nasłonecznienia w okresie zimowym i minimalizacji przegrzewania w okresie letnim. Proces rozpoczął się od wygenerowania populacji wariantów, które ewoluowały w kolejnych pokoleniach. Algorytm genetyczny wybierał te rozwiązania, które najlepiej spełniały zadane kryterium, a następnie tworzył nowe warianty przez krzyżowanie i mutację.

Na rys. 11.2 przedstawiono ustawienia procesu optymalizacji dla przypadku maksymalizacji nasłonecznienia zimą. Algorytm został skonfigurowany tak, aby wygenerować

łącznie 1000 rozwiązań w ramach 50 pokoleń, przy czym każde pokolenie składało się z 20 wariantów. Parametry algorytmu, takie jak prawdopodobieństwo krzyżowania (*Crossover Probability*), pozostawiono w ustawieniach domyślnych.

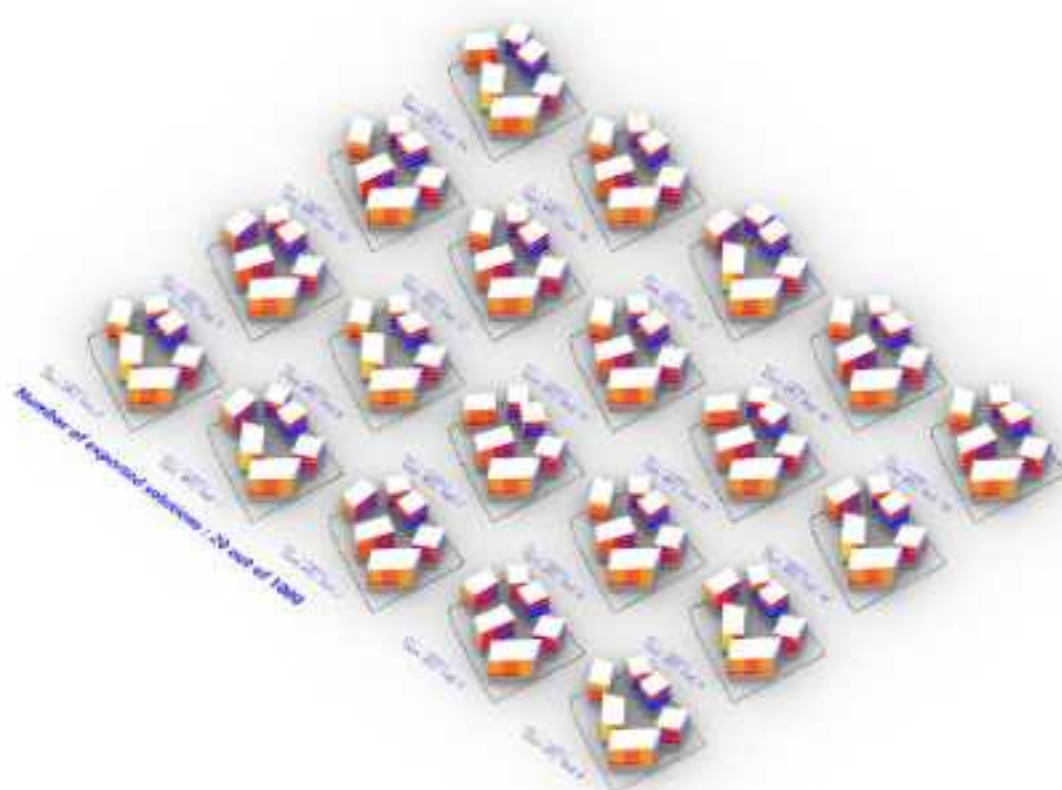


Rys. 11.2. Maksymalizacja nasłonecznienia zimą, ustawienia optymalizacji, wtyczka Wallacei X w środowisku Grasshopper.

Na kolejnych grafikach (rys. 11.3., 11.4., 11.5. i 11.6.) zaprezentowano przykładowe wyniki z ostatniego pokolenia, oznaczonego numerem 49 (generacja początkowa znajduje się pod numerem 0). Mimo ograniczonej powierzchni działki i relatywnie dużej liczby analizowanych brył, uzyskane rozwiązania cechują się zauważalnym zróżnicowaniem. Należy jednak zaznaczyć, że wiele z nich jest do siebie podobnych – wynika to z faktu, że końcowe generacje gromadzą już warianty zoptymalizowane, a więc te znajdujące się blisko kompromisu (*Pareto*).



Rys. 11.3. Maksymalizacja nasłonecznienia zimą, pokolenie 49 i jednocześnie front Pareto, widok rozwiązań z góry.

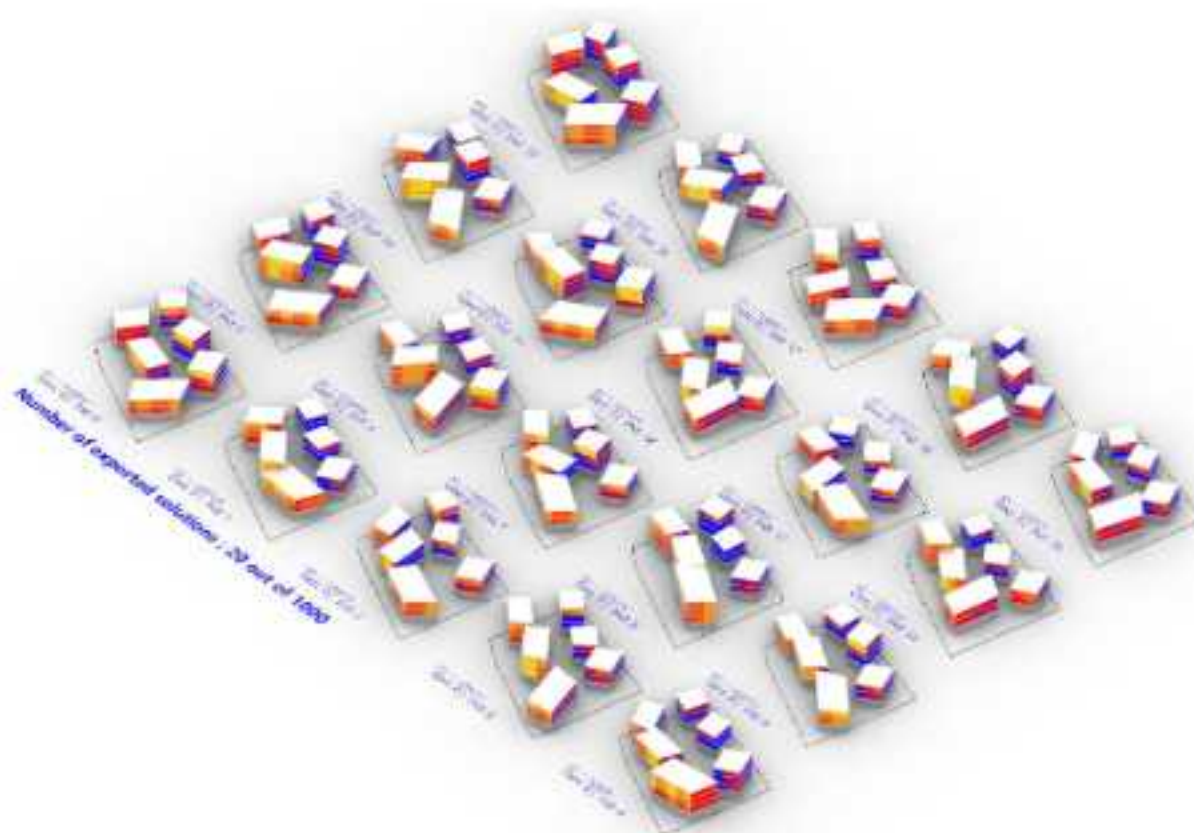


Rys. 11.4. Maksymalizacja nasłonecznienia zimą, pokolenie 49 i jednocześnie front Pareto, widok rozwiązań - aksonometria.

Odwrotną sytuację obserwujemy w pierwszym pokoleniu (rys. 11.5. i 11.6.). Tutaj algorytm losowo generuje początkowe kombinacje, co skutkuje największym zróżnicowaniem pomiędzy wariantami. Dopiero w kolejnych krokach następuje proces doskonalenia rozwiązań, w którym populacja koncentruje się wokół korzystniejszych wartości funkcji celu.



Rys. 11.5. Maksymalizacja nasłonecznienia zimą, pokolenie 0, widok rozwiązań z góry.

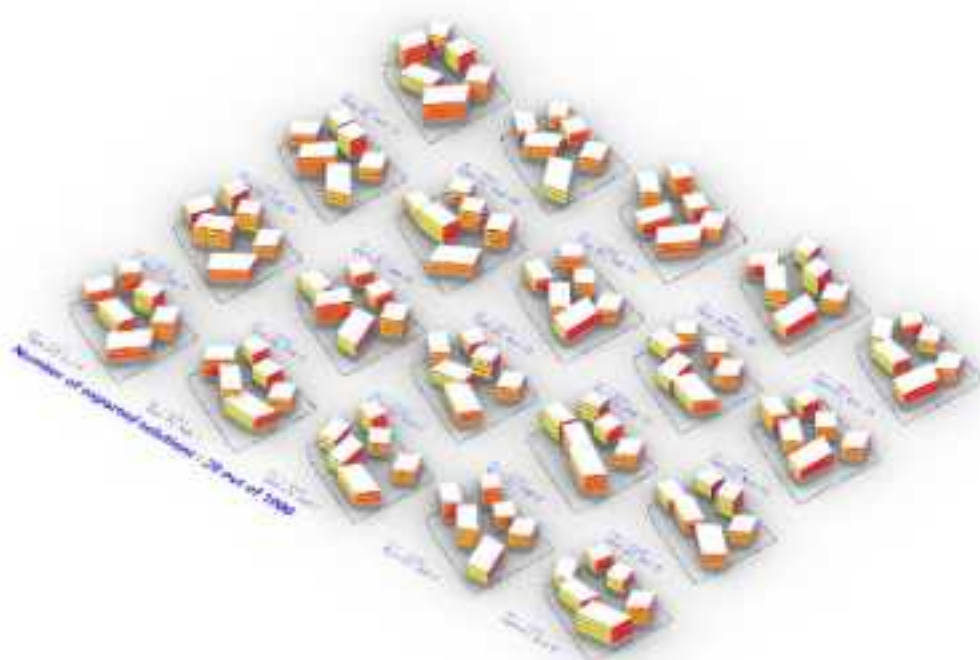


Rys. 11.6. Maksymalizacja nasłonecznienia zimą, pokolenie 0, widok rozwiązań - aksonometria.

Podobny przebieg zaobserwowano w przypadku optymalizacji jednokryterialnej prowadzonej dla minimalizacji nasłonecznienia latem. Ustawienia algorytmu pozostały identyczne, zmieniła się jedynie funkcja celu. Także w tym przypadku najbardziej zróżnicowane rozwiązania występują w pierwszej generacji (rys. 11.7. i 11.8.), natomiast ostatnia generacja (rys. 11.9. i 11.10.) obejmuje warianty bardzo podobne między sobą, które jednocześnie pokrywają się ze zbiorem rozwiązań Pareto.



Rys. 11.7. Minimalizacja nasłonecznienia latem, pokolenie 0, widok rozwiązań z góry.



Rys. 11.8. Minimalizacja nasłonecznienia latem, pokolenie 0, widok rozwiązań - aksonometria.



Rys. 11.9. Minimalizacja nasłonecznienia latem, pokolenie 49, widok rozwiązań z góry.



Rys. 11.10. Minimalizacja nasłonecznienia latem, pokolenie 49, widok rozwiązań - aksonometria.

Wyniki potwierdziły, że optymalizacja jednokryterialna prowadzi do sprzecznych rezultatów i nie daje odpowiedzi na pytanie, które rozwiązanie jest najlepsze w ogólnym ujęciu. To uzasadniło potrzebę przeprowadzenia optymalizacji wielokryterialnej.

11.3. Optymalizacja wielokryterialna nasłonecznienia

11.3.1. Dane wejściowe

Dane klimatyczne pochodziły z pliku EPW dla Gdańska (stacja Port Północny IMGW). Uwzględniono przesilenie zimowe, równonoc oraz przesilenie letnie w godzinach 8-16.

11.3.2. Cele (fitness functions)

Zdefiniowano trzy cele: maksymalizacja nasłonecznienia w zimie, maksymalizacja nasłonecznienia w równonoc, minimalizacja przegrzewania latem.

11.3.3. Zmienne projektowe

Do zmiennych należały: orientacja brył (obrót i poruszanie się w obrębie działki), liczba kondygnacji (maksymalnie 4), wielkość wysunięć stropów (maksymalnie 1m).

11.3.4. Konfiguracja algorytmu i symulacja

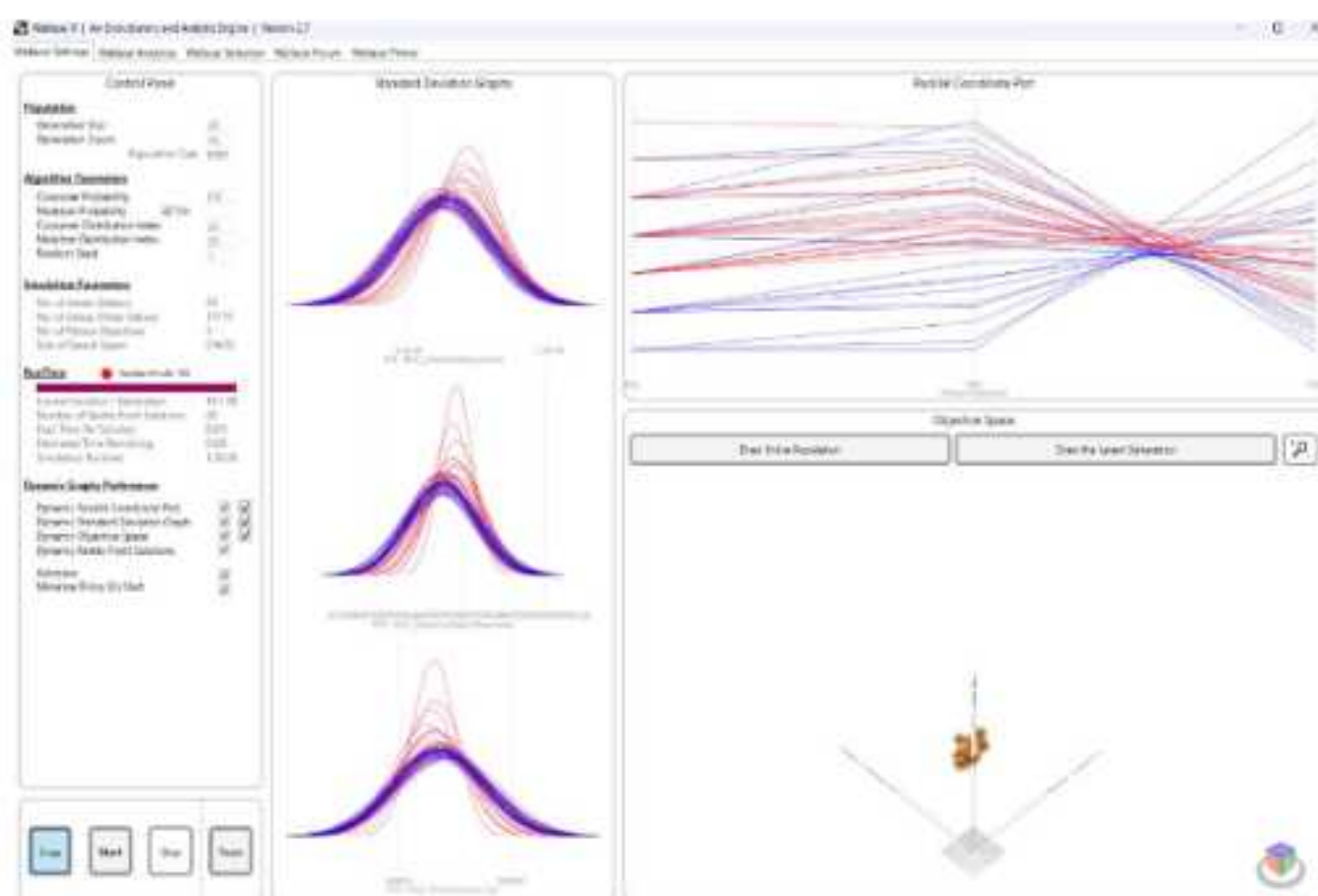
Optymalizację przeprowadzono, jak poprzednio, w Wallacei X. Liczba populacji wynosiła w sumie 1000, a liczba pokoleń 50. Parametry mutacji i krzyżowania ustawiono domyślnie, czyli na poziomie umiarkowanym, aby zachować równowagę między różnorodnością populacji a stabilnością wyników.

11.3.5. Analiza wyników i metoda wyboru rozwiązań

Proces optymalizacji wielokryterialnej w Wallacei X generował dużą liczbę rozwiązań, które następnie można było analizować przy pomocy kilku rodzajów wykresów. Każdy z nich pełnił inną rolę: pozwalał na ocenę stabilności populacji, porównanie konkurujących ze sobą celów oraz identyfikację zbioru rozwiązań kompromisowych.

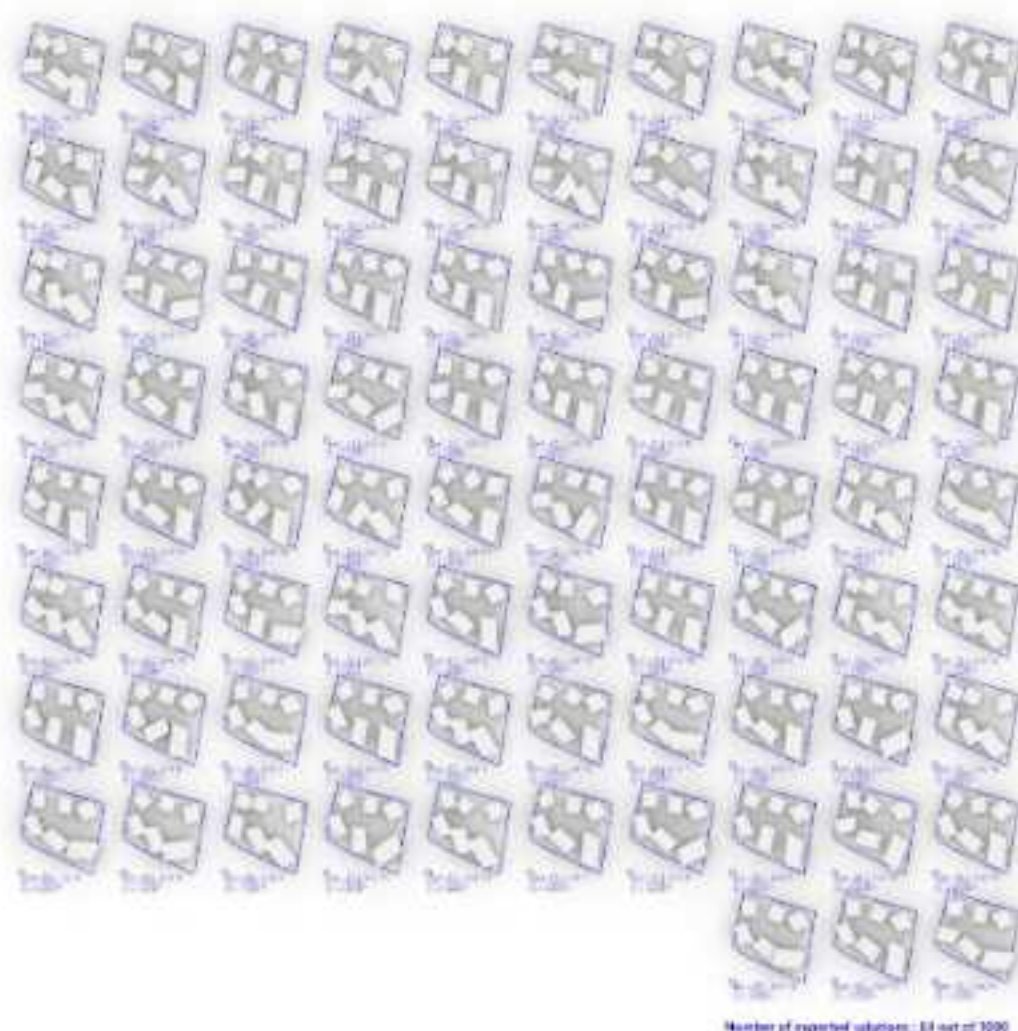
Na rys. 11.11. zaprezentowano interfejs Wallacei X w trakcie działania algorytmu. Po lewej stronie widoczne są ustawienia: liczebność populacji, liczba pokoleń, parametry krzyżowania i mutacji. W środkowej części znajdują się tzw. *standard deviation graphs*, które pokazują, jak zmienia się rozrzut wyników w kolejnych pokoleniach. Ich zwężanie się w miarę postępu optymalizacji wskazuje na stabilizację populacji i zbieżność algorytmu w kierunku rozwiązań zoptymalizowanych (Deb, 2001).

Wykres *parallel coordinates plot* (górna prawa część) przedstawia wszystkie cele jednocześnie. Każda linia reprezentuje jedno rozwiązanie, a jej przebieg przez kolejne osie pokazuje, jak poszczególne zmienne wpływają na wartości funkcji celu. Dzięki temu można łatwo zauważyć zależności i konflikty, np. poprawa nasłonecznienia zimą (F01) często wiązała się z pogorszeniem wskaźników letnich (F03). Tego typu wizualizacja jest szczególnie użyteczna w wielokryterialnej optymalizacji, gdyż pozwala rozumieć kompromisy.



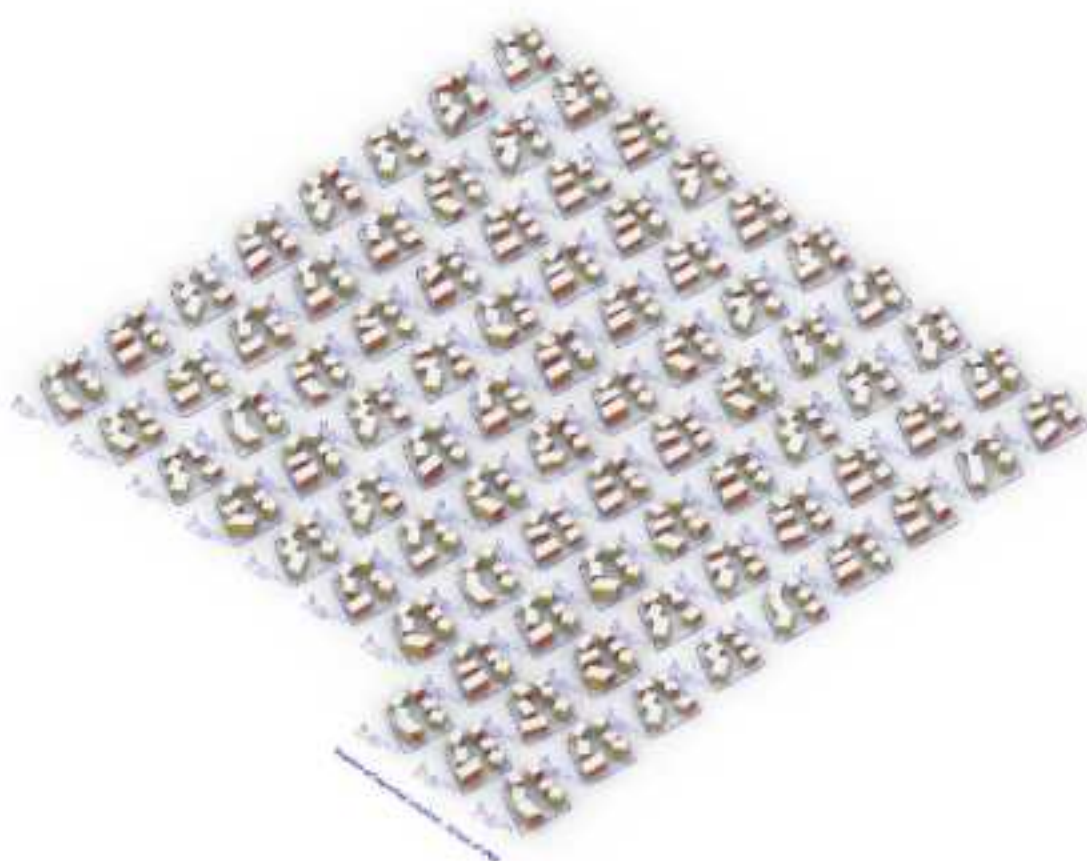
Rys. 11.11. Interfejs Wallacei X, wyniki przeprowadzonej optymalizacji.

Rys. 11.12. i 11.13. przedstawia zbiór rozwiązań Pareto, czyli takich, które są niemożliwe do poprawienia we wszystkich celach jednocześnie. W tym przypadku było to 83 rozwiązania z 1000 wygenerowanych.



Number of expected solutions: 54 out of 1000

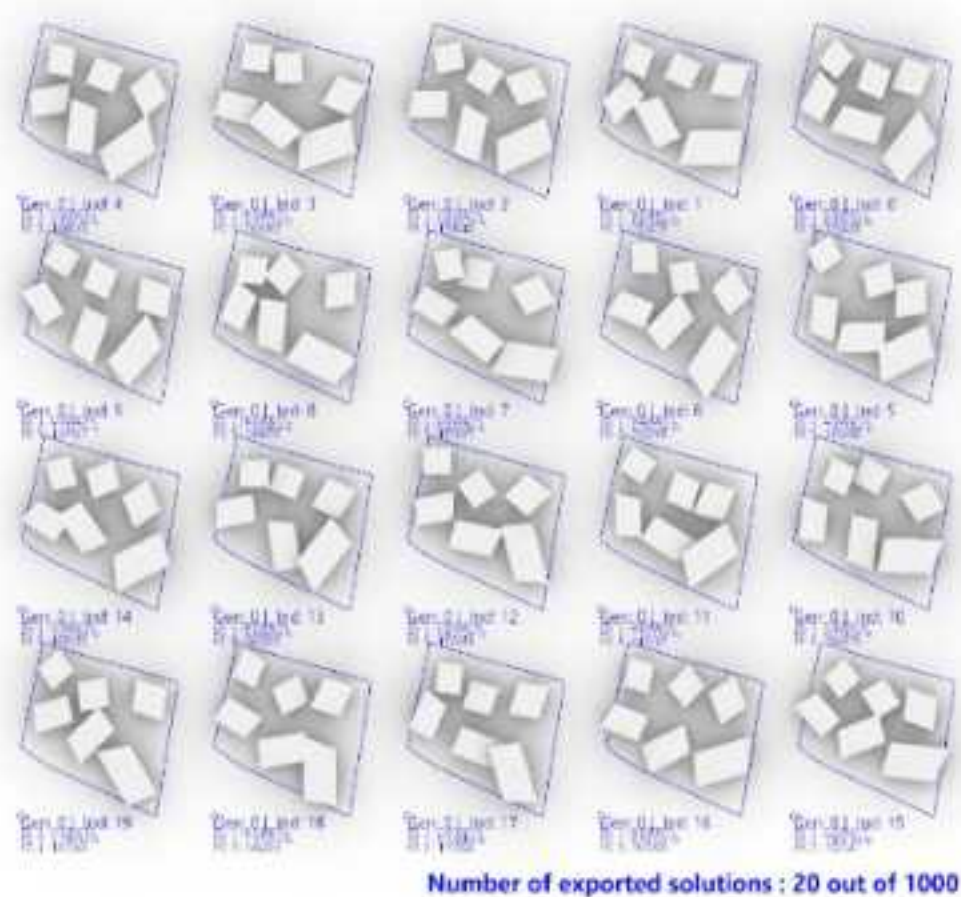
Rys. 11.12. Rozwiązania Pareto, widok z góry.



Rys. 11.13. Rozwiązania Pareto, aksonometria.

Porównanie rozwiązań z pierwszej i ostatniej generacji (Rys. 11.14., 11.15., 11.16. i 11.17.) pokazało, że największe zróżnicowanie występuje na początku, kiedy algorytm losowo generuje kombinacje. W miarę postępu procesu warianty zaczynają się do siebie upodabniać, koncentrując się wokół frontu

Pareto. Taki przebieg jest typowy dla ewolucyjnych algorytmów wielokryterialnych i potwierdza ich poprawne działanie (Zitzler et al., 2000).



Rys. 11.14. Rozwiązania pierwszej generacji, widok z góry.

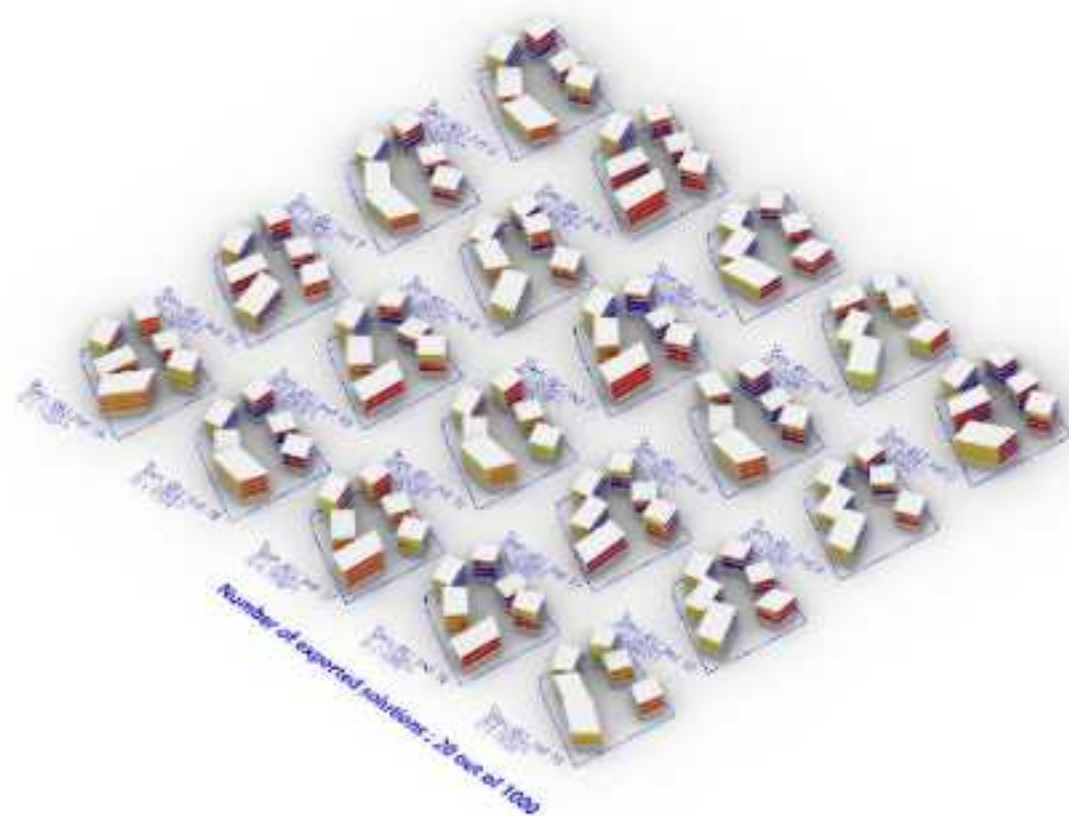


Rys. 11.15. Rozwiązania pierwszej generacji, aksonometria.



Number of exported solutions : 20 out of 1000

Rys. 11.16. Rozwiązania ostatniej generacji, widok z góry.



Rys. 11.17. Rozwiązania ostatniej generacji, aksonometria.

11.4. Wnioski

Podsumowując, analiza wyników pozwoliła wyodrębnić zestaw rozwiązań kompromisowych, które zachowują równowagę pomiędzy celami: nasłonecznieniem zimowym i w równonoc oraz ograniczeniem przegrzewania latem. Analiza frontu Pareto w Wallacei X pozwoliła wskazać rozwiązania równoważące wszystkie cele. Co ważne, proces nie dostarczył jednego najlepszego wariantu, ale zbiór rozwiązań kompromisowych, z których wybór zależy od priorytetów projektowych. Wynik pokazuje, że wielokryterialna optymalizacja w architekturze może być traktowana jako narzędzie wspierające, a nie zastępujące decyzję projektanta (Bonenberg, 2019).

12. ETAP II – 4 BRYŁY

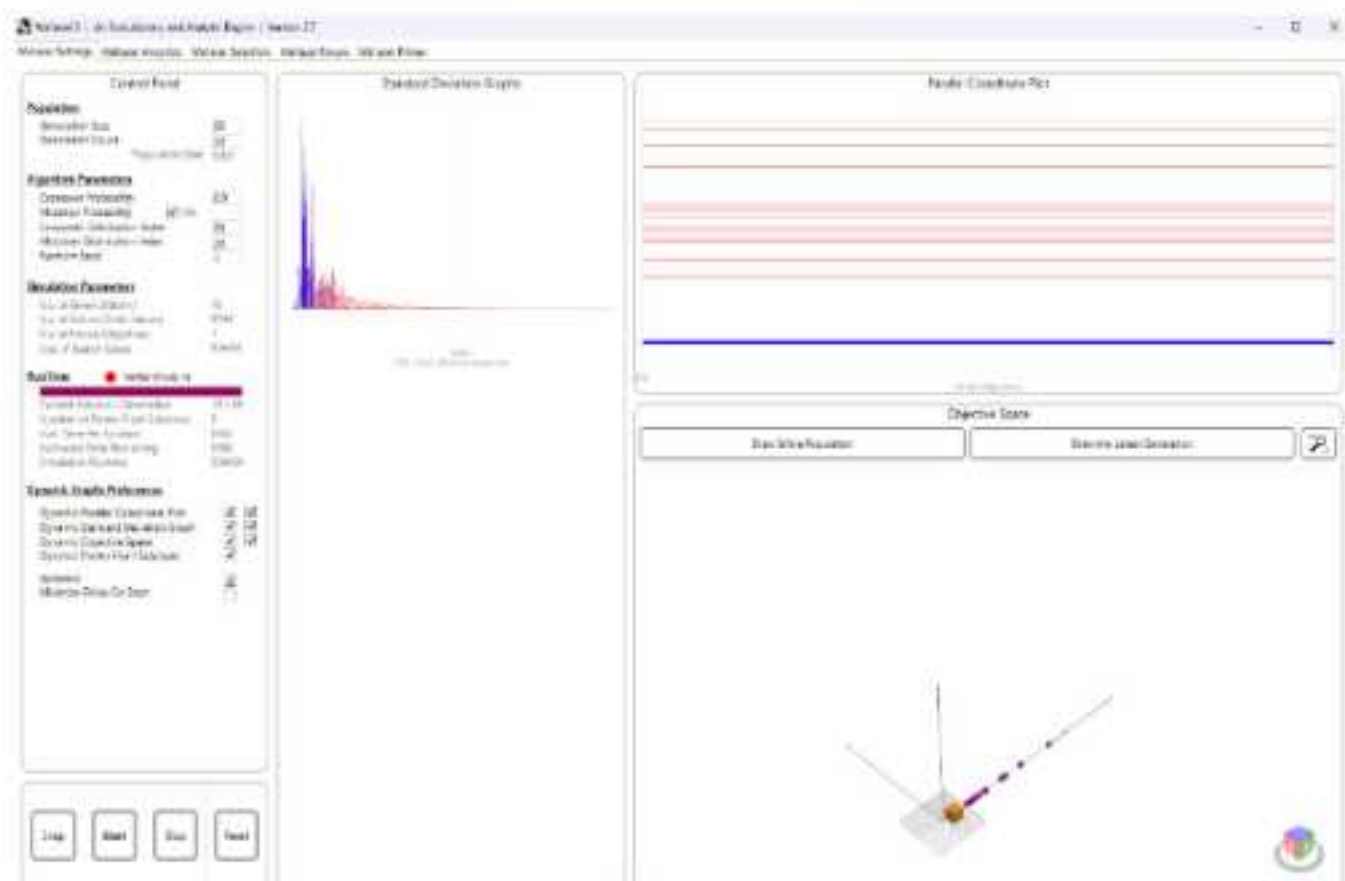
12.1. Punkt wyjściowy

W drugim etapie procesu badawczego zakres analiz zawężono do czterech brył, które powstały w wyniku wcześniejszej selekcji. Były one efektem redukcji wariantów na podstawie etapu I i stanowiły bardziej zwartą bazę wyjściową do szczegółowych optymalizacji. Układ ten odzwierciedlał warunki działki i relacje przestrzenne z kampusem Politechniki Gdańskiej. Podobnie jak w pierwszym etapie, głównym celem nie było wskazanie jednej najlepszej formy, lecz analiza przestrzeni rozwiązań oraz identyfikacja trendów w ewolucji populacji.

12.2. Optymalizacja jednokryterialna nasłonecznienia

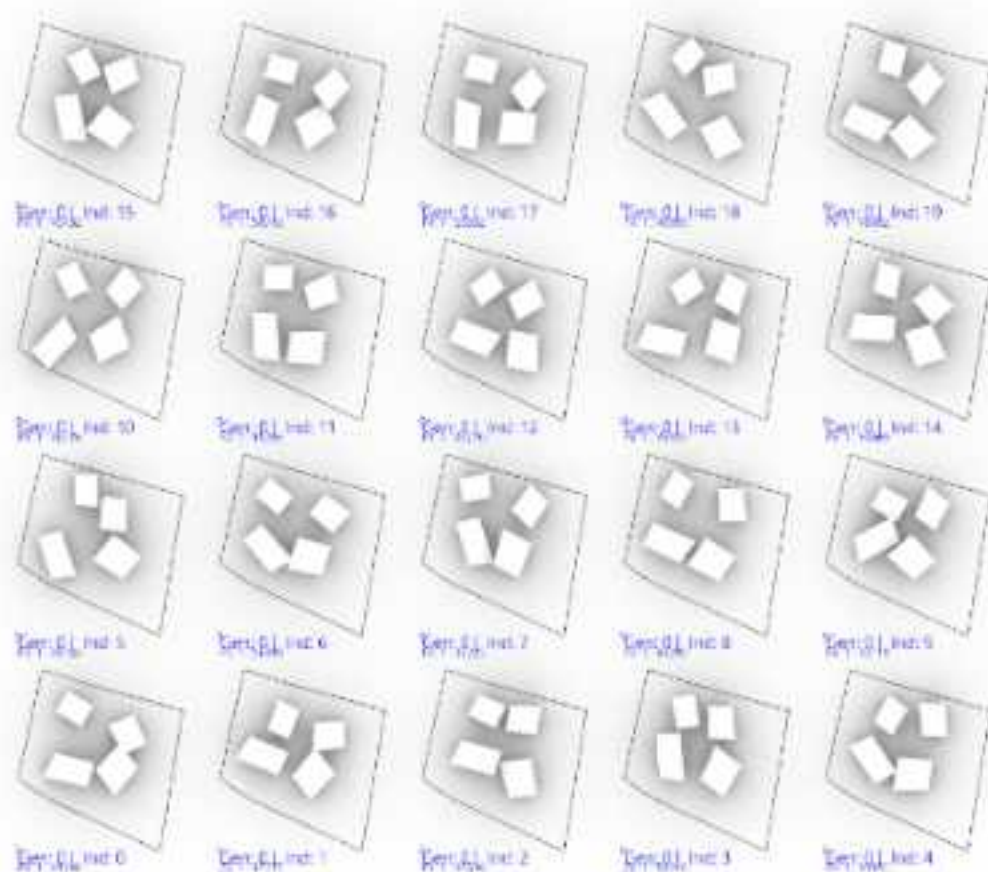
W pierwszej fazie analiz dla czterech brył przeprowadzono optymalizację jednokryterialną w Wallacei X, z dwoma odrębnymi celami maksymalizacją nasłonecznienia zimą i minimalizacją przegrzewania latem.

Na rys. 12.1. przedstawiono ustawienia algorytmu dla minimalizacji nasłonecznienia latem. Wygenerowano 1000 rozwiązań w 50 pokoleniach, przy populacji składającej się z 20 wariantów. Parametry krzyżowania i mutacji pozostawiono na wartościach domyślnych, jak w poprzednim etapie.



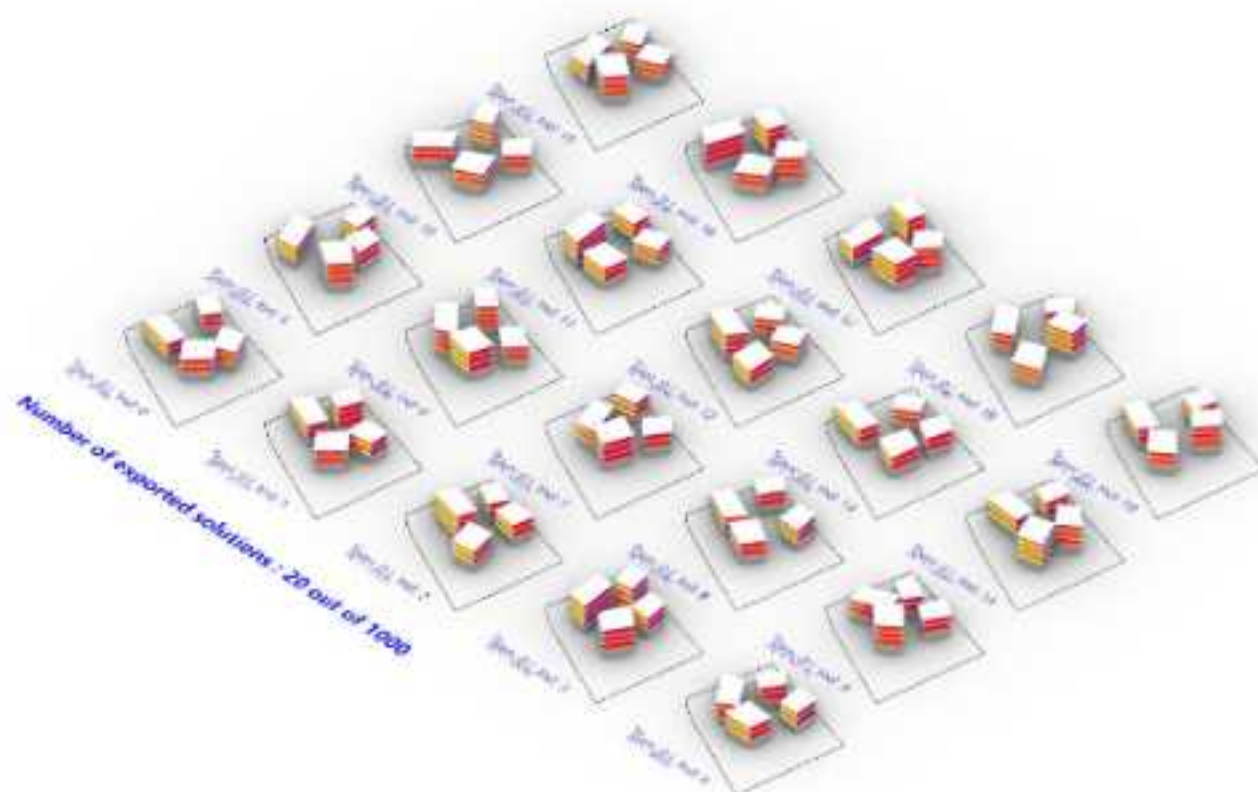
Rys. 12.1. Ustawienia i wyniki optymalizacji jednokryterialnej (minimalizacja nasłonecznienia latem).

Na poniższych grafikach widoczne jest, że w pierwszych generacjach populacja charakteryzowała się dużym zróżnicowaniem form (rys. 12.2., 12.3.), natomiast w końcowych generacjach dominowały już rozwiązania powtarzalne i bardziej do siebie zbliżone (rys. 12.4., 12.5).



Number of exported solutions : 20 out of 1000

Rys. 12.2. Widok z góry rozwiązań pierwszej generacji (minimalizacja nasłonecznienia latem).

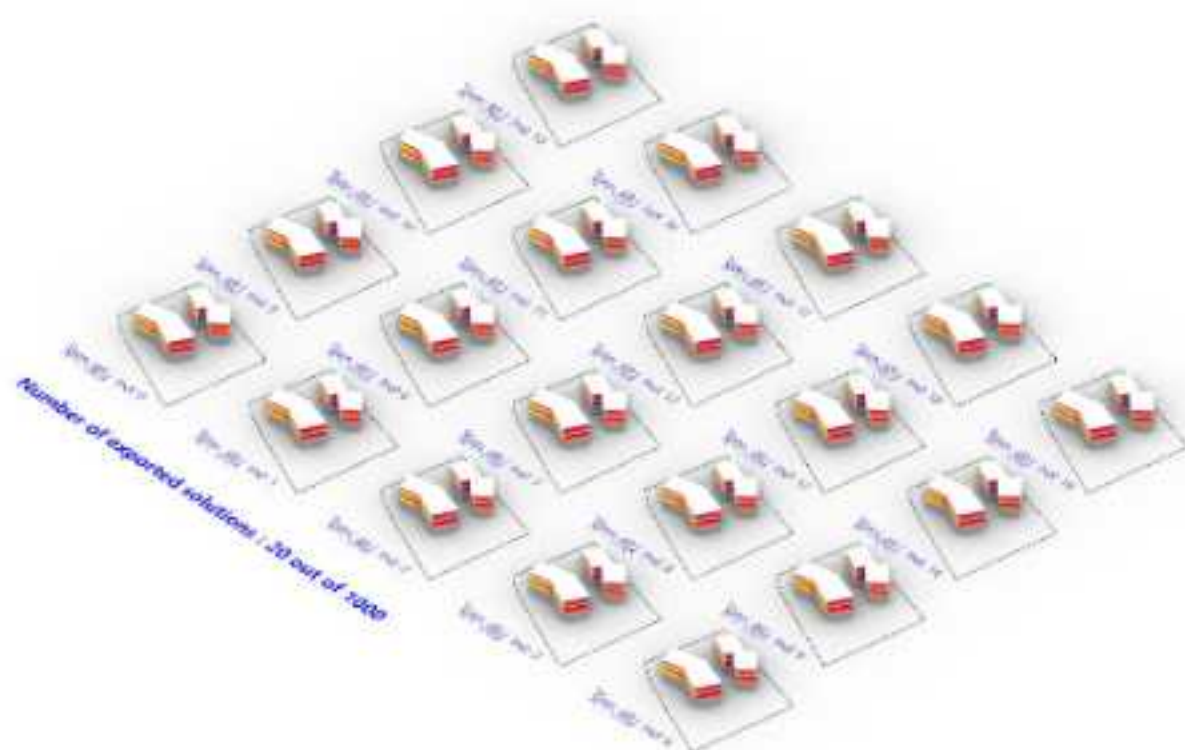


Rys. 12.3. Aksonometria rozwiązań pierwszej generacji (minimalizacja nasłonecznienia latem).



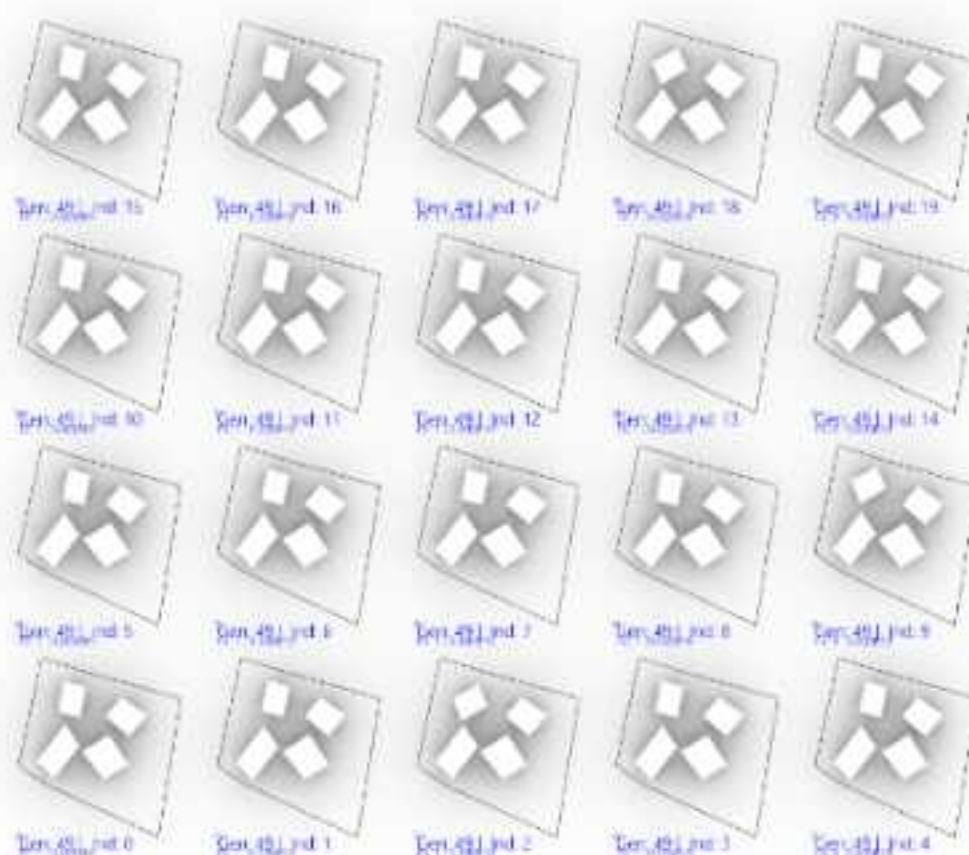
Number of exported solutions : 20 out of 1000

Rys. 12.4. Widok z góry rozwiązań ostatniej generacji (minimalizacja nasłonecznienia latem).



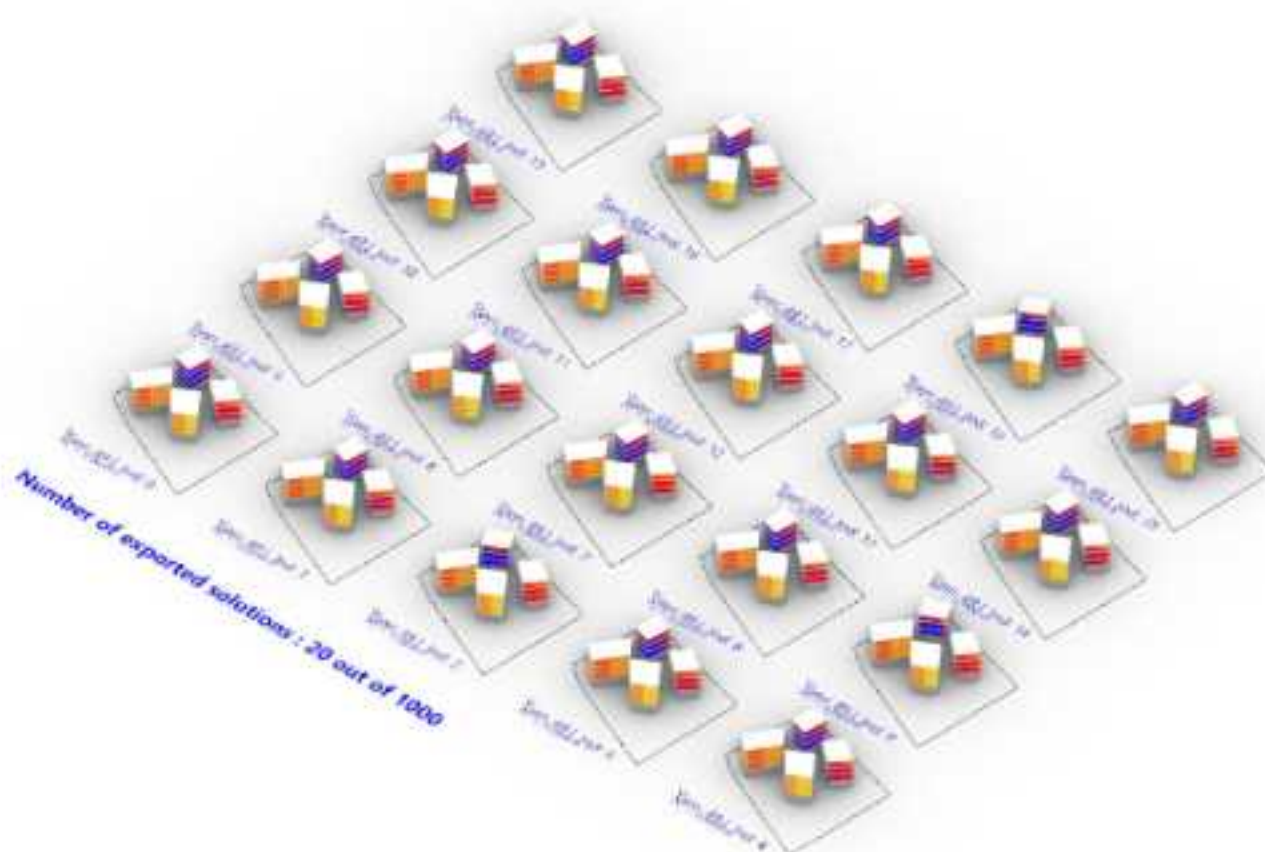
Rys. 12.4. Aksonometria rozwiązań ostatniej generacji (minimalizacja nasłonecznienia latem).

Analogiczne obserwacje poczyniono w przypadku maksymalizacji zimowego nasłonecznienia (rys. 12.5., 12.6., 12.7., 12.8.). W tym scenariuszu preferowane były bardziej otwarte układy, zapewniające dostęp promieni słonecznych do wnętrza i centralnej przestrzeni między bryłami.

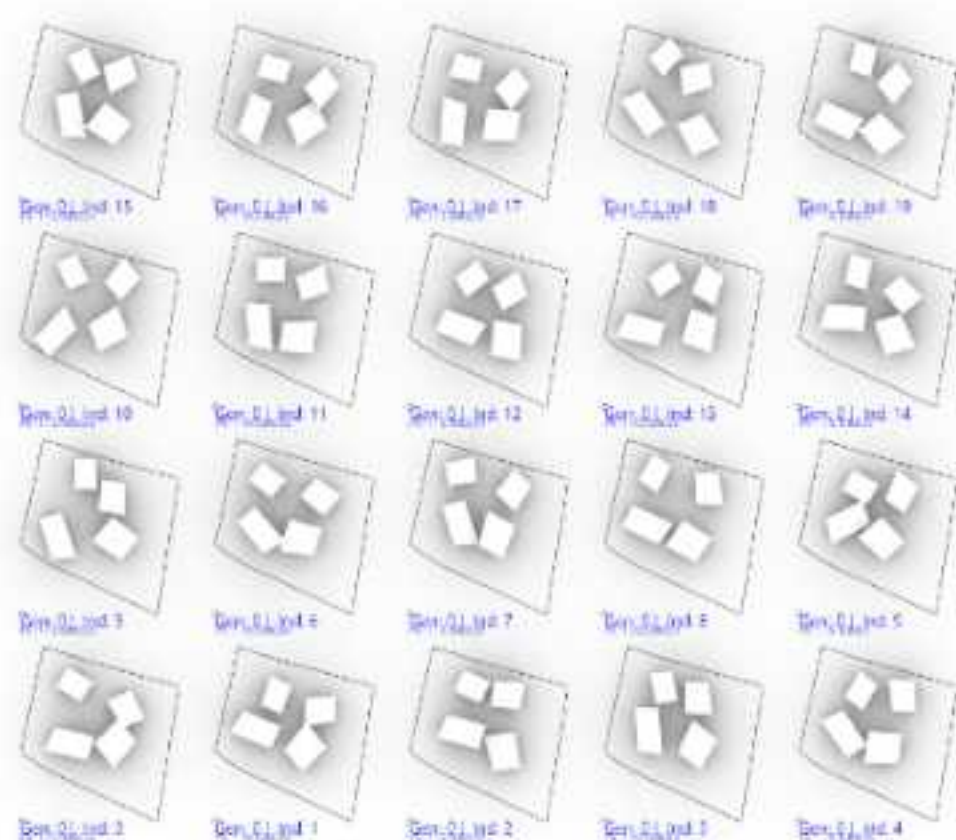


Number of exported solutions : 20 out of 1000

Rys. 12.5. Widok z góry rozwiązań ostatniej generacji (maksymalizacja nasłonecznienia zimą).

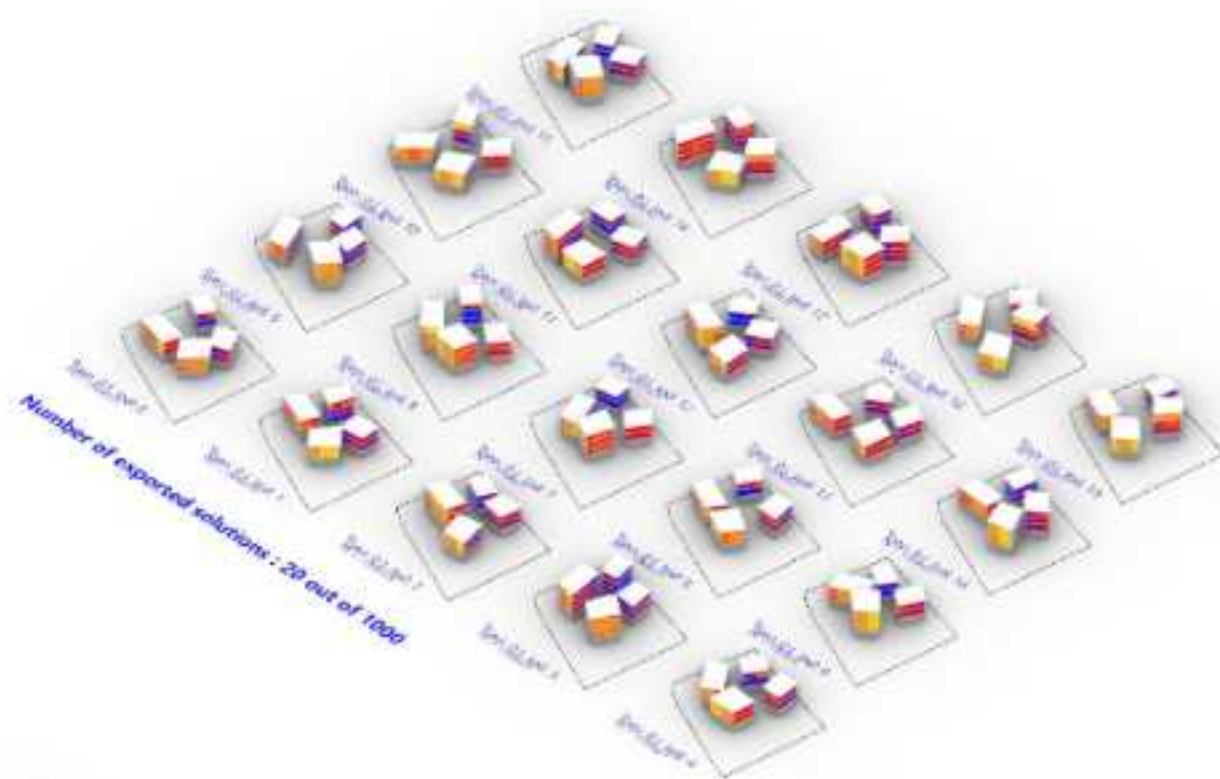


Rys. 12.6. Aksonometria rozwiązań ostatniej generacji (maksymalizacja nasłonecznienia zimą).



Number of exported solutions : 20 out of 1000

Rys. 12.5. Widok z góry rozwiązań pierwszej generacji (maksymalizacja nasłonecznienia zimą).



Rys. 12.6. Aksonometria rozwiązań pierwszej generacji (maksymalizacja nasłonecznienia zimą).

12.3. Optymalizacja wielokryterialna nasłonecznienia

12.3.1. Dane wejściowe

W analizach wykorzystano dane klimatyczne z pliku EPW dla Gdańska (stacja Port Północny IMGW). Uwzględniono trzy dni referencyjne: przesilenie zimowe, równonoc oraz przesilenie letnie, w godzinach od 8:00 do 16:00. Identycznie jak w przypadku pierwszego etapu.

12.3.2. Cele (fitness functions)

Zdefiniowane funkcje celu obejmowały: maksymalizację nasłonecznienia w zimie, maksymalizację nasłonecznienia w równonoc, minimalizację nasłonecznienia latem.

12.3.3. Zmienne projektowe

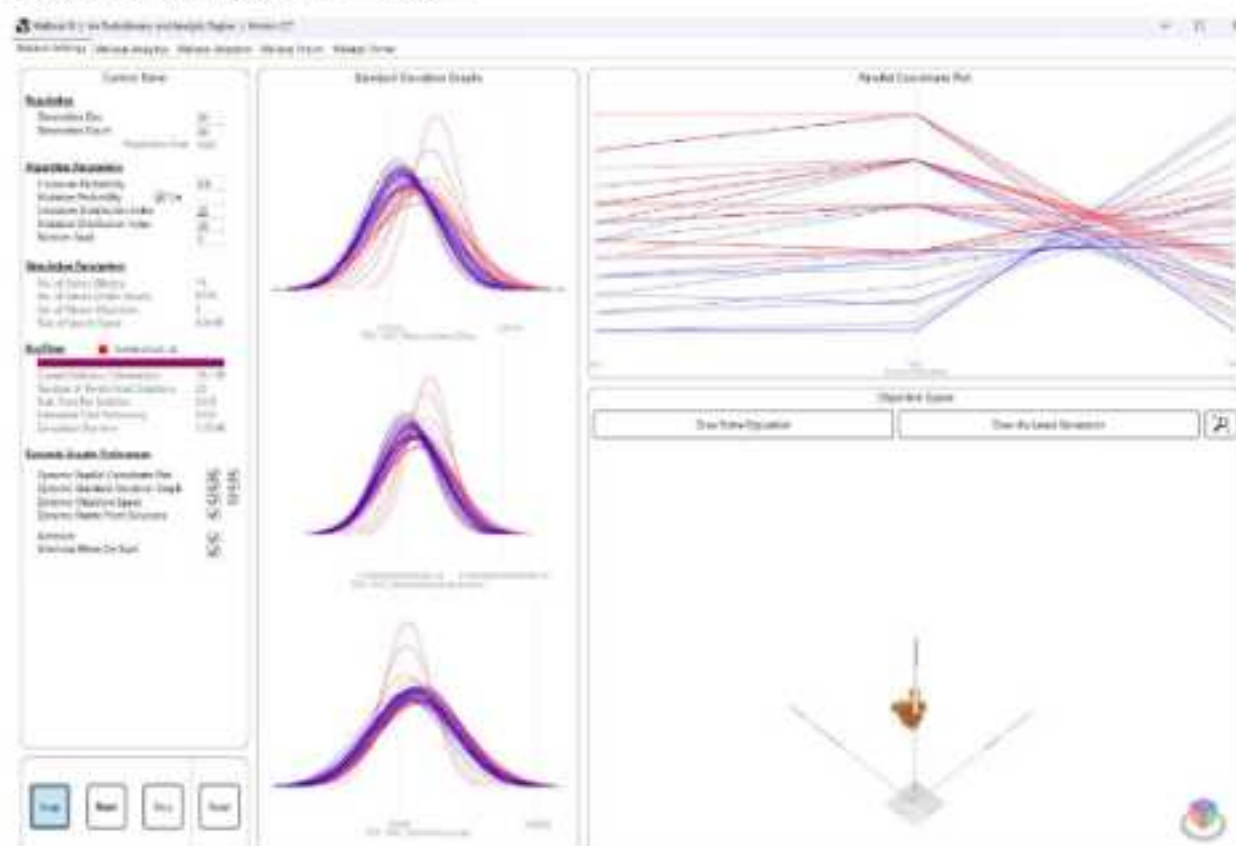
Zmiennymi były: orientacja i poruszanie się brył w obrębie działki, liczba kondygnacji (maks. 4), a także wielkość wysunięć stropów (do 1,0 m).

12.3.4. Konfiguracja algorytmu i symulacja

Optymalizację przeprowadzono w środowisku Wallacei X, korzystając z algorytmu NSGA-II. Łącznie wygenerowano 1000 rozwiązań w 50 pokoleniach, przy 20 wariantach na każde pokolenie.

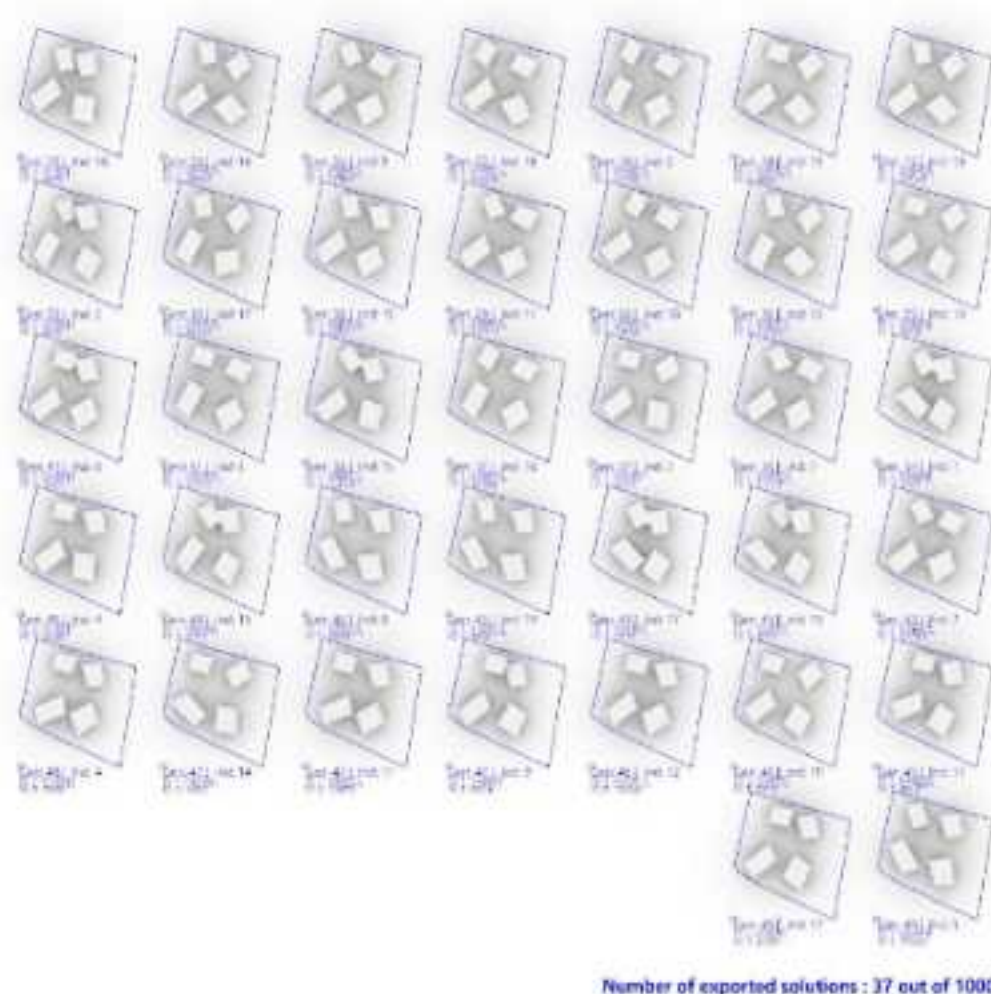
12.3.6. Analiza wyników i metoda wyboru rozwiązań

Na rys. 12.7. pokazano wykresy typu *parallel coordinates plot*, które ukazują kompromisy pomiędzy celami. Widać wyraźnie, że poprawa warunków zimowych odbywała się kosztem zwiększonego przegrzewania latem.



Rys. 12.7. Podsumowanie optymalizacji multikryterialnej.

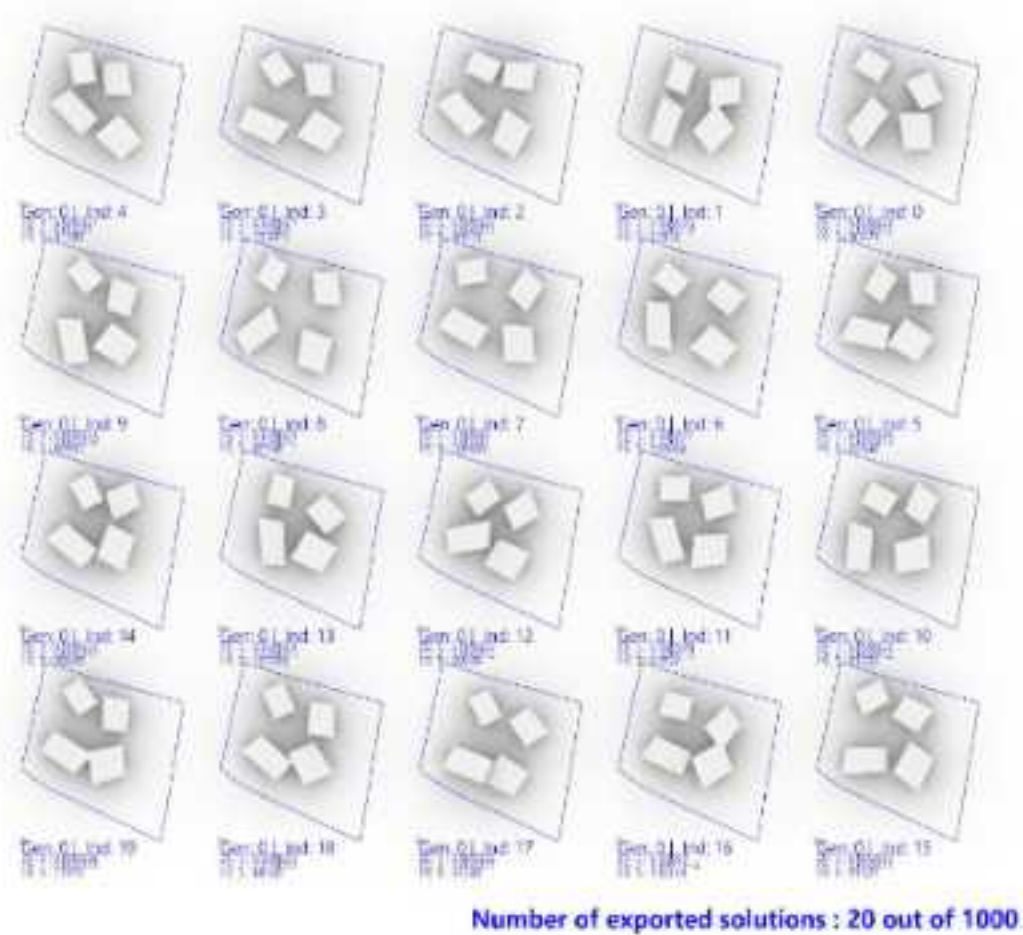
Na rys. 12.8. i 12.9. przedstawiono zbiór rozwiązań Pareto, 37 wariantów z 1000, które reprezentują najbardziej zrównoważone kombinacje. Dalej przedstawiono pierwszą i ostatnią generację (rys. 12.9., 12.10., 12.11., 12.12.)



Rys. 12.8. Rozwiązania Pareto, widok rozwiązań z góry.



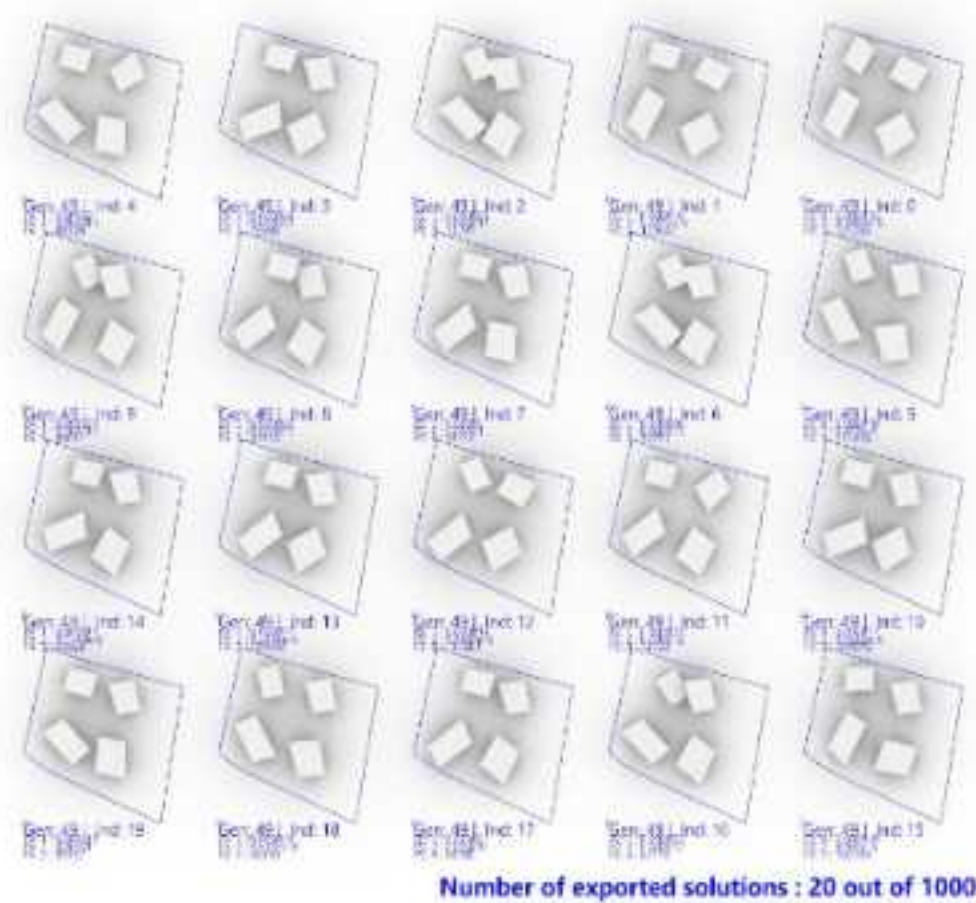
Rys. 12.8. Rozwiązania Pareto, aksonometria rozwiązań.



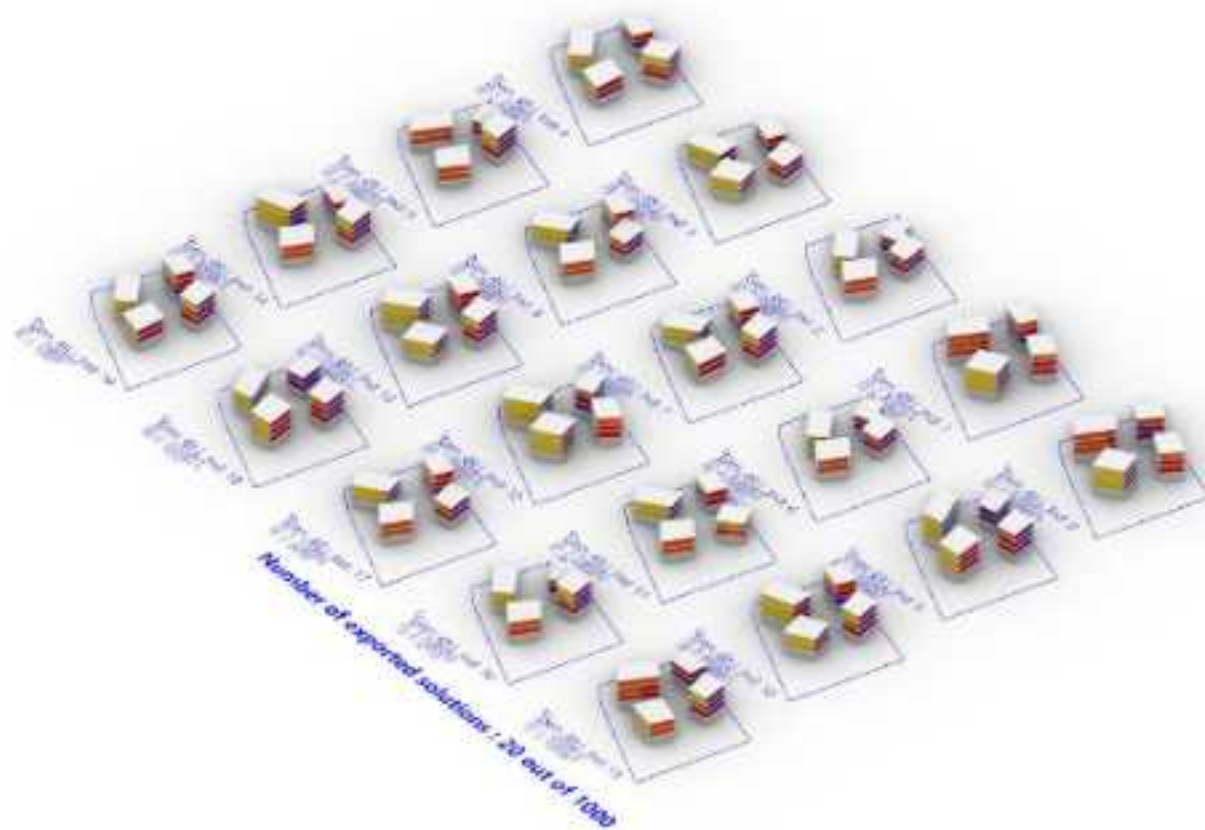
Rys. 12.9. Pierwsza generacja, widok z góry.



Rys. 12.10. Pierwsza generacja, aksonometria.



Rys. 12.11. Ostatnia generacja, widok z góry.



Rys. 12.12. Ostatnia generacja, aksonometria.

12.4. Wnioski

Etap II potwierdził wnioski z pierwszego etapu, wskazując na konflikt pomiędzy warunkami zimowymi i letnimi. Optymalizacja jednokryterialna pozwoliła zrozumieć charakterystykę skrajnych rozwiązań, natomiast optymalizacja wielokryterialna umożliwiła identyfikację zestawu rozwiązań kompromisowych.

13. ETAP III – 3 BRYŁY

13.1. Punkt wyjściowy

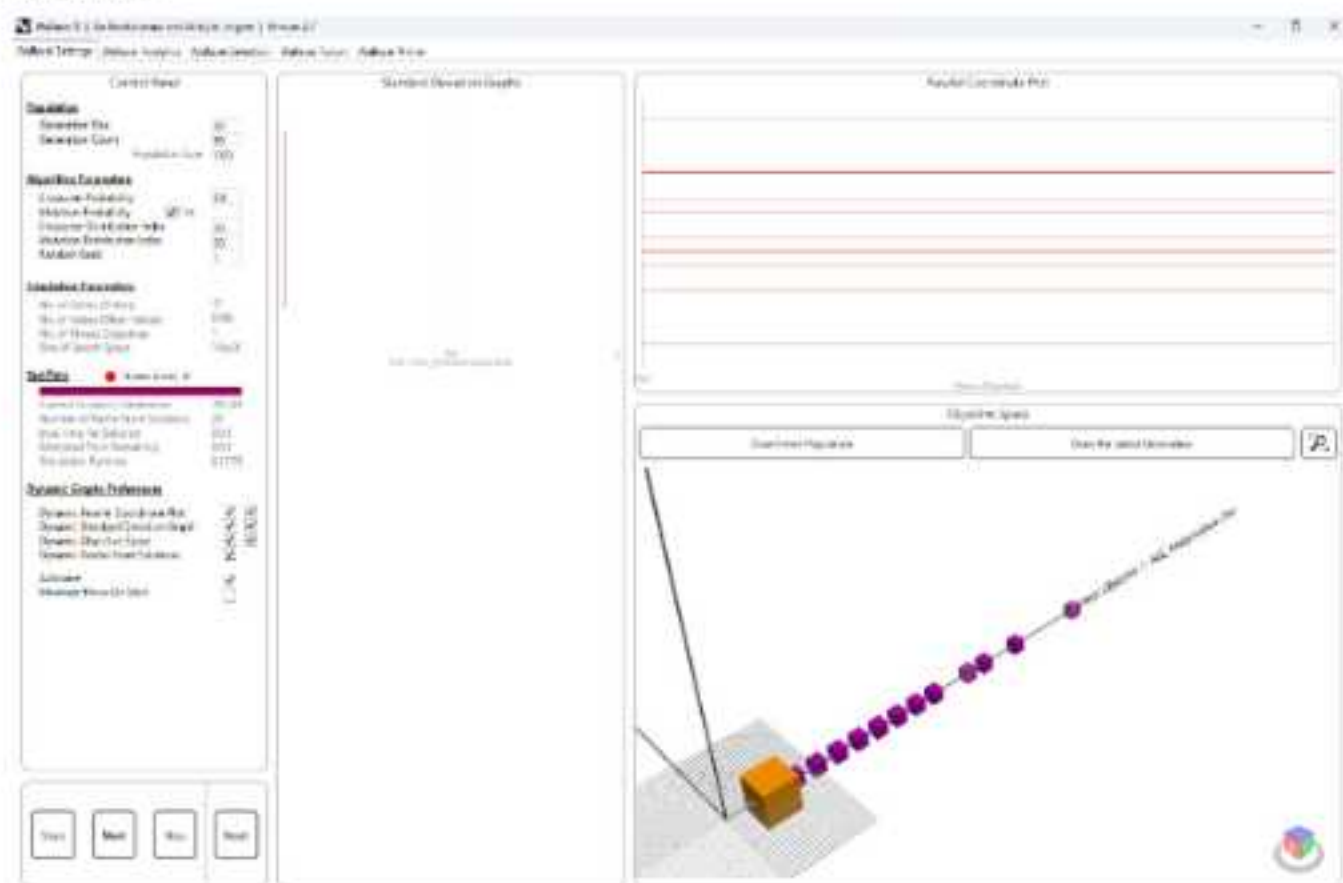
W trzecim etapie optymalizacji zakres analiz ograniczono do trzech brył, które stanowią finalny wariant projektowy. Ich układ był wynikiem selekcji przeprowadzonej w etapie II, analizy urbanistycznej działki i wymagań funkcjonalnych projektu.

W pierwszej fazie optymalizacji wszystkie bryły posiadały pełną swobodę ruchu w obrębie działki. W drugiej fazie wprowadzono ograniczenie, bryła południowo-zachodnia została unieruchomiona ze względu na relacje z sąsiednią zabudową. Dzięki temu możliwe było porównanie efektów pełnej swobody z wariantem o dodatkowych ograniczeniach.

13.2. Optymalizacja jednokryterialna nasłonecznienia

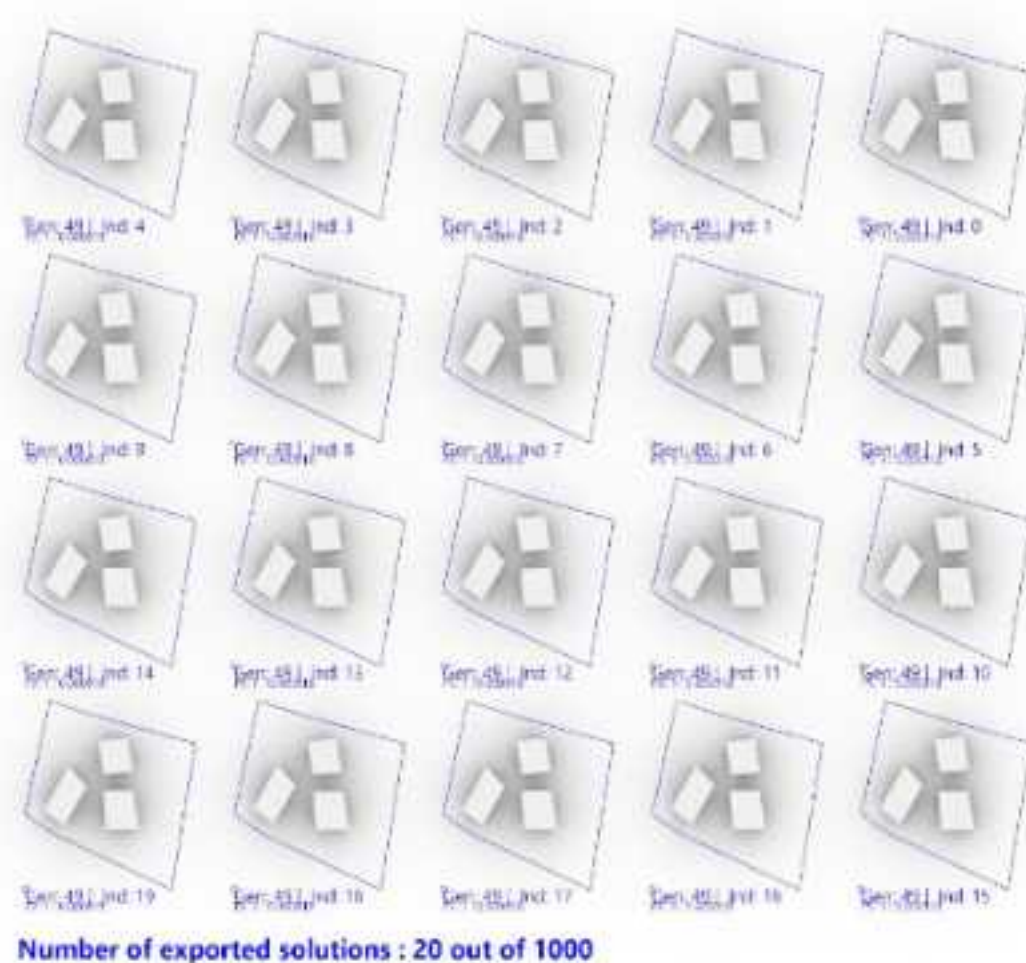
Podobnie jak w poprzednich etapach, najpierw przeprowadzono optymalizację jednokryterialną w środowisku Wallacei X. Analizy objęły dwa cele: maksymalizację nasłonecznienia zimą i minimalizację przegrzewania latem.

Na rys. 13.1. zaprezentowano ustawienia algorytmu oraz przebieg optymalizacji dla maksymalizacji zimą. Wygenerowano 1000 rozwiązań w 50 pokoleniach, każde liczące po 20 wariantów.

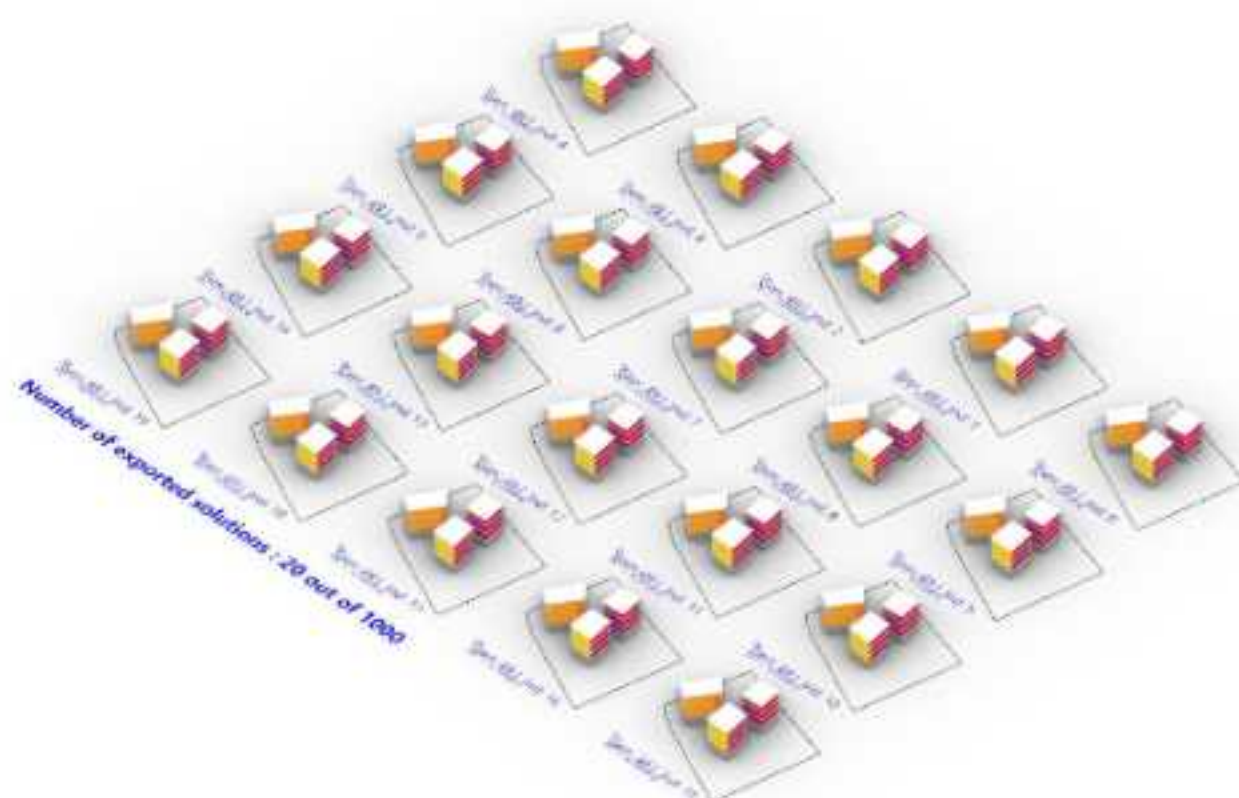


Rys. 13.1. Ustawienia optymalizacji jednokryterialnej, maksymalizacja nasłonecznienia zimą.

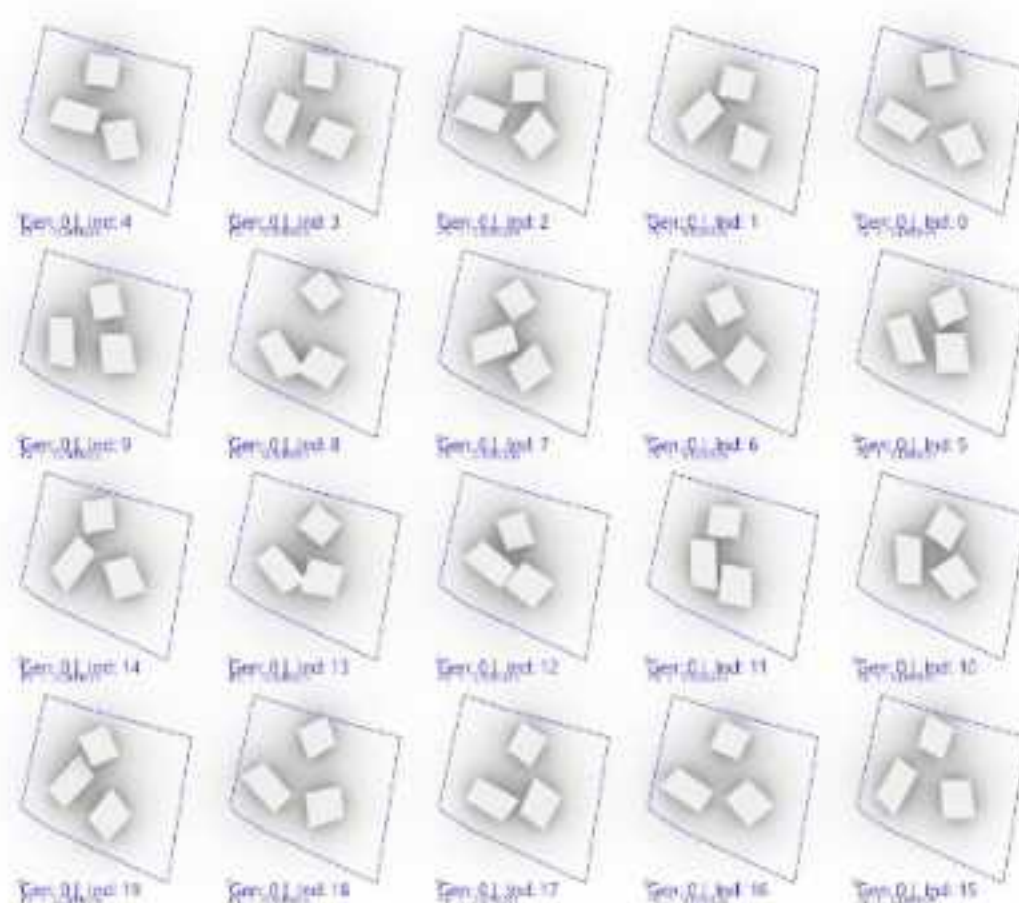
Wyniki (rys. 13.2., 13.3., 13.4., 13.5.) pokazały wyraźne różnice pomiędzy pierwszą a ostatnią generacją. W generacji początkowej rozwiązania cechowały się dużym zróżnicowaniem układów, wynikającym z losowego rozmieszczenia brył. W generacji końcowej warianty stały się bardziej podobne, co świadczy o zbieżności populacji i stabilizacji wyników.



Rys. 13.2. Rozwiązania z ostatniej generacji, widok z góry.

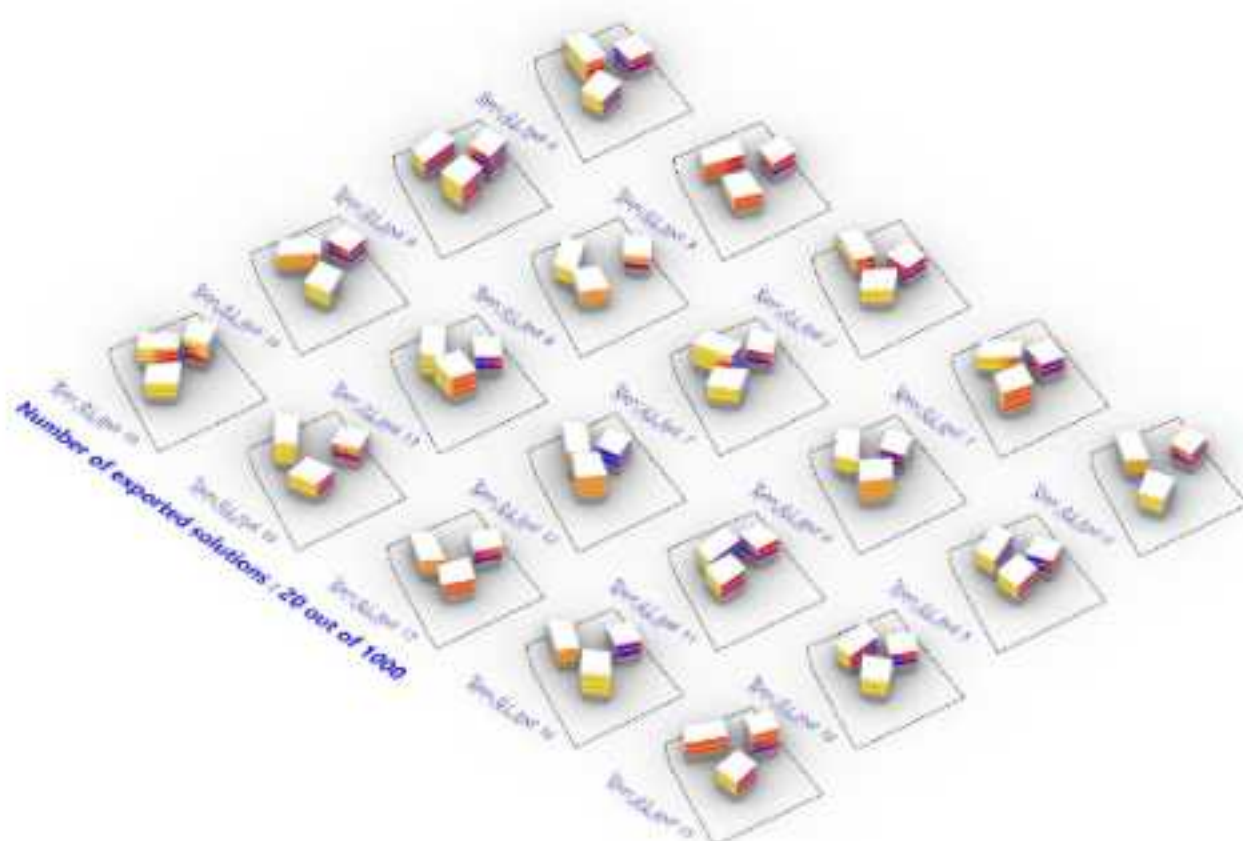


Rys. 13.3. Rozwiązania z ostatniej generacji, aksonometria.



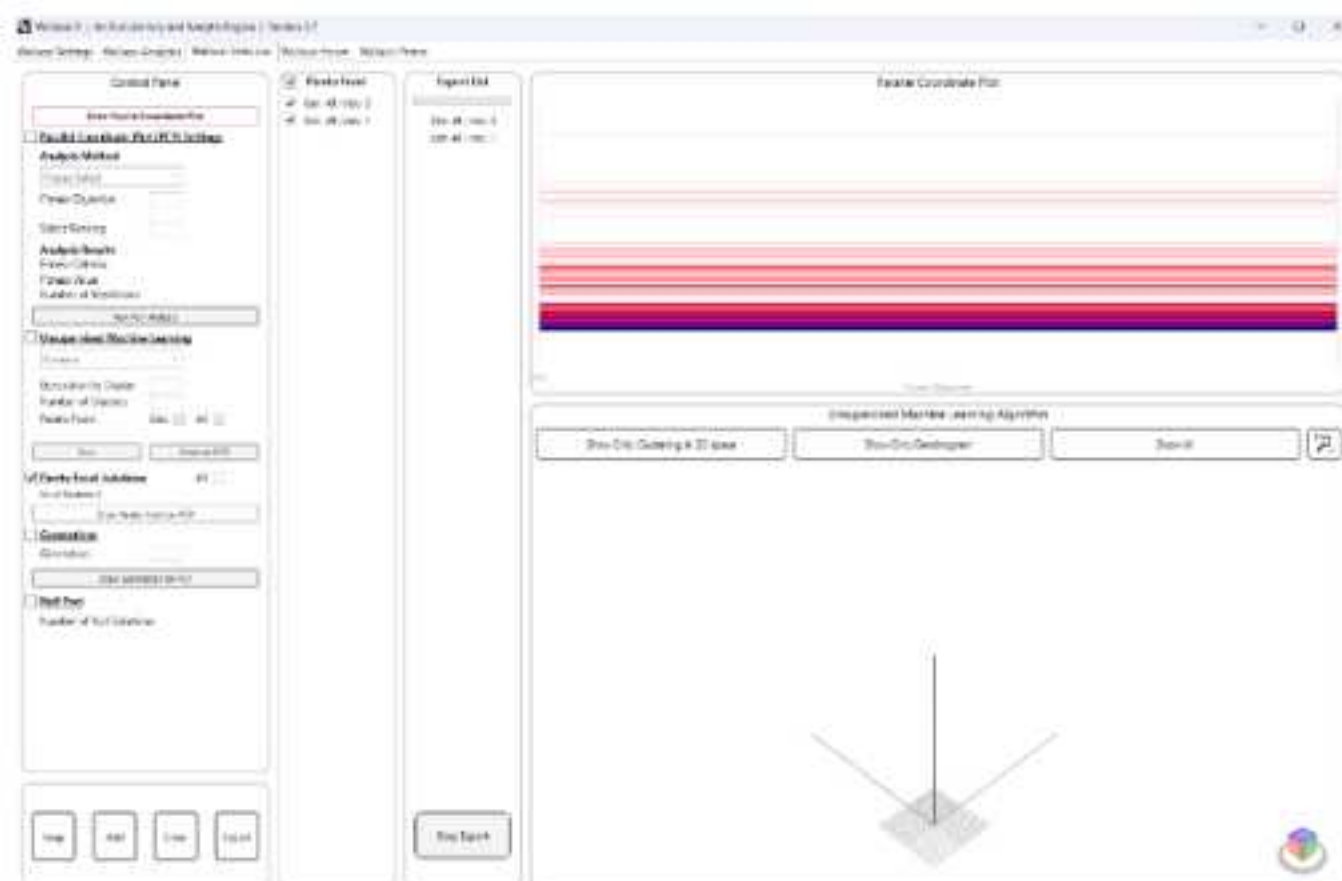
Number of exported solutions : 20 out of 1000

Rys. 13.4. Rozwiązania z pierwszej generacji, widok z góry.

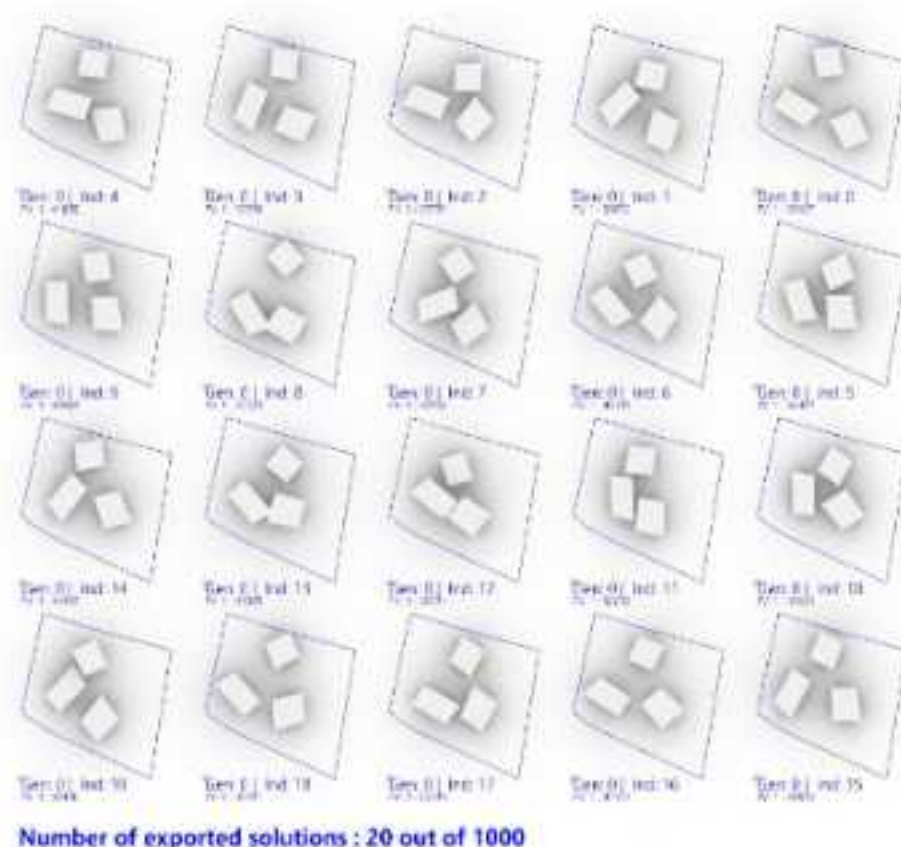


Rys. 13.5. Rozwiązania z pierwszej generacji, aksonometria.

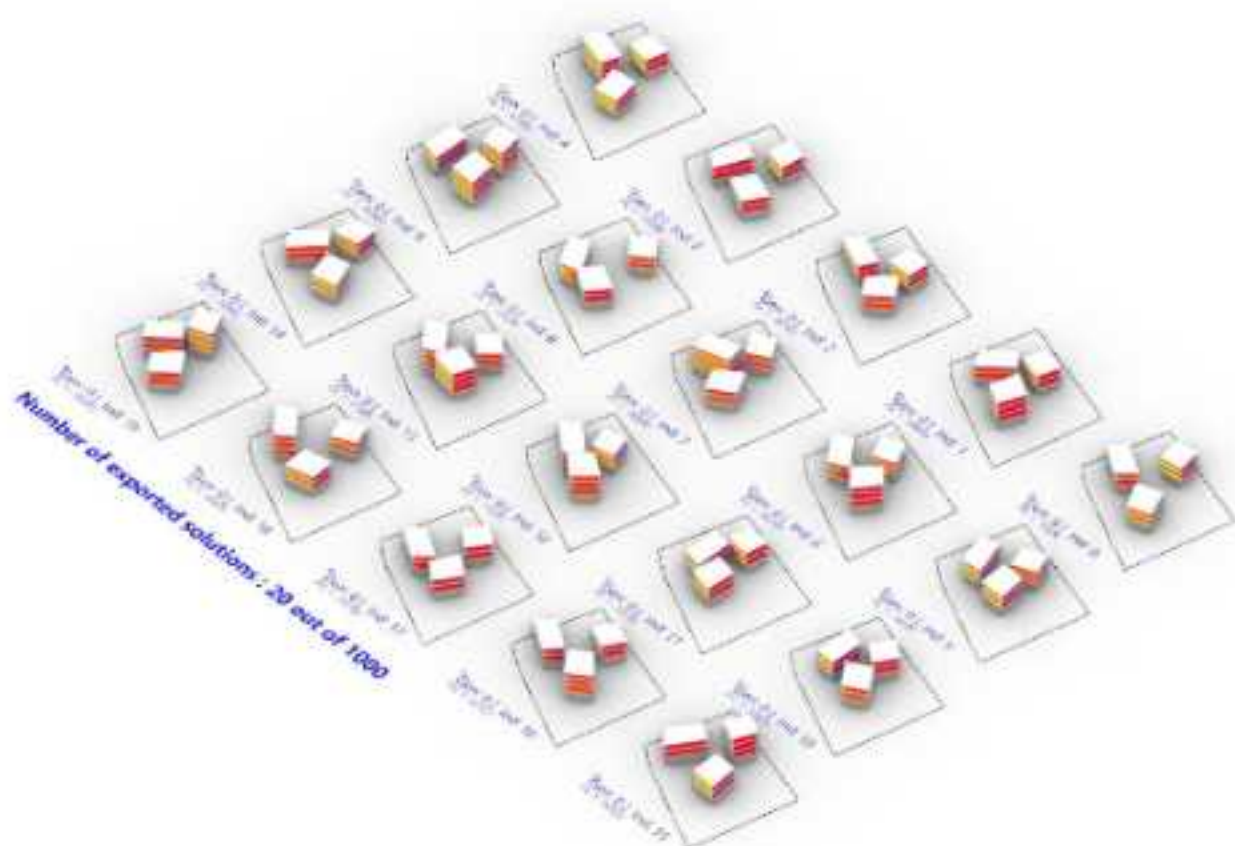
W przypadku minimalizacji przegrzewania latem (rys. 13.6., 13.7., 13.8., 13.9., 13.10.) uzyskano odmienne rezultaty: rozwiązania były bardziej zwarte, z ograniczoną ekspozycją na promieniowanie słoneczne. Warto zaznaczyć, że liczba rozwiązań Pareto w tym przypadku była mniejsza, jedynie dwa warianty, co wskazuje, że algorytm preferował wąską grupę jako najbardziej efektywną dla tego celu.



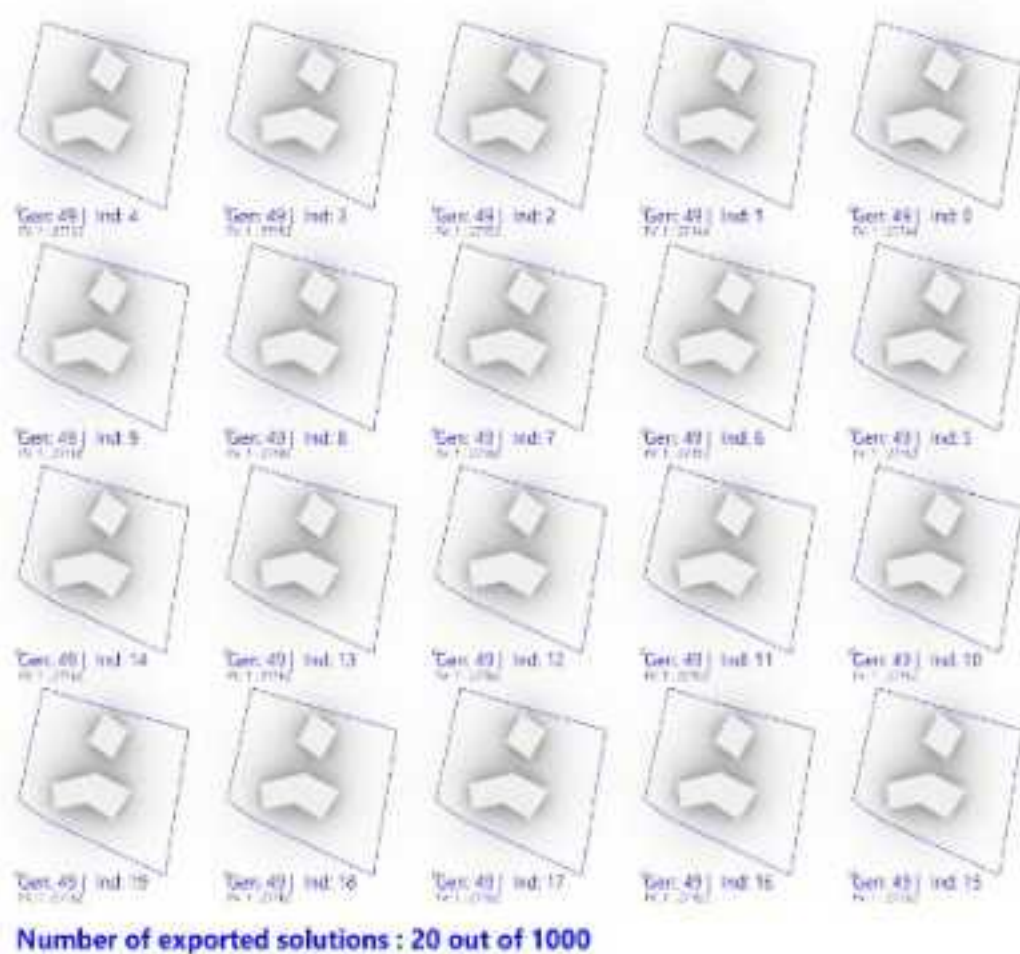
Rys. 13.6. Wyniki optymalizacji minimalizacji nasłonecznienia latem.



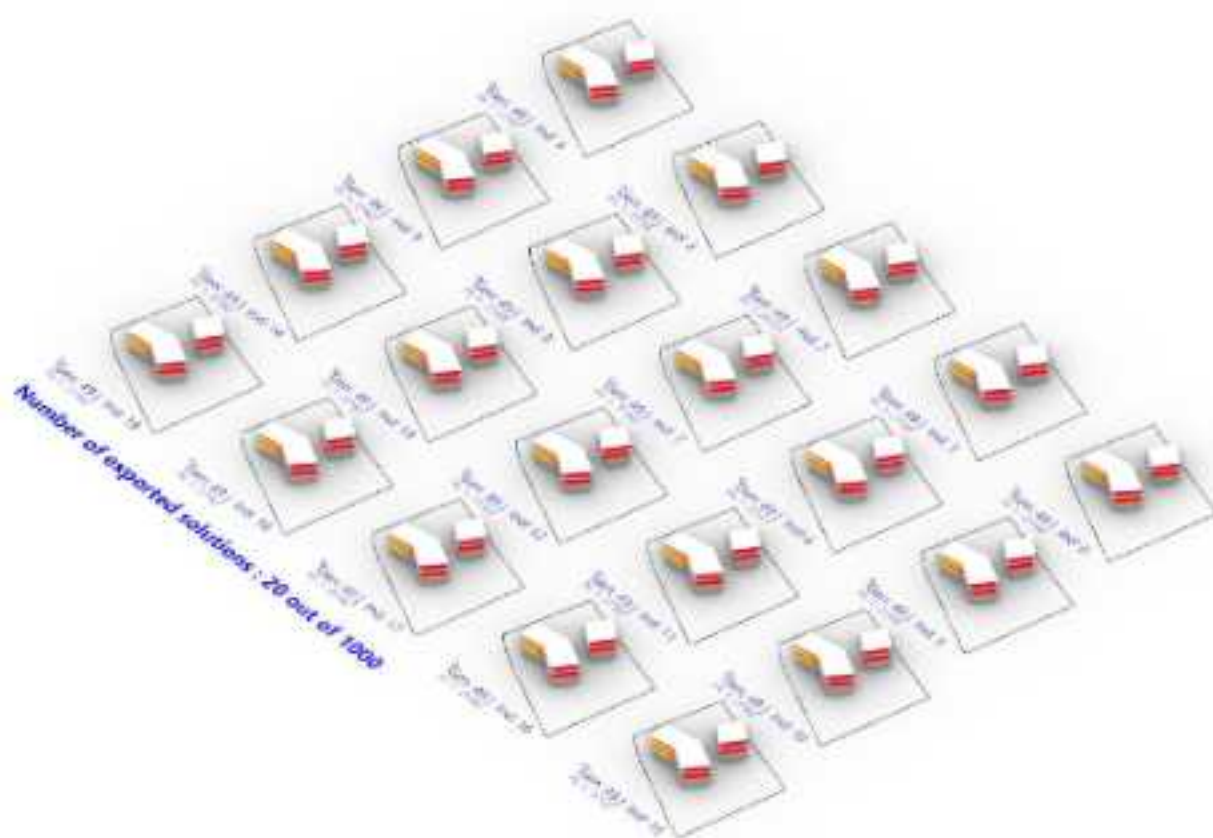
Rys. 13.7. Rozwiązania pierwszej generacji, widok z góry.



Rys. 13.8. Rozwiązania pierwszej generacji, aksonometria.

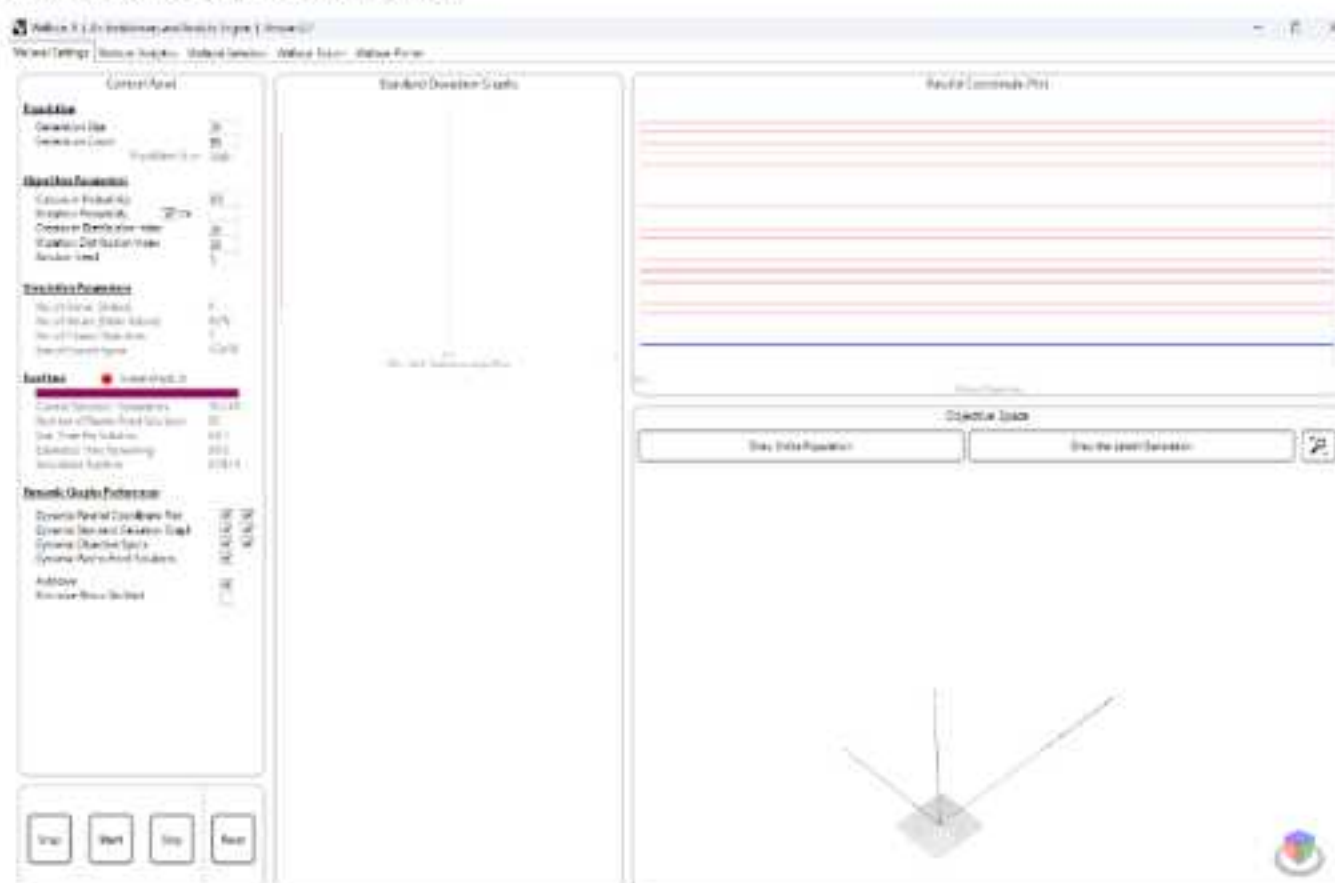


Rys. 13.9. Rozwiązania ostatniej generacji, widok z góry.

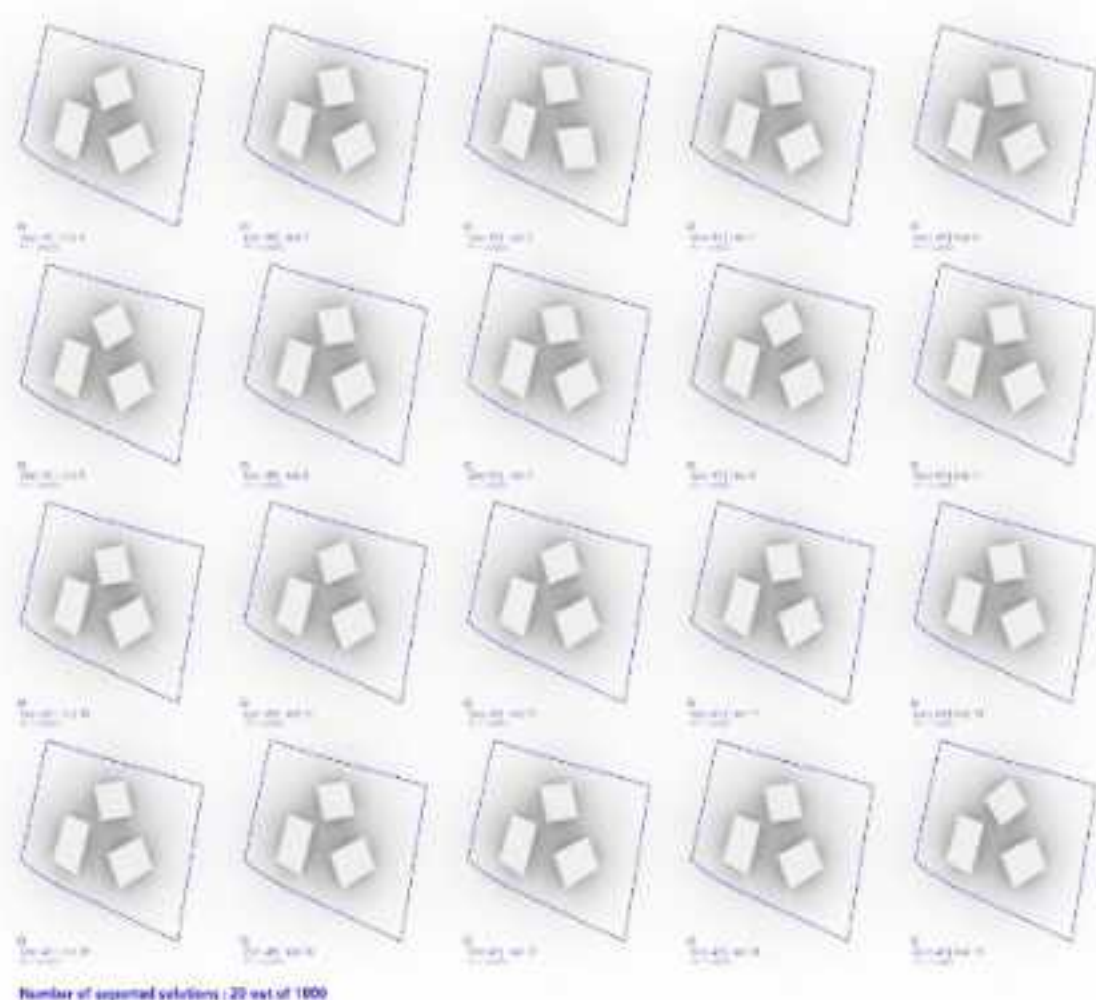


Rys. 13.10. Rozwiązania ostatniej generacji, aksonometria.

Analogiczne obliczenia (13.11., 13.12., 13.13., 13.14., 13.15., 13.16., 13.17., 13.18., 13.19., 13.20., 13.21.) przeprowadzono dla wariantu bez możliwości poruszania bryły południowo-zachodniej, ze względu na uwarunkowania urbanistyczne działki, zwłaszcza zakończenie osi ulicy Siedlickiej.



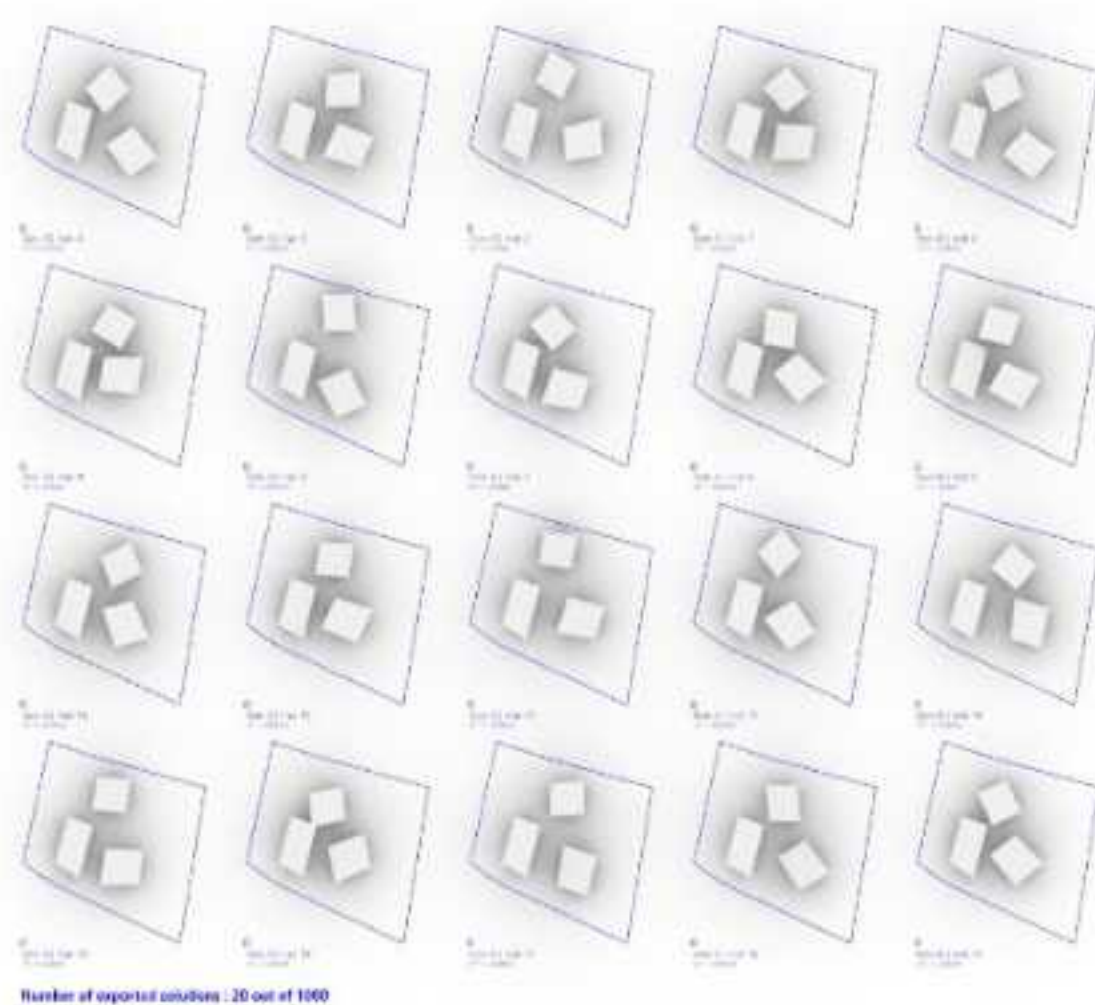
Rys. 13.11. Wyniki optymalizacji pod względem maksymalizacji nasłonecznienia zimą.



Rys. 13.12. Rozwiązania ostatniej generacji, widok z góry.



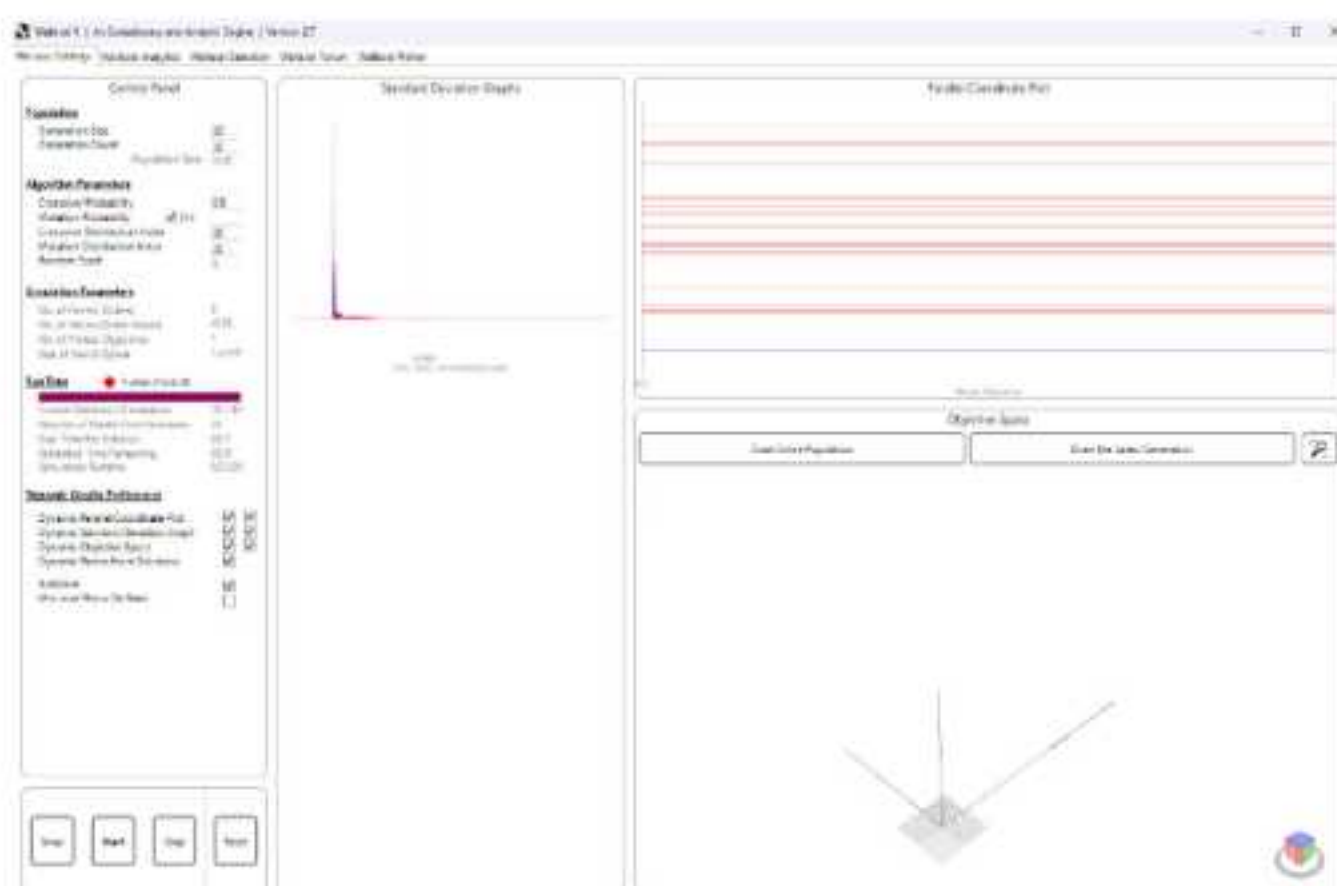
Rys. 13.13. Rozwiązania ostatniej generacji, aksonometria.



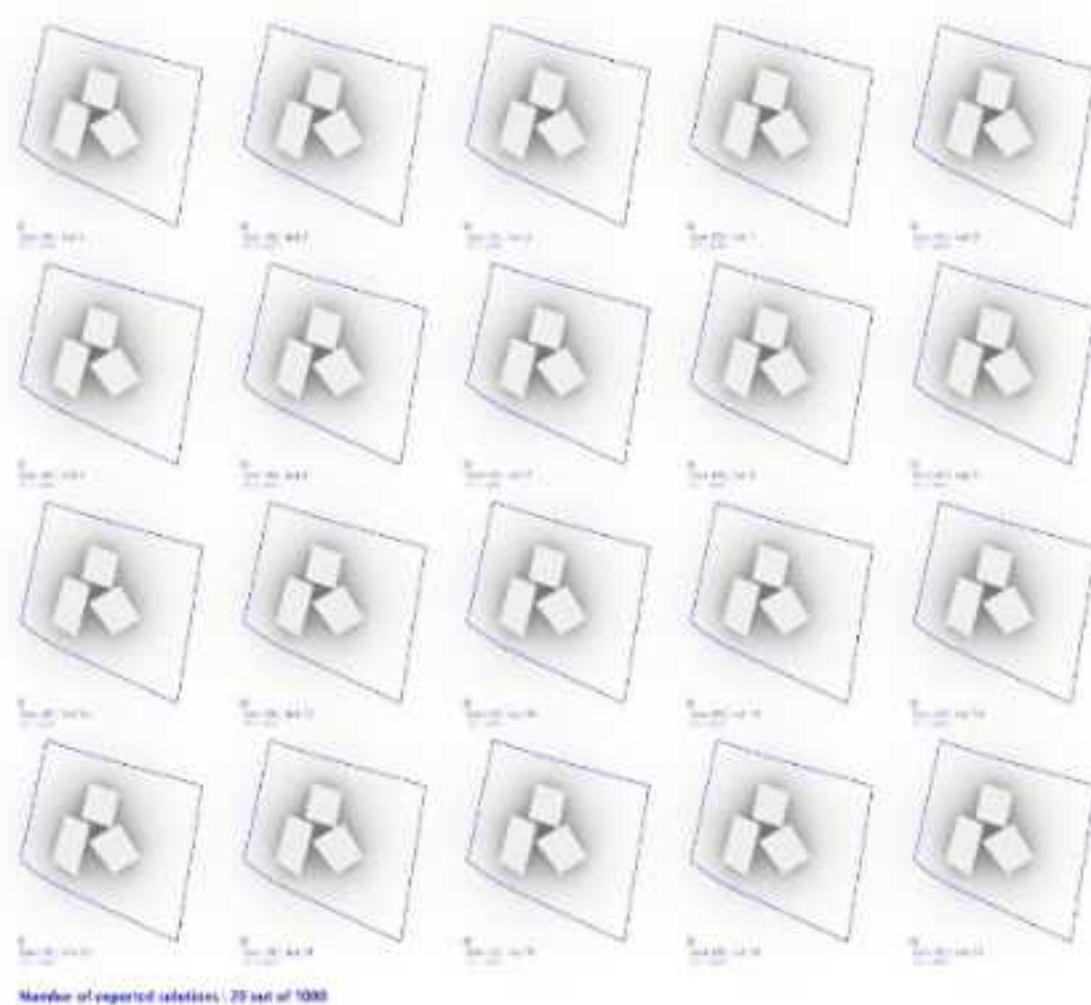
Rys. 13.14. Rozwiązania pierwszej generacji, widok z góry.



Rys. 13.15. Rozwiązania pierwszej generacji, aksonometria.



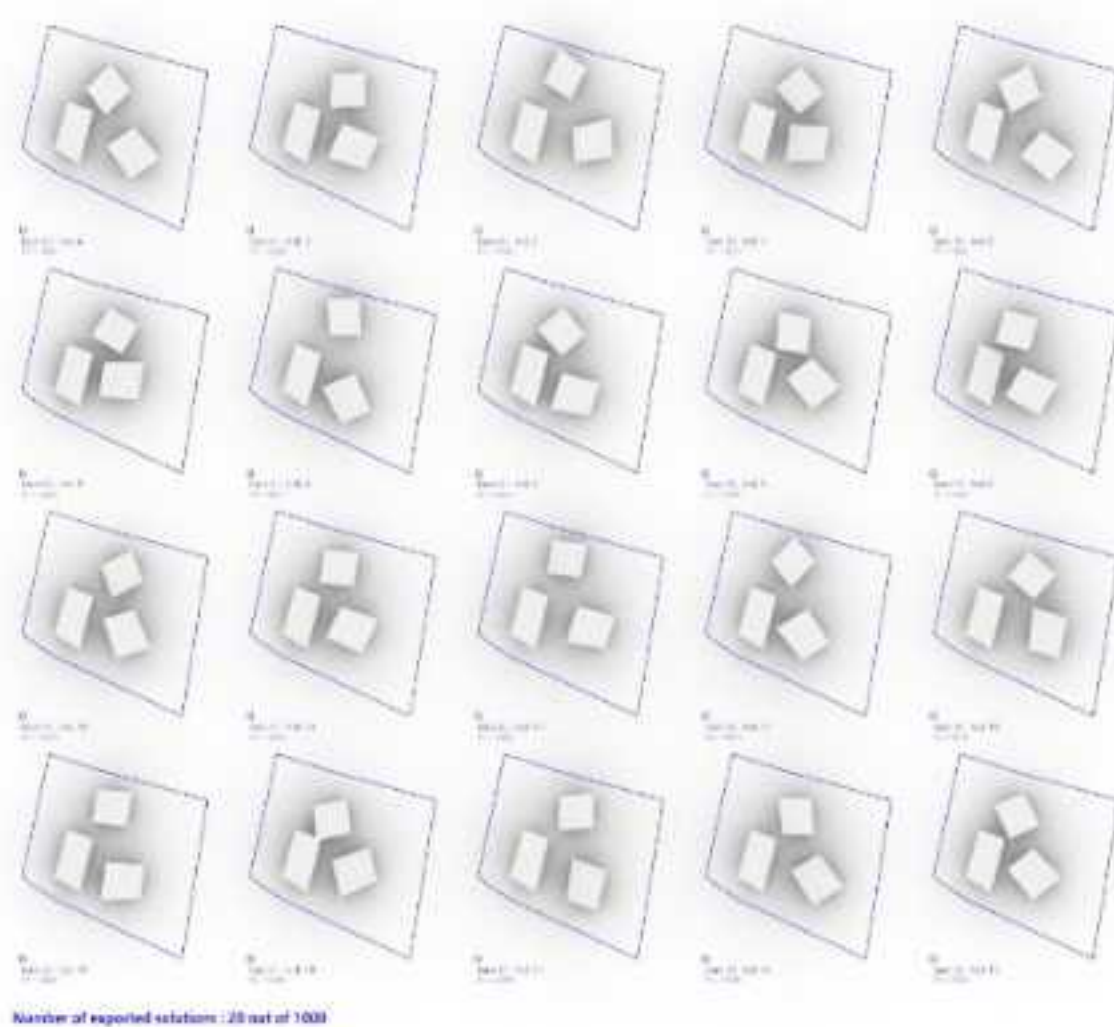
Rys. 13.16. Wyniki optymalizacji pod względem minimalizacji nasłonecznienia latem.



Rys. 13.17. Rozwiązania ostatniej generacji, widok z góry.



Rys. 13.18. Rozwiązania ostatniej generacji, aksonometria.



Rys. 13.19. Rozwiązania pierwszej generacji, widok z góry.



Rys. 13.19. Rozwiązania pierwszej generacji, aksonometria.

13.3. Optymalizacja wielokryterialna nasłonecznienia

13.3.1. Dane wejściowe

Dane klimatyczne pochodziły z pliku EPW dla Gdańska (stacja Port Północny IMGW). Uwzględniono przesilenie zimowe, równonoc oraz przesilenie letnie w godzinach 8-16.

13.3.2. Cele (fitness functions)

Trzy cele optymalizacyjne pozostały niezmiennione: maksymalizacja nasłonecznienia zimą, maksymalizacja nasłonecznienia w równonoc i minimalizacja przegrzewania latem.

13.3.3. Zmienne projektowe

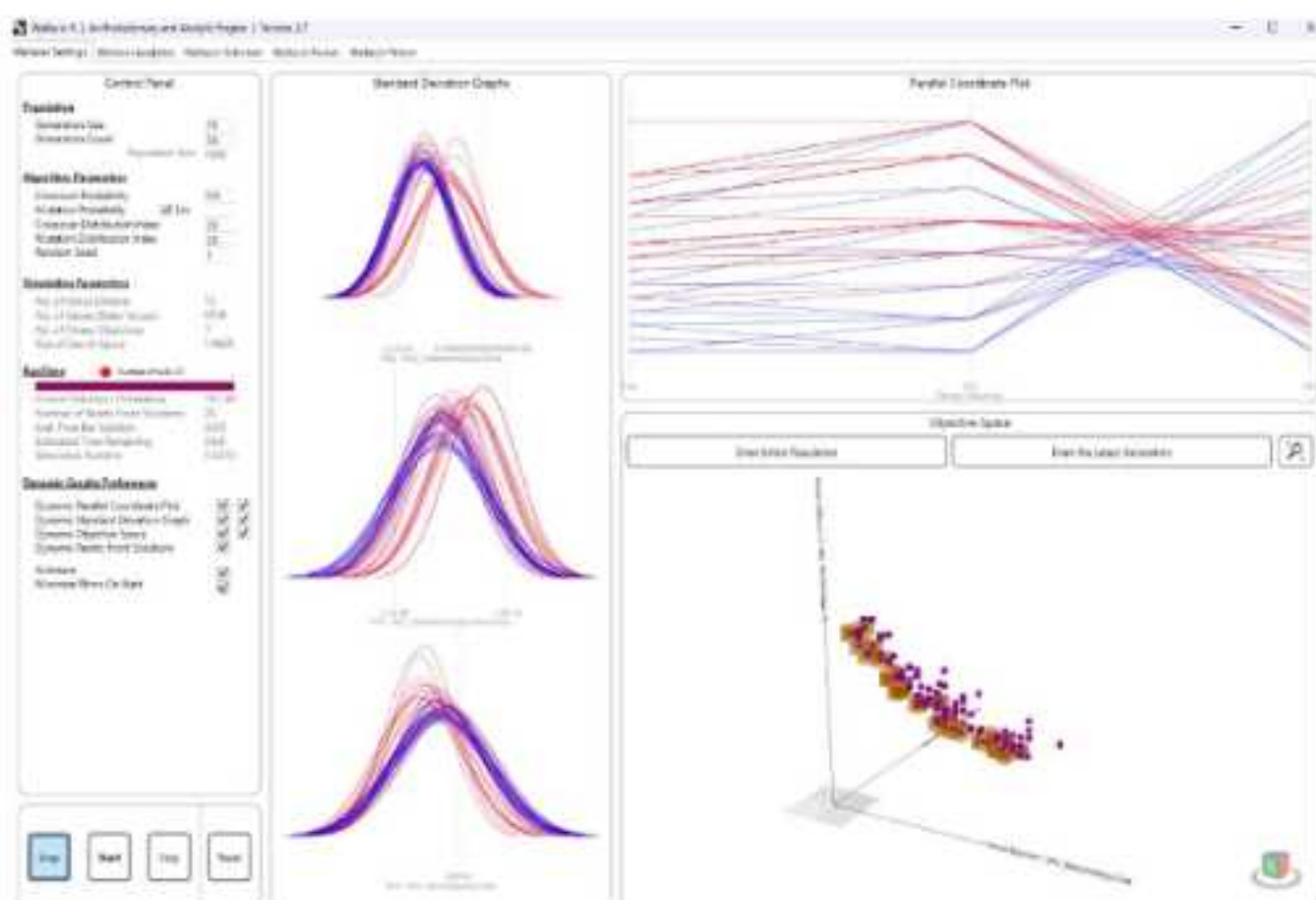
Do zmiennych należały: orientacja brył, ich przesunięcia w obrębie działki, liczba kondygnacji (maks. 4) oraz wielkość wysunięć stropów (do 1,0 m). W wariantie z ograniczeniem dodatkowo ustalono stałą pozycję bryły południowo-zachodniej.

13.3.4. Konfiguracja algorytmu i symulacja

Optymalizację przeprowadzono z użyciem algorytmu NSGA-II w Wallacei X. Wygenerowano 1000 rozwiązań w 50 pokoleniach, każde po 20 wariantów. Parametry mutacji i krzyżowania pozostawiono domyślne, co zapewniło stabilny przebieg procesu.

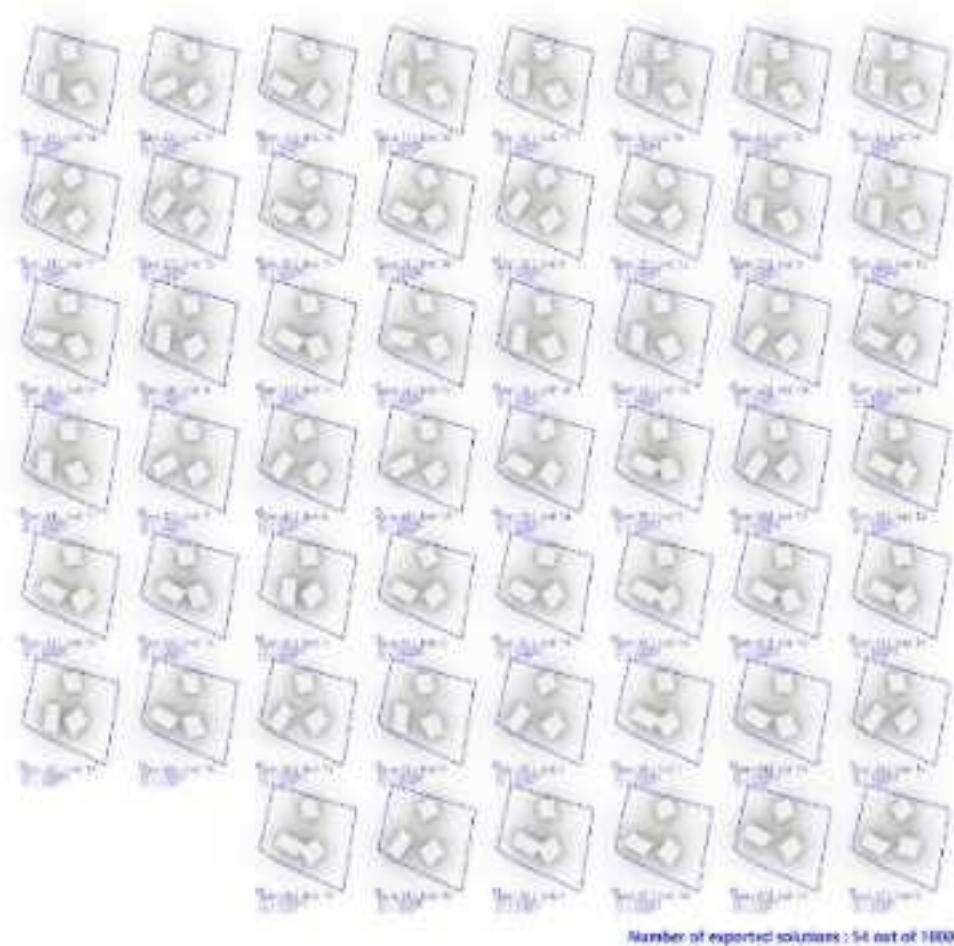
13.3.5. Analiza wyników i metoda wyboru rozwiązań

Na rys. 13.20. pokazano wyniki optymalizacji wielokryterialnej. Wykres *parallel coordinates* ujawnił silny konflikt pomiędzy maksymalizacją zimową a minimalizacją letnią.



Rys. 13.20. Wyniki optymalizacji multykryterialnej (dla wersji, gdzie wszystkie bryły mogą się poruszać).

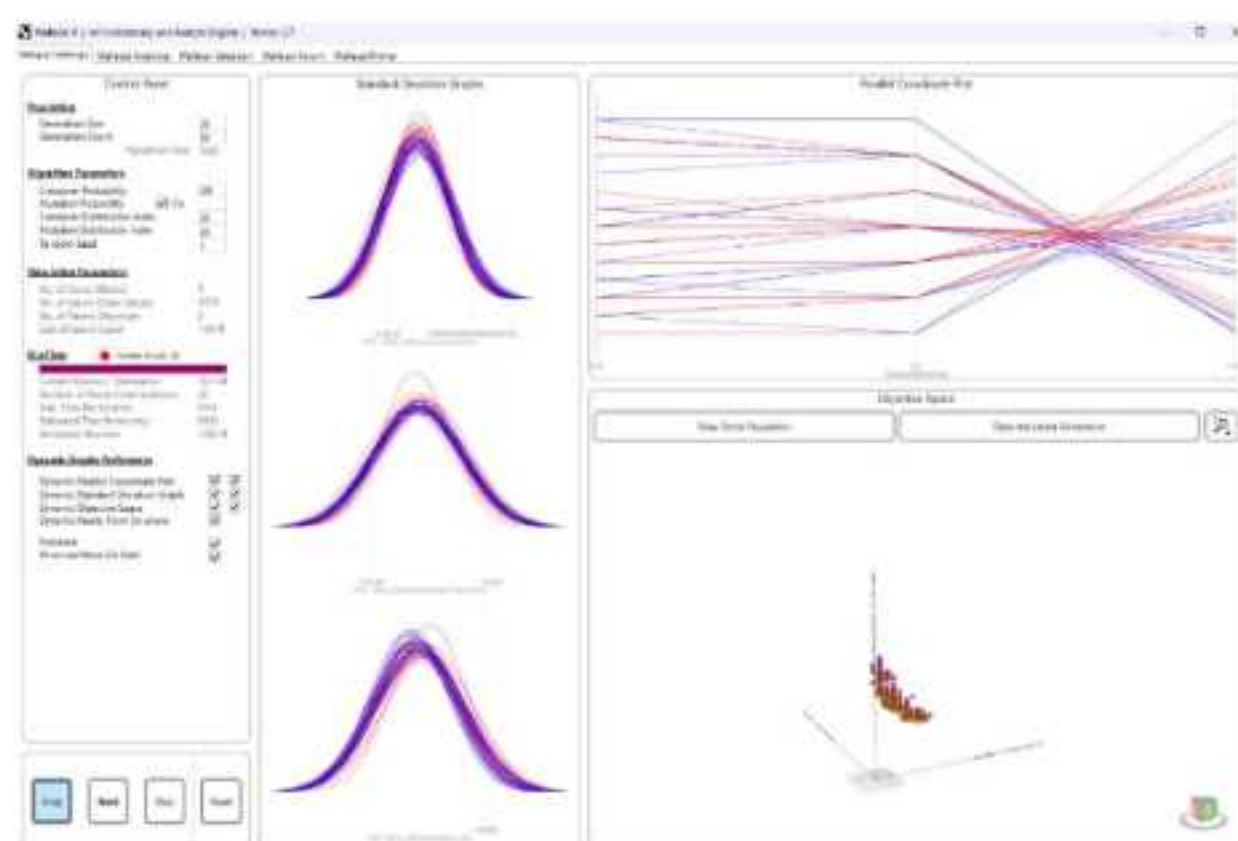
Na rys. 13.21., 13.22., 13.23., 13.24., 13.25. przedstawiono front Pareto, obejmujący kilkadziesiąt rozwiązań kompromisowych. Analiza porównawcza pokazała, że w wariancie ze swobodą ruchu wszystkich brył uzyskano większe zróżnicowanie rozwiązań, natomiast w wariancie z unieruchomioną bryłą południowo-zachodnią front Pareto był węższy, co ograniczało przestrzeń możliwych kompromisów. To potwierdza znaczenie ograniczeń urbanistycznych w kształtowaniu procesu optymalizacji, mianowicie redukują one elastyczność projektową, ale zwiększają realność uzyskanych rozwiązań.



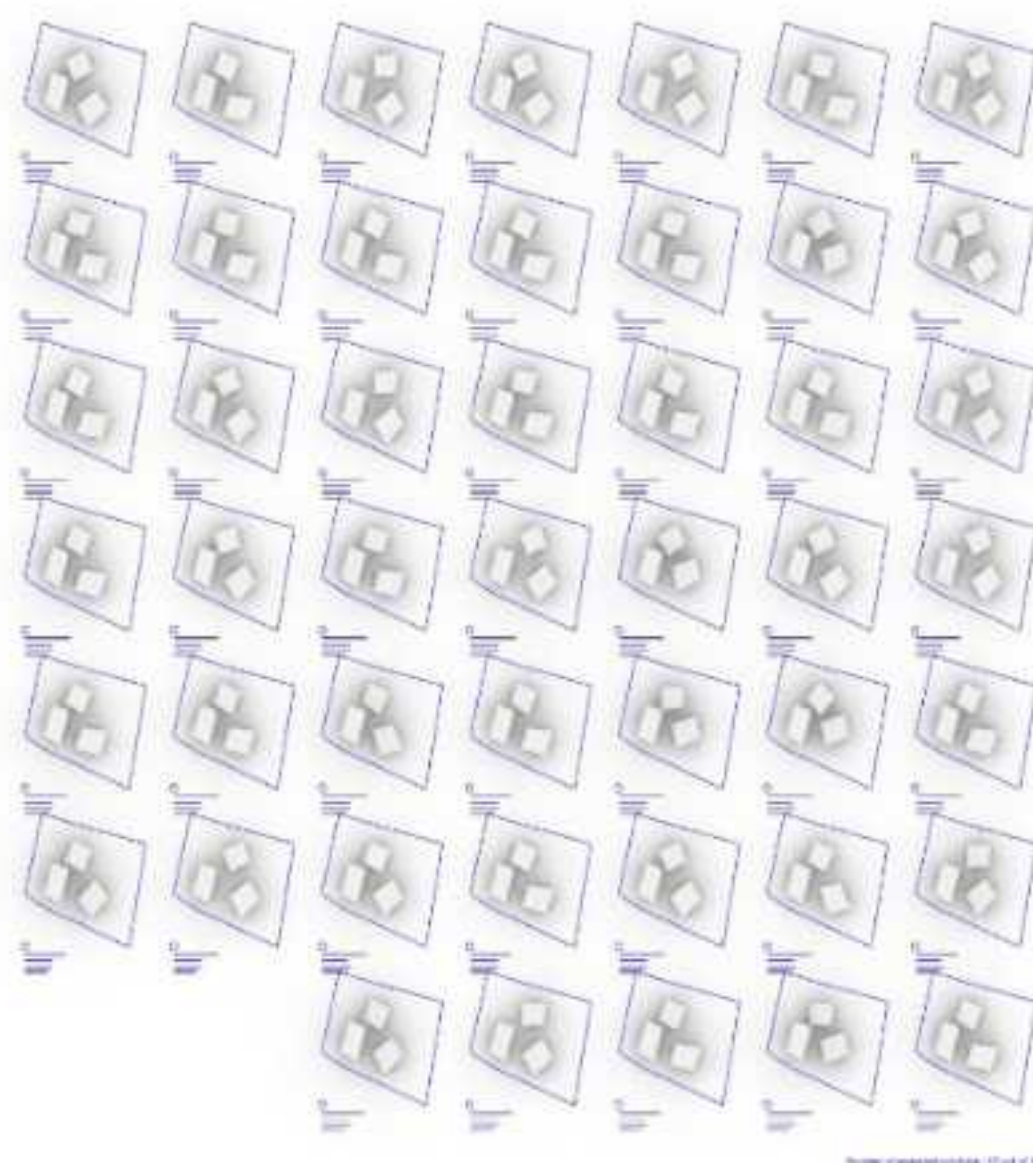
Rys. 13.21. Front pareto, widok z góry (dla wersji, gdzie wszystkie bryły mogą się poruszać).



Rys. 13.22. Front pareto, aksonometria (dla wersji, gdzie wszystkie bryły mogą się poruszać).



Rys. 13.23. Wyniki optymalizacji multykryterialnej (dla wersji, gdzie tylko dwie bryły z trzech mogą się poruszać).



Rys. 13.24. Front pareto, widok z góry (dla wersji, gdzie tylko dwie bryły z trzech mogą się poruszać).



Rys. 13.25. Front pareto, widok z góry (dla wersji, gdzie tylko dwie bryły z trzech mogą się poruszać).

13.4. Wnioski

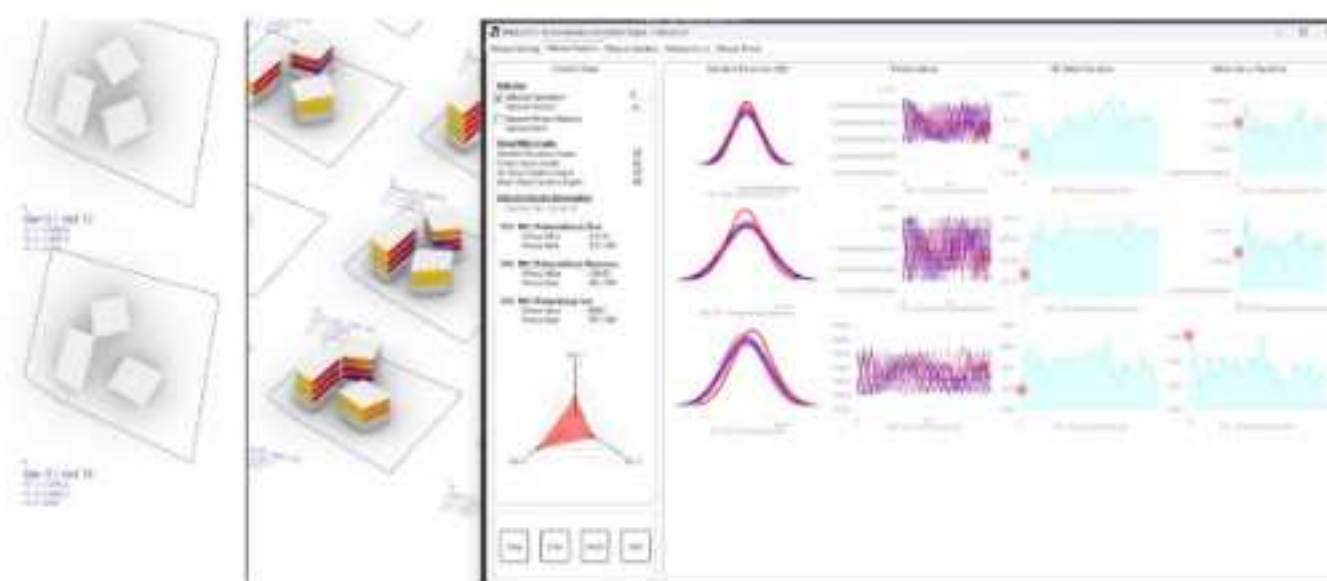
Etap III stanowił kluczowy moment procesu projektowego, ponieważ skoncentrowano się na docelowym układzie trzech brył. Analizy wykazały, że pełna swoboda ruchu wszystkich modułów prowadziła do większego zróżnicowania i szerszego frontu Pareto, co sprzyjało poszukiwaniu rozwiązań. Wprowadzenie ograniczenia w postaci stałej bryły południowo-zachodniej zmniejszyło przestrzeń rozwiązań, lecz nadało wynikom większą zgodność z kontekstem urbanistycznym.

Podobnie jak w poprzednich etapach, optymalizacja jednokryterialna wykazała sprzeczności między celami, a dopiero analiza wielokryterialna umożliwiła wskazanie zbioru wariantów kompromisowych. Wyniki potwierdzają, że narzędzia takie jak Wallace X wspierają proces projektowy, lecz ostateczny wybór rozwiązania należy do projektanta i zależy od hierarchii przyjętych priorytetów.

13.4. Wybór opcji do dalszego opracowania

Po przeprowadzeniu optymalizacji wielokryterialnej konieczne było wskazanie wariantu, który w największym stopniu odpowiadałby założeniom projektowym. Analiza skupiała się na rozwiązaniach wyselekcjonowanych z różnych generacji, co pozwoliło porównać zarówno wczesne, bardziej zróżnicowane konfiguracje i późniejsze warianty o wyższej stabilności.

Na rys. 13.26. zaprezentowano wariant z generacji 0/18. Jego przewagą jest wysoki poziom zróżnicowania przestrzennego oraz bardzo dobre wyniki w minimalizacji letniej. Jednakże rozwiązanie nie jest zoptymalizowane w odniesieniu do pozostałych kryteriów, szczególnie maksymalizacji zimą, które w tym wariantcie osiąga wysokie wartości.



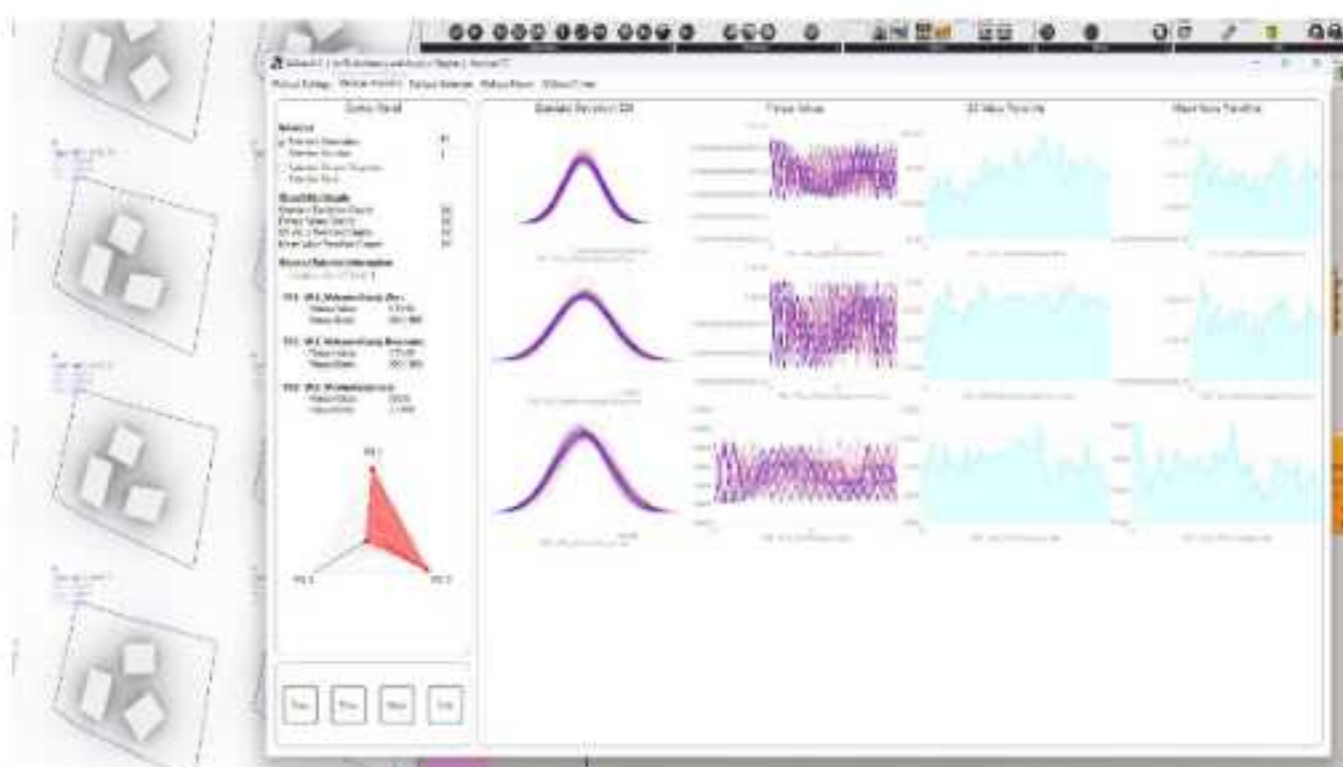
Rys. 13.26. Rozwiązanie 18 z pierwszej generacji.

Lepszym kompromisem okazał się wariant z generacji 20/18 (rys. 13.27.). Znajduje się on w połowie procesu optymalizacji, dzięki czemu zachowuje pewne zróżnicowanie układu, ale równocześnie jego wyniki są już bliższe stabilizacji. Wykres wskazuje na bardziej zrównoważone wartości w trzech funkcjach celu – zarówno dobre nasłonecznienie zimą i w równonoc, jak i umiarkowane ograniczenie przegrzewania latem.



Rys. 13.27. Rozwiązanie 18 z 20. generacji.

Wariant z generacji 47/1 (rys. 13.28.) reprezentuje już końcową fazę algorytmu. Wysoka stabilność i korzystne wyniki dla maksymalizacji zimowej i równonocy są jego dużą zaletą. Niemniej jednak, wariant ten charakteryzuje się pogorszeniem w zakresie minimalizacji letniej, co oznacza, że w praktyce mógłby prowadzić do problemów z przegrzewaniem.



Rys. 13.28. Rozwiązanie 1. z 47. generacji.

Ostatecznie najlepszym kandydatem do dalszego rozwinięcia uznano wariant z generacji 49/3 (rys. 13.29.). Jest to rozwiązanie końcowe, które osiągnęło wysokie wartości dla celów zimowych i równonocy, a jednocześnie nie wykazuje drastycznych strat w kryterium letnim. Stabilność wyników oraz wyraźne zaklasyfikowanie do frontu Pareto potwierdzają, że rozwiązanie to reprezentuje optymalny kompromis między wszystkimi analizowanymi parametrami.



Rys. 13.28. Rozwiązanie 3. z 49. generacji.

CZĘŚĆ IV. PROJEKT ARCHITEKTONICZNY

14. Szczegółowe założenia projektowe

14.1. Cele funkcjonalne

Projektowany obiekt dydaktyczno-badawczy dla Wydziału Architektury został opracowany w oparciu o szczegółowe cele funkcjonalne, które wynikają z analizy programu użytkowego i potrzeb społeczności akademickiej.

Na parterze zlokalizowano funkcje najbardziej publiczne i otwarte, czyli kawiarnię, przestrzeń audytoryjną oraz rozległe strefy pracy. Celem tego rozwiązania było zapewnienie płynnej integracji budynku z kampusem i stworzenie miejsca dostępnego także dla osób spoza wydziału. W centralnej części parteru znajduje się obszerny hol, pełniący funkcję węzła komunikacyjnego, miejsca spotkań i wydarzeń kulturalnych. W jego sąsiedztwie zaprojektowano laboratorium cyfrowej fabrykacji (pracownia CNC, przestrzeń dla robotów KUKA, stanowiska pracy), co ma odzwierciedlać ideę transparentności procesu projektowego i badawczego, studenci i odwiedzający mogą obserwować zaawansowane technologie w działaniu.

Wyższe kondygnacje przeznaczono głównie na funkcje dydaktyczne i badawcze. Znajdują się tu makieciarnie, laboratorium druku 3D i VR, biblioteka materiałów, przestrzenie komputerowe oraz strefy pracy zespołowej i indywidualnej. Rozplanowanie tych pomieszczeń miało na celu zapewnienie maksymalnej elastyczności, przestrzenie mogą być adaptowane do pracy projektowej, warsztatowej lub seminaryjnej, szczególną rolę pełnią makieciarnie, biblioteka ma stanowić cichą przestrzeń do nauki i pracy.

W budynku przewidziano także przestrzenie wspierające codzienne funkcjonowanie, czyli pokoje socjalne, magazyny, zaplecza techniczne. Dzięki nim możliwe jest sprawne działanie laboratoriów oraz komfortowe użytkowanie obiektu przez studentów i pracowników.

Ważnym celem funkcjonalnym było również powiązanie budynku z otoczeniem kampusu. Zaprojektowane przestrzenie publiczne wokół obiektu, place wejściowe, strefy zielone i tarasy pełnią rolę miejsc integracji i odpoczynku. Stanowią przedłużenie funkcji na zewnątrz, pozwalając na organizację wystaw plenerowych, warsztatów czy spotkań studenckich. Zadbano, aby układ komunikacyjny wokół budynku łączył się z istniejącą siecią ścieżek kampusu, tworząc spójny układ przestrzeni publicznych.

Poza tym obiekt posiada dwupoziomowy garaż podziemny, który stanowi zastąpienie obecnego parkingu, a także jest głównym zapleczem technicznym budynku.

Dzięki temu budynek realizuje swoją podstawową funkcję dydaktyczną i badawczą, staje się ważnym elementem przestrzeni kampusu, czyli miejscem, które integruje, inspiruje i sprzyja współpracy.

14.2. Cele środowiskowe

Cele środowiskowe stanowią istotny filar projektowanego budynku dydaktyczno-badawczego, łącząc kwestie funkcjonalne z optymalizacją formy i parametrów użytkowych. Ich opracowanie wynika z wcześniejszych etapów analiz i symulacji, w tym procesów optymalizacyjnych dotyczących nasłonecznienia.

Podstawowym założeniem było zapewnienie maksymalnego dostępu światła naturalnego w okresie zimowym oraz równonocy, przy jednoczesnym ograniczeniu ryzyka przegrzewania w miesiącach letnich. Analizy pokazały, że rozwiązania Pareto są najbardziej zrównoważone, pozwalają osiągnąć wysoki poziom oświetlenia zimą i wiosną, a jednocześnie nie generują nadmiernych zysków ciepła latem. Zastosowanie adaptacyjnych paneli z poliwęglanu w fasadzie dodatkowo wzmacnia możliwość regulacji tych parametrów.

Choć analizy przewietrzania wykonane w narzędziu Infrared.city nie były podstawą do optymalizacji, posłużyły jako uzupełnienie badań, potwierdzając brak istotnych zagrożeń związanych z miejską wyspą ciepła czy silnymi podmuchami wiatru na działce. Wnioski z tej analizy potwierdziły, że główne znaczenie środowiskowe mają kwestie ekspozycji słonecznej. Jednocześnie uzyskane wyniki pozwoliły przewidzieć możliwość zwiększenia komfortu użytkowników przestrzeni publicznych wokół budynku poprzez wprowadzenie zieleni wysokiej.

Zastosowana konstrukcja w technologii **CLT** wpisuje się w strategię niskoemisyjności i zrównoważonego wykorzystania zasobów. Drewno jako materiał odnawialny ogranicza ślad węglowy, a jego prefabrykowany charakter redukuje ilość odpadów i energii zużywanej na budowie. W połączeniu z adaptacyjną fasadą i zielonymi tarasami technologia ta tworzy system, w którym optymalizacja bryły odpowiada na wymagania środowiskowe.

Cele środowiskowe są ściśle powiązane z funkcją budynku. Strefy pracy studenckiej i badawczej, takie jak laboratoria cyfrowe, makieciarnie czy strefy coworkingowe, wymagają dobrej jakości światła dziennego, co znajduje odzwierciedlenie w wynikach optymalizacji. Z kolei przestrzenie takie jak archiwa, magazyny i strefy robotyczne mogą być usytuowane w miejscach o mniejszej ekspozycji, co sprzyja równomiernemu bilansowi energetycznemu budynku.

Cele środowiskowe w projekcie nie ograniczają się do redukcji zużycia energii czy poprawy komfortu cieplnego. Mają one charakter systemowy, łączą analizę formy, materiałów i funkcji w spójny proces projektowy. Optymalizacje przeprowadzone w środowisku parametrycznym pozwoliły określić zestaw kompromisowych rozwiązań, które następnie zostały przeniesione do docelowego układu budynku. Takie podejście potwierdza, że projektowanie architektoniczne w oparciu o narzędzia generatywne wspiera świadome kształtowanie budynków odpornych na zmiany klimatu, a jednocześnie dostosowanych do potrzeb użytkowników.

14.3. Cele estetyczne

Estetyka projektowanego budynku została potraktowana jako element wynikający z całościowego procesu projektowego. Przyjęto założenie, że forma architektoniczna powinna w równym stopniu odpowiadać na potrzeby użytkowników, warunki klimatyczne oraz kontekst urbanistyczny.

Budynek wpisuje się w tkankę kampusu Politechniki Gdańskiej, gdzie współistnieją obiekty o różnym charakterze, od historycznych, ceglanych budynków po współczesne realizacje innych wydziałów. Celem estetycznym stało się stworzenie obiektu, który nie konkuruje z istniejącą zabudową, ale jednocześnie wnosi nową jakość. Prosta, modułowa kompozycja brył została wzbogacona o elementy dynamiczne, takie jak adaptacyjne panele fasady, które nadają elewacji zmienny charakter zależny od warunków atmosferycznych i potrzeb użytkowników.

Istotnym założeniem było wizualne podkreślenie funkcji budynku jako miejsca spotkań, pracy twórczej i badań. Dlatego w parterze zastosowano przeszklone elewacje, które otwierają wnętrze na przestrzeń publiczną wokół obiektu. Transparentność sprzyja poczuciu dostępności i zachęca do korzystania z przestrzeni półpublicznych, takich jak hol czy kawiarnia.

Estetyka materiałów podporządkowana została idei zrównoważonego projektowania. Naturalne drewno CLT w strukturze budynku zestawiono z poliwęglanowymi panelami fasadowymi o półprzezroczystej fakturze i białymi panelami aluminiowymi. Kontrast między ciepłem drewna a nowoczesnością poliwęglanu nadaje obiektowi wyrazisty, ale zarazem neutralny charakter, pozwalający na harmonijną obecność w kontekście kampusu.

Rozwiązania estetyczne są ściśle powiązane z funkcją i wcześniejszymi wynikami optymalizacji. Bryły o prostych kształtach odpowiadają na wymogi modułowości i prefabrykacji i wpisują się w czytelną i uporządkowaną kompozycję przestrzenną. Wewnętrzne tarasy zielone pełnią rolę użytkową i estetyczną, stają się elementem wizualnym, który łagodzi rytmikę brył i wprowadza do architektury miękkość zieleni.

15. Rozwiązania urbanistyczne

15.1. Usytuowanie na działce

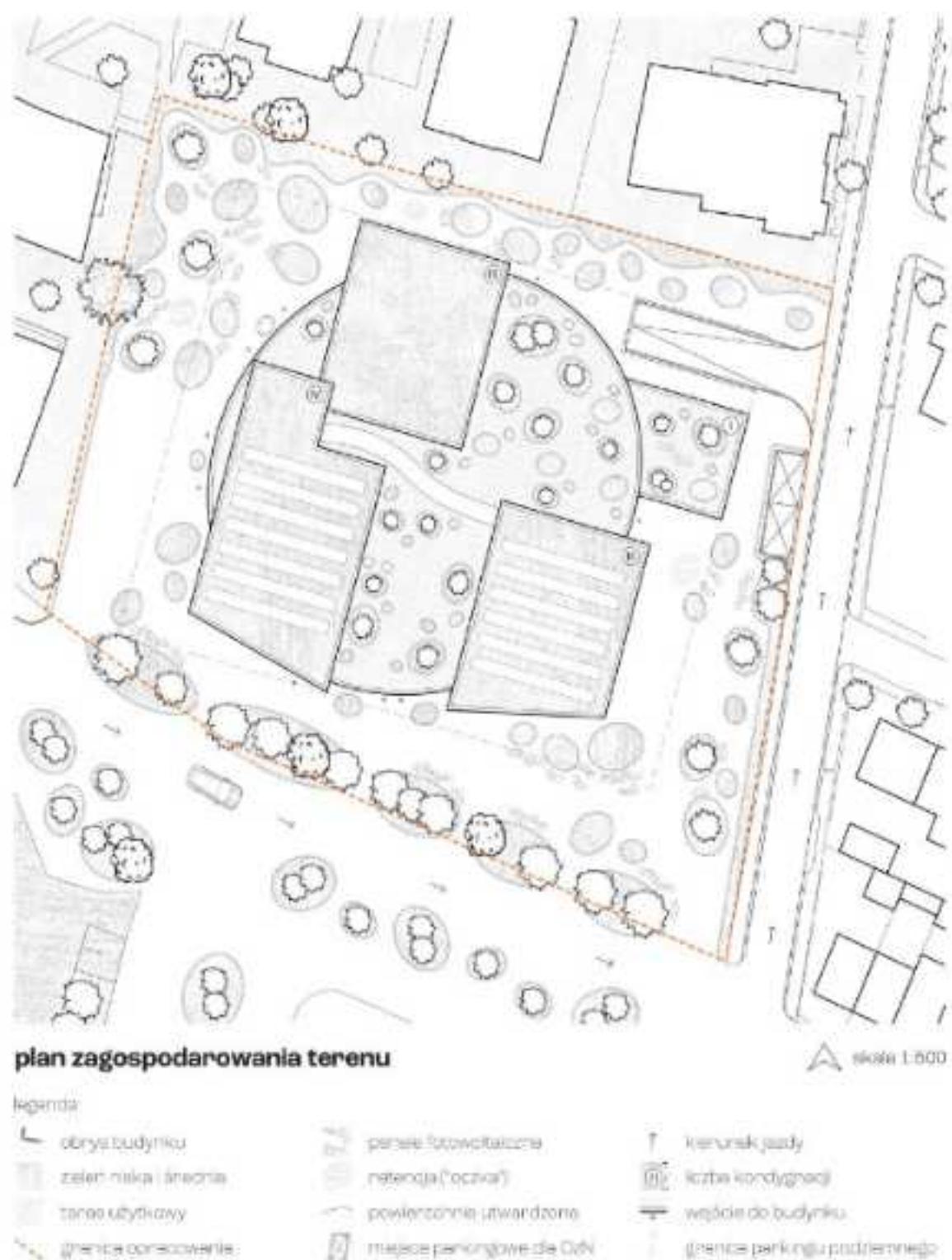
Działka projektowa (Rys. 15.1.) pełni ważną rolę kompozycyjną, stanowi zakończenie osi ulicy Siedlickiej, która jest jednym z istotnych ciągów komunikacyjnych łączących wnętrze kampusu z tkanką miejską Wrzeszcza.

Wejście główne zlokalizowano od strony południowej, w bezpośrednim sąsiedztwie ciągów pieszych i zieleni wzdłuż ulicy Siedlickiej. Dzięki temu użytkownicy korzystający z kampusu i przestrzeni miejskich otrzymują intuicyjny dostęp do wnętrza budynku. Wzdłuż pierzei południowej przewidziano również przestrzenie półpubliczne, takie jak kawiarnia, które aktywizują przestrzeń ulicy i sprzyjają integracji. Od strony południowo-zachodniej zapewniono dojazd techniczny oraz obsługę funkcjonalną obiektu.

Na działce wprowadzono czytelny układ zieleni wysokiej i niskiej, który pełni funkcję estetyczną i ekologiczną. Dużą rolę odgrywa istniejący pas zieleni wysokiej wzdłuż południowej pierzei, który stanowi bufor między przestrzenią ulicy a wnętrzem obiektu. Zewnętrzne przestrzenie otwarte uzupełniają wewnętrzne tarasy i parter, tworząc system przestrzeni rekreacyjnych i półpublicznych.

Bryły zostały rozmieszczone tak, aby maksymalnie wykorzystać dostęp do światła dziennego, co wynika również z wcześniejszych analiz i optymalizacji nasłonecznienia.

Działka jest dobrze skomunikowana z układem drogowym Wrzeszcza, co ułatwia obsługę zarówno codziennych użytkowników, jak i dostaw technicznych. Wzdłuż wschodniej granicy działki zorganizowano miejsca postojowe dla osób z niepełnosprawnością oraz wjazd do garażu podziemnego. Od skrzyżowania ulic Fiszer i Bohaterów Getta Warszawskiego w stronę działki zaproponowano wprowadzenie ruchu jednokierunkowego oraz spowolnienie ruchu poprzez wprowadzenie woonerfu. Rozwiązanie to wpisuje się w ideę ograniczania transportu kołowego w centralnej części kampusu, przy zachowaniu pełnej dostępności dla obsługi technicznej i użytkowników budynku.



Rys. 15.1. Działka projektowa z zagospodarowaniem.

16. Architektura

16.1. Rzuty

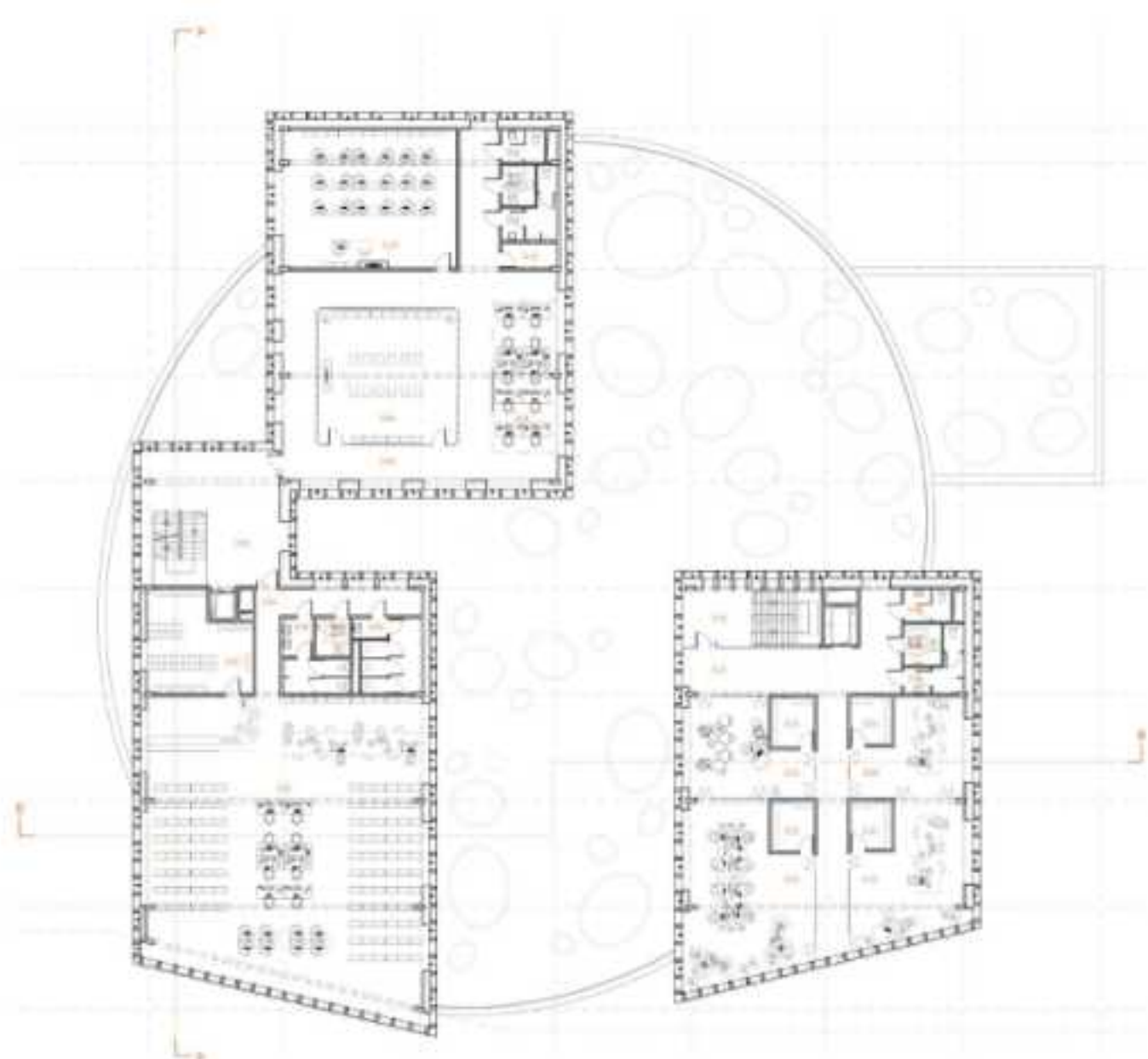
Rzuty poszczególnych kondygnacji (Rys. 16.1., 16.2., 16.3., 16.4., 16.5., 16.7.) przedstawiają szczegółowy układ funkcjonalno-przestrzenny projektowanego budynku, ukazują rozmieszczenie poszczególnych stref oraz relacje między nimi.



Rys. 16.1. Rzut parteru z zestawieniem pomieszczeń i powierzchni.



Rys. 16.2. Rzut pierwszego piętra z zestawieniem pomieszczeń i powierzchni.



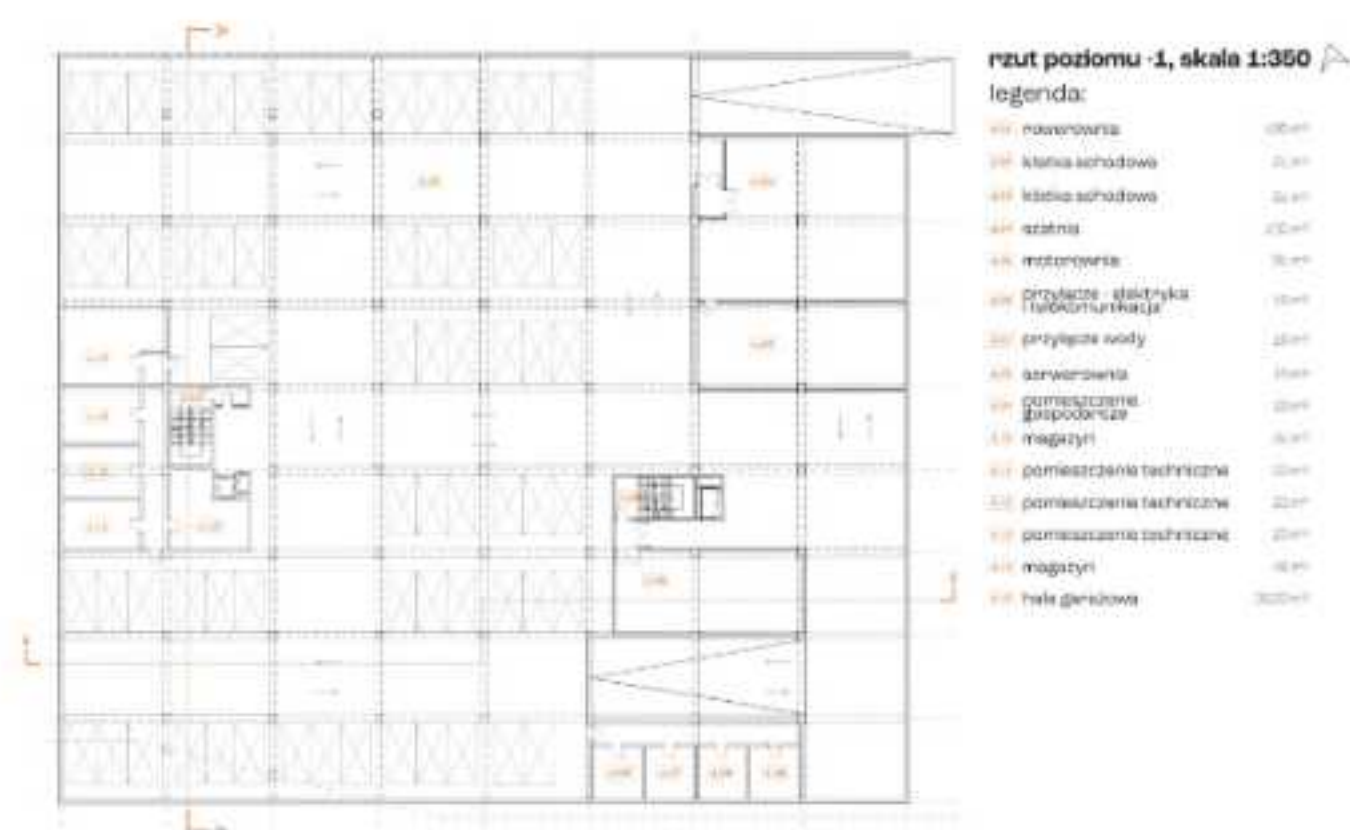
legenda:

101	biblioteka z czytelnią i miejscami pracy	203 m ²	108	komunikacja	140 m ²	107	komunikacja	20 m ²	106	sala dla kół naukowych (organizacji)	40 m ²
102	klaska schodowa	50 m ²	109	sala konferencyjna	70 m ²	108	sala dla kół naukowych (organizacji)	37 m ²	105	magazyn dla kół naukowych (organizacji)	9 m ²
103	klaska schodowa	37 m ²	110	sewing	9 m ²	109	magazyn dla kół naukowych (organizacji)	9 m ²	104	toaleta męska	9 m ²
104	komunikacja	23 m ²	111	pomieszczenie porządkowe	9 m ²	110	sala dla kół naukowych (organizacji)	35 m ²	103	toaleta dla OZi	9 m ²
105	archiwum	35 m ²	112	toaleta męska	20 m ²	111	magazyn dla kół naukowych (organizacji)	9 m ²	102	toaleta damska	9 m ²
106	toaleta męska	13 m ²	113	toaleta dla OZi	9 m ²	112	sala dla kół naukowych (organizacji)	70 m ²	101	suma pow. użyt.	1124 m ²
107	toaleta dla OZi	9 m ²	114	toaleta damska	9 m ²	113	magazyn dla kół naukowych (organizacji)	9 m ²			
108	toaleta damska	17 m ²	115	sala komputerowa	80 m ²						

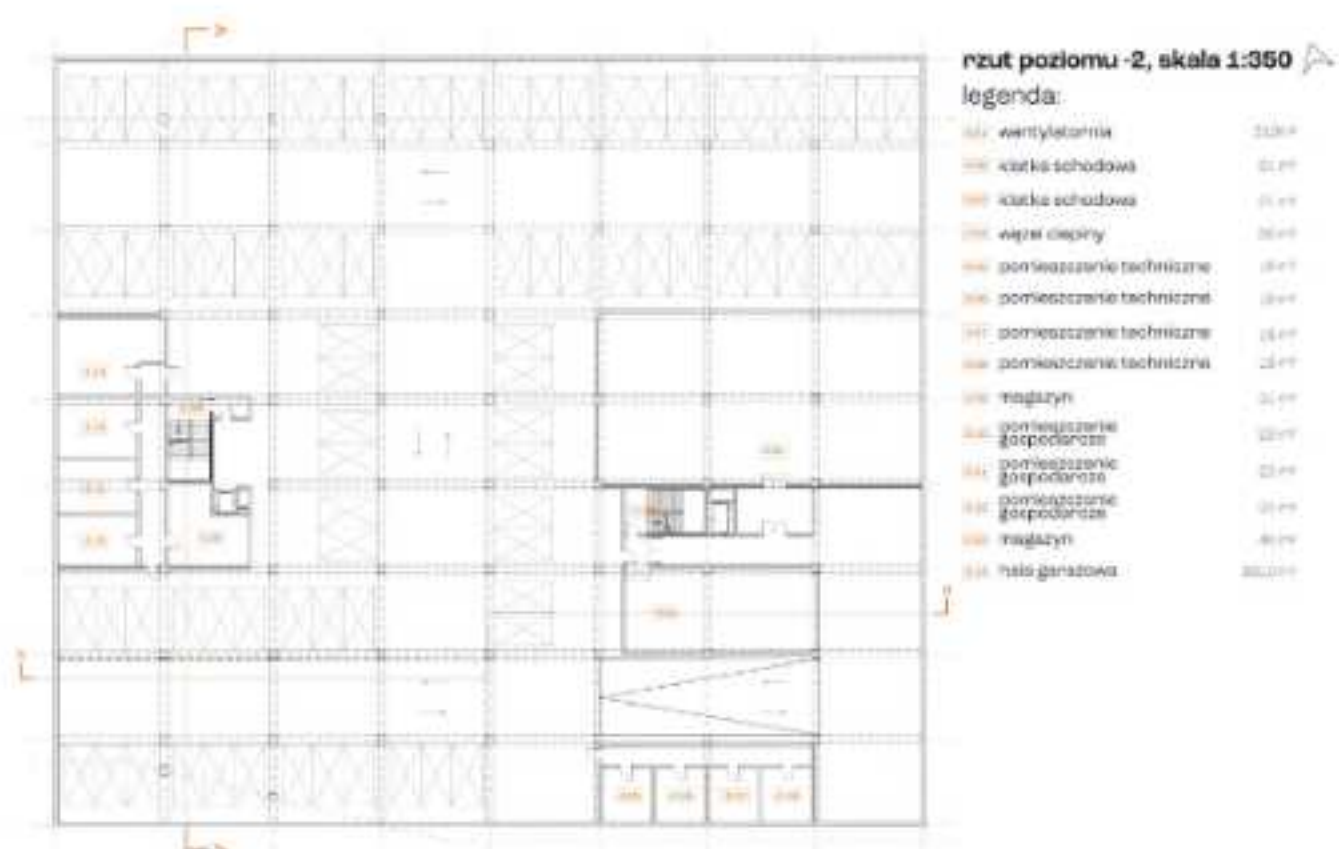
Rys. 16.4. Rzut drugiego piętra z zestawieniem pomieszczeń i powierzchni.



Rys. 16.5. Rzut trzeciego piętra z zestawieniem pomieszczeń i powierzchni.



Rys. 16.6. Rzut poziomu -1 z zestawieniem pomieszczeń i powierzchni.



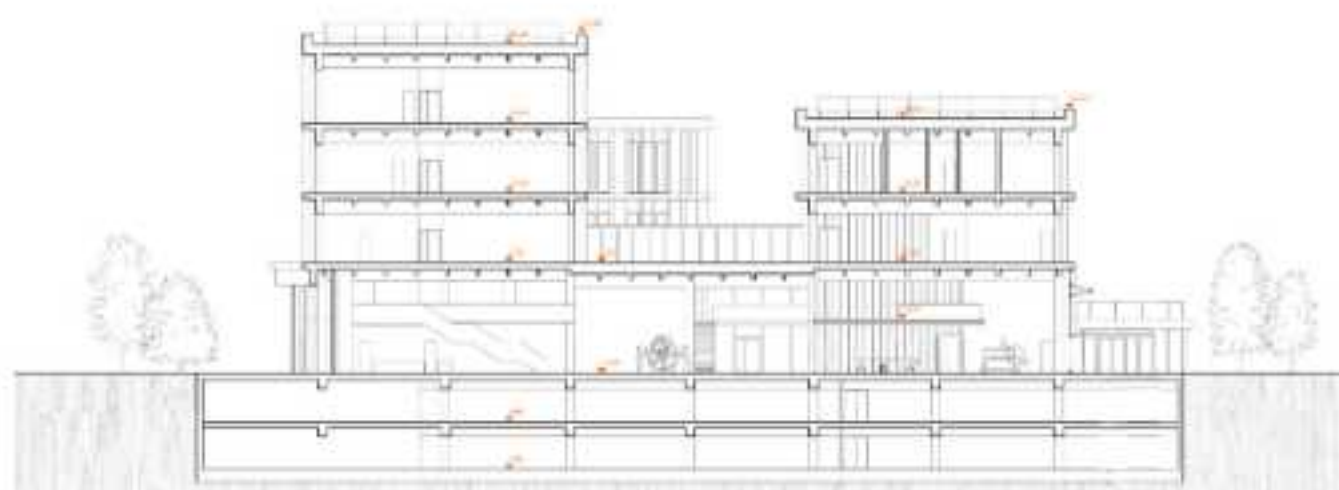
Rys. 16.7. Rzut poziomu -2 z zestawieniem pomieszczeń i powierzchni.

16.2. Przekroje

Poniżej przedstawiono dwa przekroje (Rys. 16.8., 16.9.) budynku, ukazujące relacje między kondygnacjami.



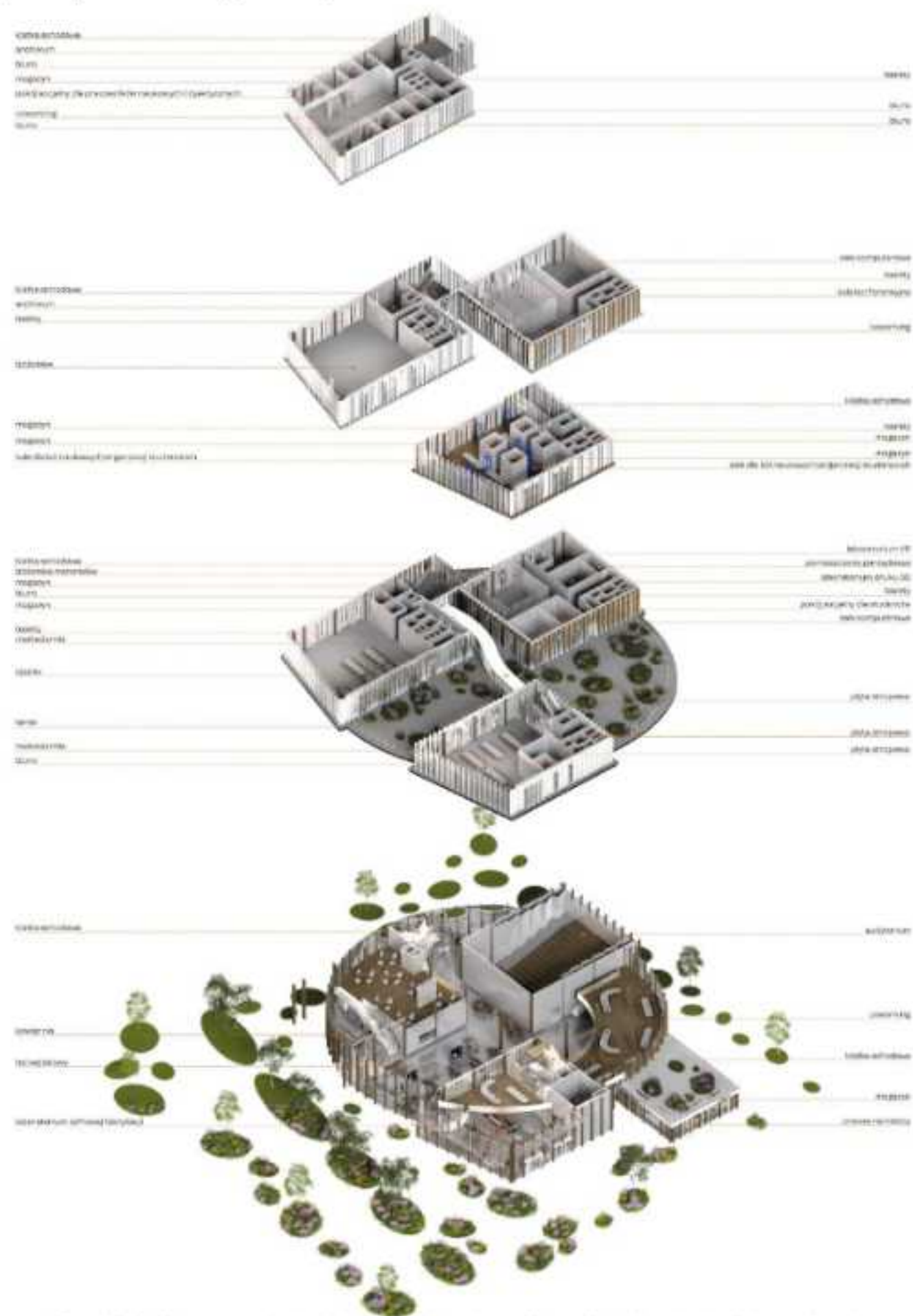
Rys. 16.8. Przekrój pionowy budynku, na rzutach oznaczony jako A-A.



Rys. 16.9. Przekrój pionowy budynku, na rzutach oznaczony jako B-B.

16.3. Schematy powiązań funkcjonalnych

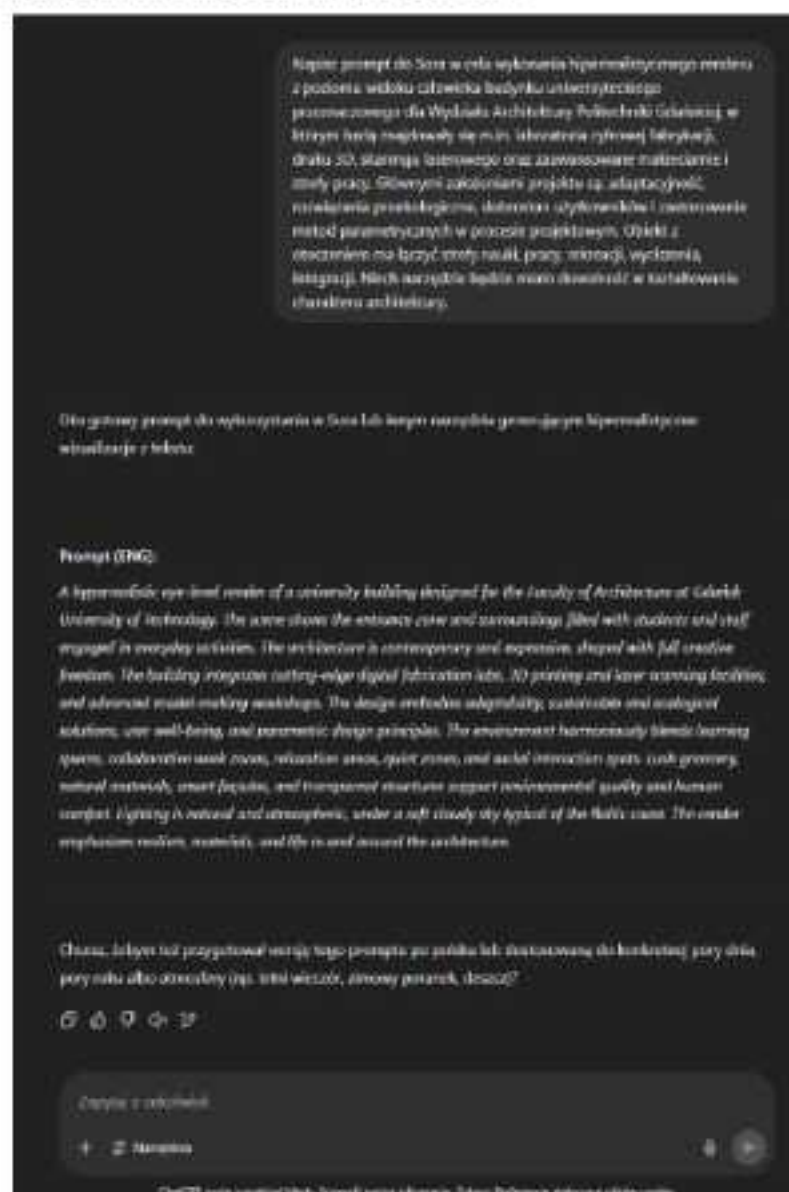
Schematy powiązań funkcjonalnych ilustrują logikę organizacji programu obiektu. Pokazują hierarchię i wzajemne relacje pomiędzy poszczególnymi funkcjami, przedstawione za pomocą aksonometrii (Rys. 16.10).



Rys. 16.10. Aksonometria eksplodowana pokazująca główne funkcje budynku i ich powiązania.

16.4. AI w kształtowaniu elewacji

Testowanie narzędzi sztucznej inteligencji w procesie projektowania miało na celu zbadanie potencjału ich zastosowania jako źródła inspiracji dla formy elewacji. Proces rozpoczął się od przygotowania przez *ChatGPT* (Rys. 16.11.) opisu założeń projektowych w taki sposób, aby możliwe było wygenerowanie promptu dla narzędzia Sora. W pierwszym kroku celowo pozostawiono większą dowolność interpretacyjną maszynie, co pozwoliło sprawdzić, jakie obrazy powstaną przy minimalnej kontroli ze strony projektanta.



Rys. 16.10. *ChatGPT* i wygenerowany prompt.

Kolejny etap obejmował wygenerowanie wizualizacji (Rys. 16.11.) przez Sora na podstawie tego samego promptu, ale powtarzanego w różnych podejściach. Dzięki temu możliwe było sprawdzenie, w jakim stopniu narzędzie różnicuje wyniki przy identycznym wejściu. Okazało się, że choć poszczególne grafiki różnią się detalami, powtarzalność schematów kompozycyjnych jest bardzo wyraźna. Sora często odwołuje się do falistych, organicznych form fasady oraz zestawień szkła z drewnem, co może wskazywać na silne zakorzenienie w trendach obecnych w materiałach treningowych modelu.



Rys. 16.11. Wygenerowane rozwiązania przez Sora na podstawie zadanego *promptu*, dając narzędziu dowolność w kształtowaniu formy.

W trzecim kroku wygenerowano bardziej szczegółowy prompt, powiązany z ideą projektanta, ale nadal pozostawiający pewną swobodę w zakresie parteru budynku. Efekty potwierdziły wcześniejsze obserwacje, obrazy były bardziej dopasowane do założeń funkcjonalnych i estetycznych, ale różnorodność pozostawała ograniczona. AI produkowało warianty tej samej idei, a nie jakościowo odmienne propozycje.



Rys. 16.12. Wygenerowane rozwiązania przez Sora na podstawie zadanego *promptu*, ograniczając narzędzie poprzez model bryły i bardziej szczegółowe założenia projektowe.

Korzystanie z narzędzi takich jak Sora może być cenne na etapie konceptualnym, zwłaszcza jako narzędzie szybkiej wizualizacji i eksploracji ogólnych kierunków estetycznych. Jednak równocześnie pojawiają się spore ograniczenia, takie jak monotoniczność wyników i powtarzalność rozwiązań. W efekcie projektant otrzymuje raczej zestaw wariantów tego samego pomysłu niż szerokie spektrum inspiracji.

Dodatkowo warto zwrócić uwagę na aspekt środowiskowy. Każdy prompt generujący hiperrealistyczny obraz wymaga znacznych zasobów obliczeniowych, co przekłada się na wysokie zużycie energii i wody. Według dostępnych analiz, ślad środowiskowy jednego zapytania do dużego modelu AI bywa porównywalny do kilkunastu minut pracy energochłonnych urządzeń cyfrowych (Towards Data Science, 2023; MIT Technology Review, 2025). W kontekście

projektowania architektonicznego, gdzie niekiedy generuje się dziesiątki lub setki wizualizacji, aspekt ten nie może być pomijany.

Podsumowując, testowanie AI w procesie projektowym ujawnia jego potencjał jako narzędzia wspomagającego, na pewno nie zastępującego pracy architekta. Narzędzia takie jak Sora mogą stanowić źródło inspiracji, ale wymagają krytycznej oceny i selektywnego wykorzystania. Ich wyniki, choć mogą wydawać się atrakcyjne wizualnie, obarczone są monotonią i ograniczoną różnorodnością, a ponadto generują dodatkowe koszty środowiskowe.

17. Rozwiązania konstrukcyjne

Projektowany budynek dydaktyczno-badawczy został oparty na konstrukcji z drewna klejonego warstwowo (glulam) oraz paneli CLT (Cross-Laminated Timber). Oba te materiały stanowią obecnie jedne z najważniejszych elementów nowoczesnego budownictwa drewnianego w Europie, ze względu na swoje właściwości strukturalne i ekologiczne.

CLT, czyli drewno klejone krzyżowo, powstaje z kilku warstw desek układanych naprzemiennie pod kątem prostym i klejonych ze sobą pod dużym ciśnieniem. Taka budowa zapewnia panelom wysoką sztywność i nośność w obu kierunkach. Dzięki masywności i jednocześnie relatywnie niskiej wadze, CLT pozwala na szybki montaż z elementów prefabrykowanych i wpisuje się w strategię ograniczania śladu węglowego. Panele charakteryzują się korzystnymi właściwościami termicznymi i akustycznymi, choć w tym drugim zakresie wymagają dodatkowych warstw izolacyjnych, aby zapewnić komfort użytkowania. Drugim materiałem nośnym w obiekcie jest drewno klejone warstwowo, glulam, które powstaje z klejonych desek o wysokiej wytrzymałości i jest formowane w belki lub słupy o dużych przekrojach. W przypadku projektowanego budynku zastosowano elementy klasy GL32c, charakteryzujące się wysoką odpornością na zginanie. Glulam jest materiałem stabilnym wymiarowo i odpornym na zmiany wilgotności, a dzięki możliwości formowania elementów o dużej rozpiętości pozwala na tworzenie elastycznych układów przestrzennych. Podobnie jak CLT, jest materiałem o niskim śladzie węglowym, ponieważ w procesie produkcji drewno działa jako magazyn węgla (Caniato et al., 2021; Ljunggren, 2025).

Układ przegród w budynku został opracowany tak, aby zapewnić odpowiednie parametry cieplne, akustyczne i przeciwpożarowe. Poniżej znajduje się zestawienie warstw przegród:

SZ1 Ściana zewnętrzna CLT z adaptacyjną fasadą:

Adaptacyjne panele elewacyjne z poliwęglanu

Przestrzeń wentylacyjna 5 cm

Blacha perforowana

Membrana wiatro-/wodo-izolacyjna

Wełna skalna λ 0,035 20 cm

Panel CLT 5s 16 cm

Ruszt instalacyjny 5 cm

Płyta gk 1,5 cm

SW1 Ściana wewnętrzna z CLT:

Płyta g-k 1,5 cm

Panel CLT 5s 12 cm

Płyta g-k 1,5 cm

SZ2 Ściana fundamentowa:

Grunt rodzimy + obsypka drenażowa 20 cm

Geowłóknina

Mata kubełkowa HDPE z włókniną

Podwójna papa termozgrzewalna

XPS 20 cm

Preparat gruntujący bitumiczny

Ściana żelbetowa 40 cm

Tynk cementowy 1,5 cm

P1 Strop nad kondygnacjami nadziemnymi:

Posadzka żywiczna 1 cm

Wylewka anhydrytowa 6 cm

Mata akustyczna 1 cm

CLT 7s 18 cm

Ruszt stalowy + wełna 12 cm

Sufit podwieszany

P2 Dach płaski + zielony taras (użytkowy):

Zieleń

Substrat intensywny 10 cm

Geowłóknina (drenaż) 2,5 cm

XPS 20 cm

Membrana EPDM

Sklejka 2 cm

CLT 18 cm

Folia paroizolacyjna

P3 Strop nad garażem (pod kondyg. nadziemnymi):

Wylewka betonowa 5 cm

Folia polietylenowa

Styropian 5 cm

Folia polietylenowa

Płyta żelbetowa 30 cm

Styropian 10 cm

Tynk cementowo-wapienny 2 *cm*

P4 Strop między kondygnacjami garażu

Posadzka żywiczna

Wylewka betonowa 5 *cm*

Folia polietylenowa

Płyta żelbetowa 30 *cm*

P5 Płyta fundamentowa na gruncie

Posadzka wg zestawienia powierzchni

Wylewka betonowa 5 *cm*

Folia polietylenowa

Styropian 10 *cm*

Papa termozgrzewalna

Płyta fundamentowa żelbetowa 60 *cm*

Chudy beton 10 *cm*

Zagęszczony żwir 15 *cm*

Wymiary elementów konstrukcyjnych:

- słup konstrukcyjny: GL32c 24 x 60 *cm*
- podciąg: GL32c 24 x 110 *cm*
- zebrza: GL24h 14 x 45 *cm*
- płyta stropowa: 7-warstwowa CLT 18 *cm*
- płyta stropowa żelbetowa nad kondygnacjami -1 i -2: 30 *cm*
- słup żelbetowy: 60 x 60 *cm*
- podciąg żelbetowy: 60 x 90 *cm*
- płyta fundamentowa: 60 *cm*

Zastosowane rozwiązania (Rys. 17.1.) łączą wysoką efektywność środowiskową drewna klejonego i CLT z nośnością konstrukcji żelbetowej w kondygnacjach podziemnych.

18. Rozwiązania instalacyjne

W projektowanym budynku zaproponowano zestaw innowacyjnych rozwiązań instalacyjnych, które mają na celu minimalizację strat energii, zwiększenie efektywności systemów w budynku oraz aktywne pozyskiwanie energii z otoczenia.

18.1. Internet Rzeczy i algorytmy predykcyjne

Internet Rzeczy (IoT) staje się jednym z ważniejszych narzędzi w projektowaniu i zarządzaniu nowoczesnymi budynkami dydaktycznymi i badawczymi. W omawianym projekcie IoT integruje systemy monitorujące warunki wewnętrzne i zewnętrzne, czyli temperaturę, wilgotność, natężenie światła czy obecność użytkowników z centralnym układem zarządzania. Zbierane dane są następnie analizowane w czasie rzeczywistym i wykorzystywane do sterowania systemami HVAC, oświetleniem czy panelami fasadowymi.

Największy potencjał efektywności wynika jednak z zastosowania algorytmów predykcyjnych, opartych na sztucznej inteligencji i modelach uczenia maszynowego. Dzięki nim możliwe jest przewidywanie zmian zapotrzebowania na energię z uwzględnieniem prognoz pogody, rytmu dobowego użytkowników oraz danych historycznych. Badania pokazują, że takie podejście pozwala ograniczyć zużycie energii w budynkach nawet o 30% (Aftab et al., 2017).

W praktyce oznacza to, że budynek reaguje na aktualne warunki, potrafi je przewidywać i działać proaktywnie, np. chłodząc pomieszczenia jeszcze przed nadejściem fali upałów lub akumulując ciepło w godzinach, gdy dostępna jest energia słoneczna. Takie podejście zwiększa komfort użytkowników i redukuje koszty eksploatacyjne.

18.2. Odzysk ciepła odpadowego (*Heat-to-Heat*)

Odzysk ciepła odpadowego to jedno z najbardziej efektywnych rozwiązań poprawiających bilans energetyczny nowoczesnych budynków. Polega on na wykorzystaniu energii traconej w procesach wentylacji, klimatyzacji, a także w urządzeniach laboratoryjnych i komputerowych, do ponownego ogrzewania lub przygotowania ciepłej wody użytkowej. W budynkach dydaktycznych i badawczych, gdzie istnieje duża koncentracja sprzętu komputerowego, serwerowni czy laboratoriów, potencjał odzysku jest szczególnie wysoki.

Badania pokazują, że systemy rekuperacyjne pozwalają na redukcję zużycia energii nawet o 40-60% w porównaniu do tradycyjnych układów wentylacyjnych. Co więcej, integracja odzysku ciepła z pompami ciepła nowej generacji umożliwia podnoszenie temperatury powietrza lub wody do poziomu przydatnego w instalacjach grzewczych, co jeszcze bardziej zwiększa efektywność (Zhao et al., 2019).

W literaturze wskazuje się także na rosnące znaczenie odzysku ciepła odpadowego z systemów IT i centrów danych, które mogą stać się lokalnym źródłem energii dla budynków akademickich (Ebrahimi et al., 2014; Zhang et al., 2021).

W kontekście projektowanego budynku, system odzysku ciepła odpadowego może być szczególnie przydatny w połączeniu z adaptacyjną fasadą i inteligentnym zarządzaniem energią,

co pozwoli maksymalnie wykorzystać dostępne źródła ciepła. Dzięki temu obiekt zyska zdolność do częściowej samowystarczalności energetycznej.

18.3. Pompy ciepła nowej generacji

Pompy ciepła stanowią jedno z ważniejszych rozwiązań w zakresie ogrzewania i chłodzenia nowoczesnych budynków, umożliwiając wykorzystanie energii z otoczenia, powietrza, wody lub gruntu, do zaspokojenia potrzeb cieplnych. Nowoczesne pompy ciepła charakteryzują się możliwością pracy w układach niskotemperaturowych, co pozwala na ich bezpośrednie powiązanie z ogrzewaniem podłogowym i sufitowym, a także z instalacjami wentylacyjnymi z odzyskiem ciepła. Badania pokazują, że zastosowanie pomp ciepła w budynkach akademickich może zredukować zużycie energii pierwotnej o 30–50% w porównaniu z tradycyjnymi kotłami gazowymi (Jędrzejewski, 2025).

Innowacyjnym kierunkiem jest integracja pomp ciepła z systemami fotowoltaicznymi i magazynami energii, co pozwala na maksymalne wykorzystanie energii ze źródeł odnawialnych i ograniczenie poboru energii z sieci w godzinach szczytu. Badania potwierdzają, że takie rozwiązania umożliwiają redukcję emisji CO₂ o ponad 60% w cyklu życia budynku (Jędrzejewski, 2025).

18.4. Fotowoltaika na światło rozproszone

Rzeczywisty rozwój technologii fotowoltaicznych w ostatnich latach koncentruje się na zwiększeniu sprawności modułów, obniżeniu kosztów produkcji oraz integracji z architekturą. Klasyczne panele krzemowe osiągnęły już granice swojej efektywności (ok. 20-22% w zastosowaniach komercyjnych), dlatego coraz większą rolę odgrywają rozwiązania nowej generacji, czyli ogniwa perowskitowe oraz fotowoltaika zintegrowana z fasadą i przeszkleniami (BIPV) (NREL, 2023).

Ogniwa perowskitowe wyróżniają się wysoką sprawnością przy niskich kosztach produkcji. W testach laboratoryjnych udało się osiągnąć sprawność na poziomie 25,5% dla pojedynczych ogniw oraz powyżej 29% dla ogniw tandemowych łączących perowskit z krzemem (NREL, 2023). Badania wykazują także, że perowskity są bardziej efektywne przy niskim i rozproszonym nasłonecznieniu, przez co są atrakcyjne dla klimatu, np. Gdańska, gdzie dni pochmurnych jest wiele w ciągu roku.

W projektowanym budynku dydaktyczno-badawczym przewidziano integrację kilku technologii: klasycznych modułów PV na dachu technicznym oraz eksperymentalnych rozwiązań transparentnych w strefach przeszkleń. Dzięki temu budynek staje się producentem energii.

19.6. Piezoelektryczne podłogi „energy-floor”

Technologia piezoelektryczna opiera się na zjawisku generowania ładunku elektrycznego w materiałach piezoelektrycznych pod wpływem odkształceń mechanicznych. W kontekście architektury i budownictwa oznacza to możliwość przekształcania energii ruchu użytkowników, czyli kroków, nacisku czy drgań w energię elektryczną. Koncepcja „energy floor” polega na instalowaniu w posadzce modułów piezoelektrycznych, które w trakcie eksploatacji budynku mogą zasilać oświetlenie niskonapięciowe, czujniki IoT czy inne elementy o niewielkim

zapotrzebowaniu energetycznym. Przy odpowiednio dużym natężeniu ruchu (kilkaset tysięcy przejść dziennie) możliwe jest uzyskanie mocy wystarczającej do zasilania lokalnych systemów oświetlenia LED czy stacji ładowania urządzeń mobilnych w przestrzeniach publicznych (Moussa et al., 2022).

19.7. *Quantum Glass*, czyli szyby produkujące prąd

Jednym z najbardziej obiecujących kierunków rozwoju technologii fotowoltaicznych są szyby wyposażone w powłoki kwantowe, określane jako *quantum glass*. Ich działanie opiera się na wykorzystaniu kropek kwantowych, które absorbują część promieniowania słonecznego (zwłaszcza w zakresie UV i podczerwieni), a następnie przekierowują je do krawędzi szyby, gdzie zlokalizowane są ogniwa fotowoltaiczne. Rozwiązanie to pozwala łączyć wysoką transparentność szyb z możliwością generowania energii elektrycznej, co czyni je szczególnie atrakcyjnym elementem fasad i przeszkleń w budynkach o dużych powierzchniach okiennych (Sarniewicz, 2022).

W projektowanym budynku zastosowanie *quantum glass* pozwoliłoby na aktywne włączenie całej powierzchni przeszkleń w proces generowania energii. W połączeniu z adaptacyjną fasadą i innymi systemami (panele PV, piezoelektryczne podłogi) rozwiązanie to mogłoby znacząco zredukować zapotrzebowanie na energię z sieci i zwiększyć poziom niezależności energetycznej budynku.

20.2. Woda deszczowa

Systemy zagospodarowania wody deszczowej są obecnie standardem w budynkach projektowanych zgodnie z zasadami zrównoważonego rozwoju. Ich zadaniem jest odciążenie miejskich sieci kanalizacyjnych i zmniejszenie zużycia wody pitnej w zastosowaniach niewymagających wody o wysokiej jakości. W projektowanym budynku system retencji i ponownego wykorzystania deszczówki został zintegrowany z układem dachów płaskich oraz tarasów zielonych.

22. Wizualizacje i elewacje

Poniższy rozdział przedstawia wizualizacje (Rys. 22.1., 22.2., 22.3., 22.4., 22.5., 22.6.) projektowanego budynku oraz rozwiązanie elewacji.



Rys. 22.1. Widok na elewację frontową od strony ulicy Siedlickiej.



Rys. 22.2. Widok na fragment elewacji frontowej.



Rys. 22.3. Widok na ulicę Bracką.



Rys. 22.4. Widok z zewnątrz na część laboratorium cyfrowej fabrykacji.



Rys. 22.5. Wnętrze makieciarni.



Rys. 22.6. Elewacje.

CZĘŚĆ IV. WNIOSKI KOŃCOWE I PERSPEKTYWY

23. Synteza wyników badań i wpływ na projekt

Proces badawczy prowadzony w ramach niniejszej pracy miał charakter wielowątkowy i łączył w sobie zarówno aspekty analizy urbanistycznej, jak i eksperymenty z optymalizacją parametryczną oraz testowanie innowacyjnych rozwiązań materiałowych i instalacyjnych. Synteza tych działań ujawnia kilka kluczowych obserwacji, które bezpośrednio przełożyły się na kształt projektu, a jednocześnie pozwalają spojrzeć krytycznie na możliwości i ograniczenia zastosowanych metod.

Z perspektywy projektowej największe znaczenie miały analizy środowiskowe i optymalizacje algorytmiczne przeprowadzone w środowisku *Wallacei X* i *Grasshopper*. Wyniki pokazały, że parametry takie jak orientacja brył czy głębokość wysunięć stropów mają wyraźny wpływ na dostęp światła w sezonie zimowym, natomiast w okresie letnim różnice pomiędzy wariantami były mniejsze, co sugeruje ograniczoną skuteczność optymalizacji pod kątem minimalizacji przegrzewania. Tym samym, choć optymalizacja wielokryterialna umożliwiła wygenerowanie zbioru rozwiązań Pareto, praktyczny wybór wariantu wciąż wymagał decyzji projektanta, opartej na kompromisie między wskaźnikami środowiskowymi a funkcjonalnymi. Krytycznie należy podkreślić, że algorytmy same w sobie nie dostarczają „idealnego” rozwiązania, lecz raczej narzędzia do eksploracji możliwości, ich użyteczność jest tym większa, im bardziej projektant potrafi świadomie interpretować dane.

Ważnym uzupełnieniem badań były testy z wykorzystaniem AI w generowaniu formy elewacji. Eksperymenty przeprowadzone z narzędziami takimi jak *Sora* czy *ChatGPT* pokazały ich potencjał w szybkim generowaniu wizualizacji koncepcyjnych, ale równocześnie ujawniły problem monotoniczności wyników oraz trudności w dopasowaniu form do ścisłych założeń projektowych. Należy zauważyć, że zamiast realnej inspiracji, rezultaty stanowiły raczej powtarzalne wariacje kilku schematów formalnych, często oderwanych od kontekstu lokalnego i technologicznych ograniczeń. Tym samym, choć AI może wspierać fazę poszukiwań estetycznych, nie zastępuje wiedzy projektanta ani świadomego procesu projektowego.

Badania nad materiałami i konstrukcją wykazały, że wykorzystanie CLT i drewna klejonego jako głównych komponentów jest zasadne zarówno z punktu widzenia parametrów wytrzymałościowych, jak i zrównoważonego rozwoju. Jednak w zestawieniu z adaptacyjną fasadą poliwęglanową i potencjalnym zastosowaniem termoelektrycznych czy piezoelektrycznych technologii, wyłania się problem ich faktycznej gotowości do wdrożenia w skali budynku publicznego. Takie rozwiązania wciąż pozostają raczej eksperymentem niż standardem w budownictwie.

Wreszcie, analizy funkcjonalne i studium przestrzeni publicznych potwierdziły, że kampus Politechniki Gdańskiej nie posiada spójnych i przestrzeni publicznych. Projektowany obiekt odpowiada na tę potrzebę, integrując strefy dydaktyczne, badawcze i rekreacyjne. Jednak krytycznie należy zauważyć, że nawet najlepsze założenia funkcjonalne nie gwarantują ich pełnej

aktywizacji, jeśli nie zostaną wsparte polityką instytucjonalną, programem wydarzeń i odpowiednim zarządzaniem.

Ważnym aspektem syntezy uzyskanych wyników jest również podkreślenie roli procesualności w projektowaniu. Praca nie dążyła do wskazania jednego „najlepszego” rozwiązania, lecz do zrozumienia, jak poszczególne etapy optymalizacji, testów materiałowych i analiz środowiskowych wpływają na kolejne decyzje projektowe. Idea procesu pozwala spojrzeć na projekt jako dynamiczną sekwencję działań, w której kluczowe są iteracje, weryfikacje i sprzężenia zwrotne między projektantem a narzędziami cyfrowymi. Wyniki badań wykazały, że najbardziej wartościowe nie były same optymalne warianty, lecz możliwość obserwowania, w jaki sposób populacje rozwiązań ewoluują w czasie i jakie kompromisy między celami (np. energetycznymi, funkcjonalnymi, estetycznymi) ujawniają się w trakcie procesu. Znaczenie ma więc refleksja nad tym, że w projektowaniu algorytmicznym i parametrycznym równie istotne jak rezultaty końcowe są mechanizmy, które do nich prowadzą. Ta świadomość pozwala traktować projektowanie architektoniczne jako proces badawczy, w którym eksperyment, analiza i krytyczna interpretacja stają się integralnymi elementami kształtowania formy i funkcji budynku.

Podsumowując, synteza badań wskazuje na realne możliwości wykorzystania narzędzi cyfrowych, algorytmów optymalizacyjnych i innowacyjnych technologii w procesie projektowym, lecz równocześnie wskazuje ich ograniczenia. Projekt zyskał dzięki nim na precyzji i świadomości środowiskowej, ale jego ostateczny kształt wciąż opierał się na roli projektanta jako mediatora między danymi a kontekstem kulturowo-społecznym. Wyniki badań nie są więc celem samym w sobie, lecz narzędziem, które użyte krytycznie i świadomie wzbogacają proces twórczy, zamiast go determinować.

25. Kierunki dalszych badań

Projekt opisany w niniejszej pracy wskazuje, że zastosowanie algorytmów optymalizacyjnych, narzędzi sztucznej inteligencji oraz nowoczesnych rozwiązań materiałowych może znacząco poszerzyć możliwości projektowania architektonicznego. Równocześnie jednak ujawnia szereg ograniczeń i pytań, które mogą stanowić podstawę dalszych badań.

Pierwszym kierunkiem jest pogłębiona integracja narzędzi optymalizacyjnych z procesem projektowym. Wyniki optymalizacji przeprowadzonych w środowisku Wallacei X pokazały, że algorytmy są zdolne do generowania zróżnicowanych rozwiązań, lecz wymagają od projektanta krytycznej interpretacji. W przyszłości istotne będzie rozwijanie metod łączenia optymalizacji środowiskowej z analizami ekonomicznymi i społecznymi, tak aby narzędzia te dostarczały pełniejszego obrazu konsekwencji projektowych. Badania mogą również objąć rozwój metod optymalizacji, w której projektant w czasie rzeczywistym wpływa na przebieg obliczeń.

Kolejnym kierunkiem jest rozwój sztucznej inteligencji w procesie projektowym. Testy z wykorzystaniem narzędzi generatywnych, takich jak Sora, pokazały zarówno potencjał w zakresie inspiracji formy, jak i problem monotoniczności wyników czy ograniczonego powiązania z lokalnym kontekstem. W dalszych badaniach warto skupić się na integracji modeli AI z lokalnymi bazami danych środowiskowych, kulturowych i materiałowych, aby wygenerowane propozycje

były bardziej osadzone w rzeczywistości. Istotnym zagadnieniem jest również krytyczna refleksja nad śladem węglowym i zużyciem energii związanym z AI, co w literaturze naukowej zaczyna być coraz częściej podnoszone jako realne wyzwanie dla zrównoważonego projektowania.

Podsumowując, dalsze badania powinny mieć charakter interdyscyplinarny, łączący architekturę, inżynierię materiałową, informatykę i nauki społeczne. Tylko takie podejście umożliwi rozwój nowych technologii projektowych i budowlanych oraz ich świadome i krytyczne wdrażanie w praktyce, z poszanowaniem środowiska i użytkowników.

SPIS LITERATURY

1. Alberti, L.B. (1960). *Książ dziesięć o sztuce budowania*. Warszawa: PWN.
2. Applied Research & Development Group, Foster + Partners (2022). The Data Challenge for Machine Learning in AECO. In: *Artificial Intelligence and Architecture. From Research to Practice*. Basel: Birkhäuser, pp.136–145.
3. Bernstein, P. (2022). *Machine Learning: Architecture in the Age of Artificial Intelligence*. Londyn: Routledge.
4. Bonenberg, W., Gledrowicz, M. and Radziszewski, K. (2019). *Współczesne projektowanie parametryczne w architekturze*. Poznań: Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej.
5. Brousseau, A. (1969). Fibonacci Statistics in Conifers. *Fibonacci Quarterly* (7), pp.525–532.
6. Chaillou, S. (2022). *Artificial Intelligence and Architecture. From Research to Practice*. Basel: Birkhäuser.
7. Danhaive, R. and Mueller, C. (2002). Artificial Intelligence for Human Design in Architecture. In: *Artificial Intelligence and Architecture. From Research to Practice*. Basel: Birkhäuser, pp. 126-133.
8. Del Campo, M. and Carlson, A. (2022). Strange, but Familiar Enough: Reinterpreting Style in the Context of AI. In: *Artificial Intelligence and Architecture. From Research to Practice*. Basel: Birkhauser, pp.172–187.
9. Denning, P.J. and Tedre, M. (2019). *Computational Thinking*. Cambridge, Massachusetts: The MIT Press.
10. Duarte, J.P. (2001). *Customizing Mass Housing: A Discursive Grammar for Siza Malagueira Houses*. Rozprawa doktorska na Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts.
11. El-Darwish, I.I. (2019). Fractal design in streetscape: Rethinking the visual aesthetics of building elevation composition. *Alexandria Engineering Journal*, 58(3), pp.957–966.
12. Evans, R. (2000). *The Projective Cast: Architecture and Its Three Geometries*. Cambridge, Massachusetts: The MIT Press.
13. Fromonot, F. (1998). *Jorn Utzon: The Sydney Opera House*. Milan: Electa.
14. Grossi, A. (2025). *Available models*. Infrared.city. <<https://infrared.city/knowledge-base/available-models/>>
15. Haigh, T. and Ceruzzi, P.E. (2021). *A New History of Modern Computing*. Cambridge, Massachusetts: The MIT Press.
16. Helenowska-Peschke, M. (2014). *Parametryczno-algorytmiczne projektowanie architektury*. Gdańsk: Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej.
17. Holland, J.H. (1992). *Adaptation in Natural and Artificial Systems*. Cambridge, Massachusetts: The MIT Press.
18. Iwamoto, L. (2009). *Digital Fabrications. Architectural and Material Techniques*. New York: Princeton Architectural Press.
19. Jędrzejewski, D. (2025) 'Pompy ciepła z AI – przyszłość ogrzewania, która już dziś zmienia domy', *Murator.pl*, 12 July. Available at: <https://murator.dom.pl/instalacje/instalacja-grzewcza/pompy-ciepła-z-ai-przyszłość-ogrzewania-która-juz-dzis-zmienia-domy-aa-1Ea8-eVyb-sqUF.html> (Accessed: 28 July 2025).
20. Jones, D. (2014). *Historia Architektury*. Warszawa: Arkady.
21. Knuth, D.E. (1997). *The Art Of Computer Programming*. Massachusetts: Addison-Wesley.
22. Kolarevic, B. (2003). *Architecture in the digital age: design and manufacturing*. New York: Spon Press.
23. Mandelbrot, B.B. (2004). *The Fractal Geometry of Nature*. San Francisco: Times Books.

24. Mitchell, W.J. (1996). *City of bits: space, place and the Infobahn*. Cambridge, Massachusetts: The MIT Press.
25. Moussa, R.R. et al. (2021) 'Energy generation in public buildings using piezoelectric flooring tiles: A case study of a metro station', *Sustainable Cities and Society*, 77.
26. Muscio, A. and Akbari, H. (2017). An index for the overall performance of opaque building elements subjected to solar radiation. *Energy and Buildings*, 157, pp. 184–194.
27. National Renewable Energy Laboratory (NREL) (2025) *Best Research-Cell Efficiency Chart*. Available at: <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency> (Accessed: 28 July 2025).
28. Newborn, M. (2002). *Deep Blue: An Artificial Intelligence Milestone*. New York: Springer.
29. Rogers, D.F. (2001). *An Introduction to NURBS with Historical Perspective*. San Diego: Morgan Kaufmann.
30. Ryan, M. and Gregory, A. (2019). Ethics of Using Smart City AI and Big Data: The Case of Four Large European Cities. *The ORBIT Journal*, 2(2), pp. 1-36.
31. Sarniewicz, M. (2021) 'Quantum Glass, czyli szyby produkujące prąd. Polska firma uruchomiła ich produkcję', *Muratorplus.pl*, 20 December. Available at: <https://www.muratorplus.pl/technika/instalacje-elektryczne/quantum-glass-czyli-szyby-produkujace-prad-od-polskiej-firmy-mi-system-aa-mdSG-iXA7-Fxwp.html> (Accessed: 28 July 2025).
32. Scholfield, P.H. (1958). *Theory of Proportion in Architecture*. Cambridge: Cambridge University Press.
33. Schumacher, P. (2009). Parametricism: A new global style for architecture and urban design. *Architectural Design*, 79(4), pp. 14-23.
34. Silver et al. (2016). Mastering the game of Go with deep neural networks and tree search. *Nature*, 529(7587), pp. 484-489.
35. Simon, H. (1958). Heuristic Problem Solving: The Next Advance Operations Research. *Operations Research*, 6(1), pp. 1-10.
36. Słyk, J. (2012). *Źródła Architektury Informacyjnej*. Warszawa: Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej.
37. Steinfeld, K. (2022). The Sorcerer's Apprentice. In: *Artificial Intelligence and Architecture. From Research to Practice*. Basel: Birkhauser.
38. Sun, C. (2021). *Architecting the Metaverse*. ArchDaily. Accessed 5 Sep 2024. <<https://www.archdaily.com/968905/architecting-the-metaverse>>
39. Taut, O. (2025). *SvN Architects + Planners: Optimizing Urban Wind Comfort through AI-Driven Design*. Infrared.city < <https://infrared.city/case-studies/svn-architects/>>
40. Tedeschi, A. (2014). *AAD_Algorithms-Aided Design. Parametric Strategies using Grasshopper*. Brienza: Le Penseur Publisher.
41. Terzidis, K. (2006). *Algorithmic Architecture*. London: Routledge.
42. Tovar, E. (2023). *Digital Fabrication and Biomaterials in Architecture: Fusing Identity and Technology*. 08 Aug 2023. ArchDaily. Accessed 5 Sep 2024. <<https://www.archdaily.com/1004830/digital-fabrication-and-biomaterials-in-architecture-fusing-identity-and-technology>>
43. Von Meiss, P. (2008). *Elements of Architecture*. New York: Routledge.
44. Weizenbaum, J. (1966). ELIZA, A Computer Program For the Study of Natural Language Communication Between Man and Machine. *Communications of the ACM*, 9(1), pp. 36-45.
45. Witruwiusz (1956). *O architekturze ksiąg dziesięć*. Warszawa: Państwowe Wydawnictwo Naukowe.
46. Woods, J. and Bonnema, E. (2019) Regression-based approach to modeling emerging HVAC technologies in EnergyPlus: A case study using a Vuilleumier-cycle heat pump. *Energy and Buildings*, 186, pp. 195–207.

47. Zhang, X. et al. (2014) Thermal performance of direct-flow coaxial evacuated-tube solar collectors with and without a heat shield, *Energy Conversion and Management*, 84, pp. 80–87.

WYKAZ RYSUNKÓW

Rysunek 2.1. ENIAC (<i>Electronic Numerical Integrator and Computer</i>)	12
Rysunek 2.2. Okładka magazynu Time z 1983 r.	13
Rysunek 2.3. Frank Rosenblatt z Perceptronem	14
Rysunek 3.1. Spirala Fibonacciego i obraz galaktyki	22
Rysunek 3.2. Makieta Domu 11a Petera Eisenmana	23
Rysunek 3.3. Aksonometria projektu Contra-Construction van Doesburga i van Eesterena	25
Rysunek 3.4. Makieta domu inspirowanego wstęgą Mobiusa	26
Rysunek 3.5. Makieta robocza Muzeum Mercedes w Stuttgarcie	27
Rysunek 3.6. Model projektu stadionu N Morettiego	36
Rysunek 3.7. Sutherland używający SketchPada, 1963 r.	37
Rysunek 3.8. Model masterplanu Kartal Pendik w Stambule biura Zaha Hadid Architects	37
Rysunek 3.9. Uproszczony schemat działania sieci neuronowych ANN	41
Rysunek 3.10. Uproszczony schemat działania sieci GAN	42
Rysunek 3.11. Wygenerowane plany mieszkań przy pomocy modelu opartego na GAN	42
Rysunek 3.12. Opera w Sydney projektu Jorna Utzona	46
Rysunek 3.13. Muzeum Guggenheima w Bilbao projektu Franka Gehry'ego	47
Rysunek 3.14. Widok na Kunsthaus w Graz z lotu ptaka	48
Rysunek 3.15. Stacja kolejki linowej w Innsbrucku projektu Zahy Hadid	49
Rysunek 4.1. Instalacje z biomateriałów wydrukowane w 3D	57
Rysunek 7.1. Analiza funkcjonalna w promieniu ok. 1 km od projektowanej działki.	66
Rysunek 7.2. Analiza wysokości zabudowy w promieniu ok. 1 km od projektowanej działki. ...	68
Rysunek 7.3. Analiza komunikacji kołowej i torowej w promieniu ok. 1 km od projektowanej działki.	69
Rysunek 7.4. Analiza komunikacji pieszej w promieniu ok. 1 km od projektowanej działki	70
Rysunek 7.5. Analiza transportu publicznego w promieniu ok. 1 km od projektowanej działki. Od lewej dostępność do przystanków autobusowych, po prawej dostępność do przystanków tramwajowych i kolei	71
Rysunek 7.6. Analiza terenów zielonych w promieniu ok. 1 km od projektowanej działki.	72
Rysunek 7.7. Analiza dostępu do rekreacji w promieniu ok. 1 km od projektowanej działki.	73
Rysunek 7.8. Analiza zagrożenia powodziowego w promieniu ok. 1 km od projektowanej działki	74
Rysunek 8.1. Wykres średniej rocznej temperatury, źródło: aplikacja Infrared.city.	76
Rysunek 8.2. Wykres średniej rocznej wilgotności, źródło: aplikacja Infrared.city.	77
Rysunek 8.3. Ścieżka słońca, źródło: aplikacja Infrared.city.	77
Rysunek 8.4. Ścieżka słońca, źródło: aplikacja Infrared.city.	78

Rysunek 8.5. Prędkość wiatru, wykres roczny, źródło: aplikacja Infrared.city.	78
Rysunek 8.6. Analiza komfortu termicznego, wykres roczny, źródło: aplikacja Infrared.city.	79
Rysunek 8.7. Analiza <i>degree days</i> , wykres roczny, źródło: aplikacja Infrared.city.	79
Rysunek 8.8. Analiza natężenia promieniowania słonecznego, wykres roczny, źródło: aplikacja Infrared.city	79
Rysunek 8.9. Analiza miejskiej wyspy ciepła, źródło: urbanheat.app	80
Rysunek 10.1. Stacja pomiarowa, z której wykorzystano dane	85
Rysunek 10.2. Analiza przewietrzania wykonana w Infrared.city	86
Rysunek 10.3. Wykorzystanie Infrared.city przy projekcie wieżowców w Mississauga w Kanadzie.	87
Rysunek 10.4. Skrypt w Grasshopperze generujący geometrię, analizę nasłonecznienia i proces optymalizacji.	87
Rysunek 11.1. Wstępny układ kształtu brył, na podstawie siatki utworzonej na podstawie analizy sąsiedniej zabudowy (zwłaszcza tej na północ i na zachód od działki)	89
Rysunek 11.2. Maksymalizacja nasłonecznienia zimą, ustawienia optymalizacji, wtyczka Wallacei X w środowisku Grasshopper.	90
Rysunek 11.3. Maksymalizacja nasłonecznienia zimą, pokolenie 49 i jednocześnie front Pareto, widok rozwiązań z góry.	90
Rysunek 11.4. Maksymalizacja nasłonecznienia zimą, pokolenie 49 i jednocześnie front Pareto, widok rozwiązań - aksonometria.	91
Rysunek 11.5. Maksymalizacja nasłonecznienia zimą, pokolenie 0, widok rozwiązań z góry ...	91
Rysunek 11.6. Maksymalizacja nasłonecznienia zimą, pokolenie 0, widok rozwiązań - aksonometria	92
Rysunek 11.7. Minimalizacja nasłonecznienia latem, pokolenie 0, widok rozwiązań z góry	92
Rysunek 11.8. Minimalizacja nasłonecznienia latem, pokolenie 0, widok rozwiązań - aksonometria	93
Rysunek 11.9. Minimalizacja nasłonecznienia latem, pokolenie 49, widok rozwiązań z góry	93
Rysunek 11.10. Minimalizacja nasłonecznienia latem, pokolenie 49, widok rozwiązań - aksonometria	94
Rysunek 11.11. Interfejs Wallacei X, wyniki przeprowadzonej optymalizacji	95
Rysunek 11.12. Rozwiązania Pareto, widok z góry	96
Rysunek 11.13. Rozwiązania Pareto, aksonometria	96
Rysunek 11.14. Rozwiązania pierwszej generacji, widok z góry	97
Rysunek 11.15. Rozwiązania pierwszej generacji, aksonometria	97
Rysunek 11.16. Rozwiązania ostatniej generacji, widok z góry	98
Rysunek 11.17. Rozwiązania ostatniej generacji, aksonometria	98
Rysunek 12.1. Ustawienia i wyniki optymalizacji jednokryterialnej (minimalizacja nasłonecznienia latem).	100
Rysunek 12.2. Widok z góry rozwiązań pierwszej generacji (minimalizacja nasłonecznienia latem)	101
Rysunek 12.3. Aksonometria rozwiązań pierwszej generacji (minimalizacja nasłonecznienia latem)	101

Rysunek 12.4. Widok z góry rozwiązań ostatniej generacji (minimalizacja nasłonecznienia latem)	102
Rysunek 12.4. Aksonometria rozwiązań ostatniej generacji (minimalizacja nasłonecznienia latem)	102
Rysunek 12.5. Widok z góry rozwiązań ostatniej generacji (maksymalizacja nasłonecznienia zimą)	103
Rysunek 12.6. Aksonometria rozwiązań ostatniej generacji (maksymalizacja nasłonecznienia zimą)	103
Rysunek 12.5. Widok z góry rozwiązań pierwszej generacji (maksymalizacja nasłonecznienia zimą)	104
Rysunek 12.6. Aksonometria rozwiązań pierwszej generacji (maksymalizacja nasłonecznienia zimą)	104
Rysunek 12.7. Podsumowanie optymalizacji multikryterialnej	105
Rysunek 12.8. Rozwiązania Pareto, widok rozwiązań z góry	106
Rysunek 12.8. Rozwiązania Pareto, aksonometria rozwiązań	106
Rysunek 12.9. Pierwsza generacja, widok z góry	107
Rysunek 12.10. Pierwsza generacja, aksonometria	107
Rysunek 12.11. Ostatnia generacja, widok z góry	108
Rysunek 12.12. Ostatnia generacja, aksonometria	108
Rysunek 13.1. Ustawienia optymalizacji jednokryterialnej, maksymalizacja nasłonecznienia zimą	110
Rysunek 13.2. Rozwiązania z ostatniej generacji, widok z góry	111
Rysunek 13.3. Rozwiązania z ostatniej generacji, aksonometria	111
Rysunek 13.4. Rozwiązania z pierwszej generacji, widok z góry	112
Rysunek 13.5. Rozwiązania z pierwszej generacji, aksonometria	112
Rysunek 13.6. Wyniki optymalizacji minimalizacji nasłonecznienia latem	113
Rysunek 13.7. Rozwiązania pierwszej generacji, widok z góry	113
Rysunek 13.8. Rozwiązania pierwszej generacji, aksonometria	114
Rysunek 13.9. Rozwiązania ostatniej generacji, widok z góry	114
Rysunek 13.10. Rozwiązania ostatniej generacji, aksonometria	115
Rysunek 13.11. Wyniki optymalizacji pod względem maksymalizacji nasłonecznienia zimą...	115
Rysunek 13.12. Rozwiązania ostatniej generacji, widok z góry	116
Rysunek 13.13. Rozwiązania ostatniej generacji, aksonometria	116
Rysunek 13.14. Rozwiązania pierwszej generacji, widok z góry	117
Rysunek 13.15. Rozwiązania pierwszej generacji, aksonometria	117
Rysunek 13.16. Wyniki optymalizacji pod względem minimalizacji nasłonecznienia latem	118
Rysunek 13.17. Rozwiązania ostatniej generacji, widok z góry	118
Rysunek 13.18. Rozwiązania ostatniej generacji, aksonometria	119
Rysunek 13.19. Rozwiązania pierwszej generacji, widok z góry	119
Rysunek 13.19. Rozwiązania pierwszej generacji, aksonometria	120

Rysunek 13.20. Wyniki optymalizacji multikryterialnej (dla wersji, gdzie wszystkie bryły mogą się poruszać)	121
Rysunek 13.21. Front pareto, widok z góry (dla wersji, gdzie wszystkie bryły mogą się poruszać)	122
Rysunek 13.22. Front pareto, aksonometria (dla wersji, gdzie wszystkie bryły mogą się poruszać)	122
Rysunek 13.23. Wyniki optymalizacji multikryterialnej (dla wersji, gdzie tylko dwie bryły z trzech mogą się poruszać).	123
Rysunek 13.24. Front pareto, widok z góry (dla wersji, gdzie tylko dwie bryły z trzech mogą się poruszać)	123
Rysunek 13.25. Front pareto, widok z góry (dla wersji, gdzie tylko dwie bryły z trzech mogą się poruszać)	124
Rysunek 13.26. Rozwiązanie 18 z pierwszej generacji.	125
Rysunek 13.27. Rozwiązanie 18 z 20. generacji.	125
Rysunek 13.28. Rozwiązanie 1. z 47. generacji.	126
Rysunek 13.28. Rozwiązanie 3. z 49. generacji.	126
Rysunek 15.1. Działka projektowa z zagospodarowaniem.	130
Rysunek 16.1. Rzut parteru z zestawieniem pomieszczeń i powierzchni	131
Rysunek 16.2. Rzut pierwszego piętra z zestawieniem pomieszczeń i powierzchni.	132
Rysunek 16.3. Rzut antresoli z zestawieniem pomieszczeń i powierzchni	133
Rysunek 16.4. Rzut drugiego piętra z zestawieniem pomieszczeń i powierzchni.	134
Rysunek 16.5. Rzut trzeciego piętra z zestawieniem pomieszczeń i powierzchni	135
Rysunek 16.6. Rzut poziomu -1 z zestawieniem pomieszczeń i powierzchni.	136
Rysunek 16.7. Rzut poziomu -2 z zestawieniem pomieszczeń i powierzchni.	136
Rysunek 16.8. Przekrój pionowy budynku, na rzutach oznaczony jako A-A.	137
Rysunek 16.9. Przekrój pionowy budynku, na rzutach oznaczony jako B-B.	137
Rysunek 16.10. Aksonometria eksplodowana pokazująca główne funkcje budynku i ich powiązania	138
Rysunek 16.10. ChatGPT i wygenerowany <i>prompt</i> .	139
Rysunek 16.11. Wygenerowane rozwiązania przez Sora na podstawie zadanego <i>promptu</i> , dając narzędziu dowolność w kształtowaniu formy	140
Rysunek 16.12. Wygenerowane rozwiązania przez Sora na podstawie zadanego <i>promptu</i> , ograniczając narzędzie poprzez model bryły i bardziej szczegółowe założenia projektowe. ...	141
Rysunek 17.1. Aksonometria eksplodowana ukazująca układ konstrukcyjny budynku	145
Rysunek 22.1. Widok na elewację frontową od strony ulicy Siedlickiej.	149
Rysunek 22.2. Widok na fragment elewacji frontowej	149
Rysunek 22.3. Widok na ulicę Bracką	150
Rysunek 22.4. Widok z zewnątrz na część laboratorium cyfrowej fabrykacji.	151
Rysunek 22.5. Wnętrze makieciarni	151
Rysunek 22.6. Elewacje.	152

CZĘŚĆ GRAFICZNA

Plansza 1

Plansza 2

Plansza 3

Plansza 4

Plansza 5

Plansza 6

Plansza 7

Plansza 8

Plansza 9

Plansza 10

Plansza 11

Plansza 12