

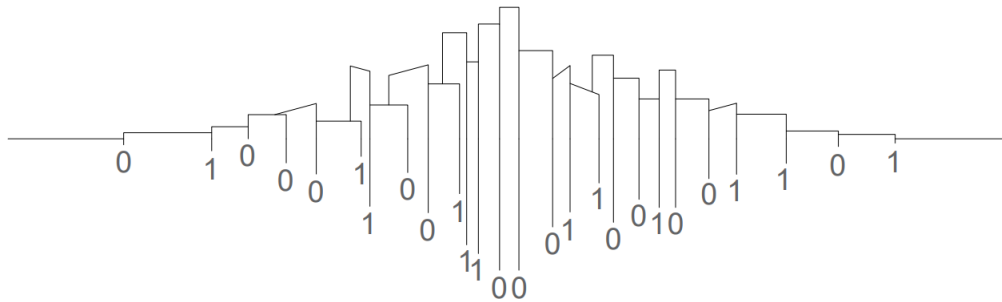


Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu  
Wydział Rolnictwa, Ogrodnictwa i Bioinżynierii

Patryk Antoszewski

## **Środowisko termiczne ekosystemów miejskich: dekodowanie, parametryzacja, optymalizacja**

Thermal environment of urban ecosystems:  
decoding, parametrization, optimization



Rozprawa doktorska w dziedzinie nauk rolniczych  
w dyscyplinie rolnictwo i ogrodnictwo  
Doctoral thesis in agricultural sciences  
in the agriculture and horticulture discipline

Promotor:

dr hab. inż. Dariusz Świerk

Katedra Terenów Zieleni i Architektury  
Krajobrazu

Poznań, 2023

*Mojej babci – pisarce i nauczycielce,  
w dowód wdzięczności za przekazanie genów*

**Dariusz Świerk**  
*imię i nazwisko promotora*

### **Oświadczenie promotora(-ów) rozprawy doktorskiej**

Oświadczam, że niniejsza rozprawa doktorska pt.: „Środowisko termiczne ekosystemów miejskich: dekodowanie, parametryzacja, optymalizacja” została przygotowana pod moim/naszym kierunkiem i stwierdzam, że spełnia ona warunki do przedstawienia jej w postępowaniu o nadanie stopnia naukowego.

Data .....

Podpis promotora rozprawy .....

### **Oświadczenie autora rozprawy doktorskiej**

Niniejszym oświadczam, że przedłożoną rozprawę doktorską pt.: „Środowisko termiczne ekosystemów miejskich: dekodowanie, parametryzacja, optymalizacja” napisałem samodzielnie, tj.:

- nie zleciłem opracowania rozprawy lub jej części innym osobom,
- nie przepisałem rozprawy lub jej części z innych opracowań i prac związanych tematycznie z moją pracą,
- korzystałem jedynie z niezbędnych konsultacji,
- wszystkie elementy rozprawy, które zostały wykorzystane do jej realizacji (cytaty, ryciny, tabele, programy itp.), a nie będące mojego autorstwa, zostały odpowiednio zaznaczone wraz z podaniem źródła ich pochodzenia,
- rozprawa nie była wcześniej przedmiotem procedur związanych z uzyskaniem stopnia naukowego.

Oświadczam ponadto, że niniejsza wersja rozprawy jest identyczna z załączoną wersją elektroniczną.

Mam świadomość, że złożenie nieprawdziwego oświadczenia skutkować będzie niedopuszczeniem do dalszych czynności postępowania w sprawie nadania stopnia doktora lub cofnięciem decyzji o nadaniu mi stopnia doktora oraz wszczęciem postępowania dyscyplinarnego.

Data ..... Podpis autora rozprawy.....

## Spis treści

Streszczenie .....	9
Abstract.....	10
Wykaz skrótów i symboli.....	11
1. Wstęp.....	13
1.1. Tło badań .....	13
<i>Efekt miejskiej wyspy ciepła</i> .....	13
<i>Błękitno-zielona infrastruktura w mitygacji efektu UHI</i> .....	15
<i>Komputerowe wspomaganie planowania mitygacji efektu UHI</i> .....	17
<i>Metaheurystyczna optymalizacja środowiska termicznego miasta</i> .....	19
1.2. Charakterystyka problemów badawczych .....	21
1.3. Hipotezy badawcze i cele badań .....	23
2. Metodyka badań .....	26
2.1. Delimitacja obszaru badań.....	27
2.2. Przegląd parametrów obiektów BE i BGI .....	28
2.3. Analiza statystyczna parametrów obiektów BE i BGI .....	29
2.4. Konstrukcja wytycznych optymalizacyjnych .....	31
2.5. Analiza ograniczeń przestrzeni optymalizacji .....	31
2.6. Projekt opracowania i wdrożenia systemu informatycznego.....	32
Część I .....	35
3. Parametry elementów ekosystemu miejskiego modyfikujące środowisko termiczne....	36
3.1. Ekstra skala przestrzenno-krajobrazowa.....	38
3.2. Materiały budowlane .....	42
<i>Albedo</i> .....	43
3.3. Skala budynku.....	45
<i>Geometria przegród zewnętrznych</i> .....	45
<i>Zielony dach</i> .....	47
<i>Zielona ściana</i> .....	49
<i>Emisja antropogeniczna</i> .....	51
3.4. Skala kanionu ulicznego .....	52
<i>Geometria powierzchni</i> .....	52

<i>Orientacja ulicy</i> .....	56
<i>Zieleń przyuliczna</i> .....	60
3.5. Skala jednostki sąsiedzkiej .....	64
<i>Powierzchnia zabudowy</i> .....	65
<i>Wzór przestrzenny zabudowy</i> .....	66
<i>Gęstość zabudowy</i> .....	68
<i>Wysokość zabudowy</i> .....	70
<i>Tereny zieleni</i> .....	72
<i>Obiekty wodne</i> .....	76
Część II .....	79
4. Analiza danych parametrycznych.....	80
4.1. Analiza ilościowa danych .....	80
4.2. Analiza jakościowa danych.....	86
5. Model parametryczny .....	90
5.1. Dane parametryczne włączone do modelu .....	90
5.2. Architektura modelu parametrycznego.....	92
6. Możliwości optymalizacji środowiska termicznego miejskich ekosystemów w Polsce	94
6.1. Wytyczne do optymalizacji środowiska termicznego ekosystemu miejskiego .....	94
6.2. Ograniczenia w optymalizacji środowiska termicznego ekosystemu miejskiego ...	96
Część III.....	99
7. Opis koncepcji systemu informatycznego .....	100
7.1. Podstawowe informacje .....	100
<i>Cel projektu</i> .....	100
<i>Nazwa</i> .....	100
<i>Znak towarowy</i> .....	101
<i>Poziom gotowości technologicznej przed rozpoczęciem projektu</i> .....	101
7.2. Architektura systemu informatycznego .....	102
<i>M1. Moduł importu danych</i> .....	102
<i>M2. Moduł obliczeń UHI</i> .....	103
<i>M3. Moduł obliczeń PET</i> .....	104
<i>M4. Moduł optymalizacji projektu</i> .....	104
<i>M5. Moduł prezentacji wyników</i> .....	105

<i>M6. Moduł dostosowania projektu</i> .....	106
7.3.    Funkcje systemu informatycznego .....	106
<i>F1. Start programu</i> .....	106
<i>F2. Przygotowanie środowiska projektu</i> .....	106
<i>F3. Wynik optymalizacji</i> .....	107
<i>F4. Dostosowanie projektu optymalizacji</i> .....	107
<i>F4. Koniec programu</i> .....	108
8.    Plan i metodologia opracowania systemu informatycznego .....	109
8.1.    Pakiety pracy.....	109
<i>P1. Zarządzanie projektem</i> .....	109
<i>P2. Opracowanie danych wejściowych</i> .....	111
<i>P3. Opracowanie i testowanie prototypu programu</i> .....	113
<i>P4. Optymalizacja i weryfikacja działania systemu</i> .....	116
8.2.    Zadania projektowe.....	117
<i>Z1. Zarządzanie ciągłością i jakością prac</i> .....	117
<i>Z2. Przeprowadzenie badań pilotażowych</i> .....	118
<i>Z3. Pozyskanie i opracowanie danych parametrycznych</i> .....	119
<i>Z4. Opracowanie macierzy danych parametrycznych</i> .....	120
<i>Z5. Prace programistyczne – etap 1</i> .....	121
<i>Z6. Walidacja prototypu</i> .....	123
<i>Z7. Prace programistyczne – etap 2</i> .....	124
<i>Z8. Walidacja programu</i> .....	125
8.3.    Kamienie milowe .....	126
<i>KM1. Uzyskanie macierzy wsadowych do algorytmu</i> .....	126
<i>KM2. Uzyskanie prototypu algorytmu optymalizującego</i> .....	126
<i>KM3. Zakończenie testów weryfikacyjnych i walidacyjnych prototypu</i> .....	127
<i>KM4. Implementacja prototypu</i> .....	127
<i>KM5. Utworzenie interfejsu użytkownika</i> .....	127
8.4.    Ryzyka i rozwiązania kryzysowe .....	128
<i>R1. Utrudnienia w pomiarach zdalnych</i> .....	128
<i>R2. Problemy pogodowe</i> .....	128
<i>R3. Mała próba danych</i> .....	128

<i>R4. Niska precyzja obliczeń</i> .....	129
<i>R5. Negatywny wynik optymalizacji</i> .....	129
<i>R6. Brak adekwatnych metod C#</i> .....	129
<i>R7. Brak danych o MPZP i WZ</i> .....	130
<i>R8. Zbyt wysoki koszt implementacji planu</i> .....	130
8.5. Produkty i wyniki pośrednie .....	130
8.6. Harmonogram prac i alokacja zasobów .....	133
9. Potencjał technologii i strategia komercjalizacji .....	134
9.1. Analiza rynku.....	134
<i>Rynek docelowy</i> .....	134
<i>Segmenty odbiorców i ich potrzeby</i> .....	135
<i>Wpływ wyników projektu i propozycje wartości</i> .....	136
<i>Konkurencja i przewaga rynkowa</i> .....	139
<i>Bariery i ryzyka wejścia na rynek</i> .....	144
9.2. Przygotowanie do wdrożenia.....	147
<i>Prawa do technologii i ochrona własności intelektualnej</i> .....	147
<i>Kluczowi partnerzy i działania komercjalizacyjne</i> .....	147
<i>Proces wdrożenia i wymagane zasoby</i> .....	149
9.3. Ocena wartości rynkowej technologii.....	149
<i>Kanały dystrybucji produktu i strumienie przychodów</i> .....	149
<i>Koszty utrzymania operacyjności systemu informatycznego</i> .....	152
9.4. Perspektywy rozwoju produktu .....	153
<i>Synergia z innymi projektami</i> .....	153
<i>Jakość produktu, nowe funkcjonalności i obszary</i> .....	153
10. Podsumowanie.....	155
Bibliografia.....	157
Wykaz tabel .....	206
Wykaz rycin.....	207
Wykaz załączników .....	211



## Streszczenie

Efekt miejskiej wyspy ciepła (UHI) opisuje bilans promieniowania słonecznego, który dla terenów zurbanizowanych jest dodatni. Wzrost intensywności zjawiska UHI zmusza do redefinicji pojęcia „urbanistyka” w celu mitygacji skutków zmian klimatu.

Celem pracy jest stworzenie projektu oprogramowania optymalizującego środowisko termiczne miasta. Cel osiągnięto dzięki potwierdzeniu hipotez: 1) modyfikacja termiki miasta jest możliwa poprzez zmiany wartości różnych parametrów obiektów środowiska zbudowanego (BE) i błękitno-zielonej infrastruktury (BGI); 2) mnogość danych związanych z wpływem obiektów BE i BGI na termikę miast umożliwia zbudowanie cyfrowego modelu środowiska termicznego miasta oraz stworzenie wytycznych optymalizacyjnych; 3) możliwe jest zaprojektowanie systemu informatycznego kreującego wielowarstwowe układy obiektów BGI. Celem oprogramowania jest uzyskanie najwyższego poziomu mitygacji efektu UHI i optymalizacji komfortu termicznego człowieka. W pracy wykorzystano kwerendę dostępnej literatury tematu, uzupełnioną o treści graficzne i komentarze opracowane w celu prezentacji wyników. Podczas badań wykorzystano również mieszaną metodologię badań (MMR) z zakresu nauk o informacji, przeprowadzając badania ilościowe i jakościowe.

Przeprowadzenie badań nad obiektami ekosystemu miejskiego (UE) pozwoliło udowodnić pierwszą hipotezę – zmiany wartości różnych parametrów obiektów zlokalizowanych w mieście umożliwiają modyfikację jego środowiska termicznego. Analizując parametry obiektów UE oraz zapisy polskiego prawa udowodniono drugą hipotezę – możliwe jest zbudowanie cyfrowego modelu środowiska termicznego miasta. Stworzono architekturę logiczną modelu, przedstawiono uproszczony wzór matematyczny, wyznaczono wytyczne do optymalizacji termicznej miasta oraz określono ograniczenia dotyczące procesu optymalizacji w Polsce. Trzecią hipotezę udowodniono przedstawiając schemat blokowy algorytmu oraz projekt, opartego na nim, systemu informatycznego – osiągając cele pracy.

Algorytm oraz dokumentacja projektowa są potwierdzeniem gotowości stworzenia systemu informatycznego, umożliwiającego przeniesienie wytycznych optymalizacyjnych na pole planowania przestrzennego. Wysoki potencjał wdrożeniowy projektowanego rozwiązania powoduje, że może on stać się pierwszym na świecie zautomatyzowanym systemem sterowania mikroklimatem miasta, opartym o algorytm genetyczny.

Słowa kluczowe: mitygacja miejskiej wyspy ciepła, parametryzacja środowiska miejskiego, błękitno-zielona infrastruktura, komfort cieplny człowieka, optymalizacja termiczna

## Abstract

The urban heat island effect (UHI) describes the balance of solar radiation, which is positive for urban areas. The increase in the intensity of the UHI phenomenon forces a redefinition of the term "urban planning" in order to mitigate the effects of climate change.

The aim of the work is to create a software project optimizing the thermal environment of the city. The goal was achieved by confirming the hypotheses: 1) modification of the thermal environment of the city is possible by changing the values of various parameters of the objects of the built environment (BE) and blue-green infrastructure (BGI); 2) the multitude of data related to the impact of BE and BGI facilities on city thermals makes it possible to build a digital model of the city's thermal environment and to create optimization guidelines; 3) it is possible to design an IT system creating multi-layered systems of BGI objects. The aim of the software is to achieve the highest level of UHI effect mitigation and optimization of human thermal comfort. The paper uses a query of available literature on the topic, supplemented with graphic content and comments developed to present the results. The research also used a mixed research methodology (MMR) in the field of information sciences, conducting quantitative and qualitative research.

Conducting research on urban ecosystem (EU) objects allowed to prove the first hypothesis – changes in the values of various parameters of objects located in the city allow modification of its thermal environment. By analyzing the parameters of the objects filling the EU and the provisions of Polish law, the second hypothesis was proven – it is possible to build a digital model of the thermal environment of the city. The logical architecture of the model was created, a simplified mathematical formula was presented, guidelines for thermal optimization of the city were set and restrictions on the optimization process in Poland were determined. The third hypothesis was proven by presenting a flowchart of an algorithm and the design of an IT system based on it – achieving the goals of the work.

The algorithm and design documentation confirm the readiness to create an IT system that will enable the transfer of optimization guidelines to the field of spatial planning. The high implementation potential of the designed solution means that it may become the world's first automated system for controlling the city's microclimate, based on a genetic algorithm.

Keywords: urban heat island mitigation, urban parameterization, blue-green infrastructure, human thermal comfort, thermal optimization

## Wykaz skrótów i symboli

A/C	Air Conditioner (urządzenie klimatyzacyjne)
AI	Artificial Intelligence (sztuczna inteligencja)
API	Application Programming Interface (interfejs programowania aplikacji)
AT	Atmospheric Temperature (temperatura powietrza)
B+R	Badawczo-Rozwojowy
BE	Built Environment (środowisko zbudowane)
BGI	Blue Green Infrastructure (błękitno-zielona infrastruktura)
BS	Blue Spaces (przestrzenie zielone)
BU	Building (budynek)
CA	Correspondence Analysis (analiza korespondencji)
CAGR	Compound Annual Growth Rate (skumulowany roczny wskaźnik wzrostu)
CCA	Canonical Correlation Analysis (analiza korelacji kanonicznych)
CIiTT	Centrum Informacji i Transferu Technologii
EbA	Ecosystem based Adaptation (adaptacja oparta na ekosystemach)
ES	Ecosystem Services (usługi ekosystemów)
E-W	East-West (oś wschód-zachód)
FAI	Frontal Area Index (wskaźnik powierzchni czołowej)
GA	Green Area (teren zieleni powierzchniowej)
GIS	Geographic Information System (system informacji geograficznej)
GR	Green Roof (dach zielony)
GS	Green Spaces (przestrzenie niebieskie)
GUS	Główny Urząd Statystyczny
GW	Green Wall (ściana zielona)
H/W	Height/Width (stosunek wysokości do szerokości)
HTML	HyperText Markup Language (hipertekstowy język znaczników)
IF	Impact Factor (współczynnik wpływu)
IoT	Internet of Things (Internet rzeczy)
IT	Information Technology (technologia informacyjna)
LAI	Leaf Area Index (wskaźnik powierzchni liści)
LCP	Land Cover Patterns (wzorce pokrycia terenu)
LCZ	Local Climate Zone (lokalna strefa klimatyczna)

LST	Land Surface Temperature (temperatura przypowierzchniowa)
MMR	Mixed Method Research (mieszana metodologia badań)
MPZP	Miejscowy Plan Zagospodarowania Przestrzennego
NBS	Nature Based Solutions (rozwiązania oparte na naturze)
NE	North East (północny wschód)
NH	NeighborHood (jednostka sąsiedzka)
NIK	Najwyższa Izba Kontroli
N-S	North-South (oś północ-południe)
PDF	Portable Document Format (przenośny format dokumentu)
PET	Physiological Equivalent Temperature (fizjologiczna temperatura równoważna)
RGB	Red, Green, Blue (czerwony, zielony, niebieski)
RRM	RetroReflective Material (materiał odblaskowy)
SC	Street Canyon (kanion uliczny)
SE-NW	South East-North West (oś południowy wschód-północny zachód)
SG	Street Greenery (zieleń przyuliczna)
SVF	Sky View Factor (czynnik widoczności nieba)
SW	South West (południowy zachód)
$T_{mrt}$	Mean Radiant Temperature (średnia temperatura radiacji)
TRL	Technology Readiness Level (poziom gotowości technologicznej)
UCI	Urban Cool Island (miejska wyspa chłodu)
UE	Urban Ecosystem (ecosystem miejski)
UEQI	Urban Ecosystem Quality Index (wskaźnik jakości ekosystemu miejskiego)
UHI	Urban Heat Island (miejska wyspa ciepła)
UPP	Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu
WO	Water Object (obiekt wodny)
WZ	Warunki Zabudowy

# 1. Wstęp

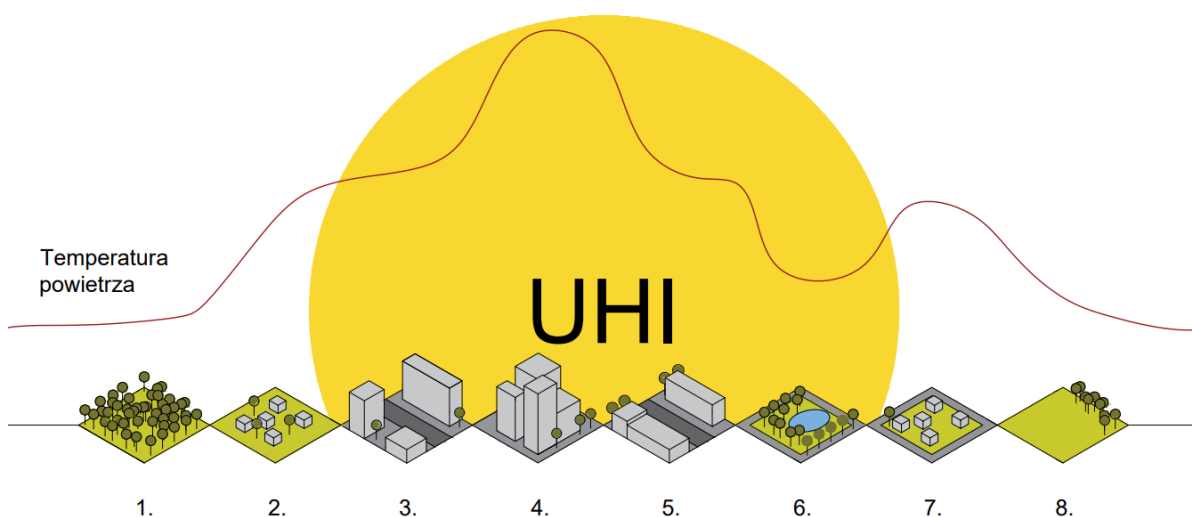
## 1.1. Tło badań

### *Efekt miejskiej wyspy ciepła*

Ludzkość, przekształcając swoje środowisko życia, modyfikowała wzorce pokrycia terenu (LCP). Rozwój globalnej cywilizacji w XXI wieku wpłynął na zwielokrotnienie intensywności i wykładniczy przyrost tempa zmian w krajobrazie. Ciągły wzrost liczby mieszkańców miast (Swanson, 2006) katalizuje ekspansję terenów zurbanizowanych (Mirzaei & Haghighat, 2010), prowadząc do degradacji ekosystemu miejskiego i pozamiejskiego – przede wszystkim poprzez zanikanie naturalnych terenów zieleni i obiektów wodnych (Norton i in., 2015; Salazar i in., 2015; Shiflett i in., 2017). Efektem tego jest nasilenie intensywności i częstotliwości występowania lokalnych anomalii klimatycznych – takich, jak efekt miejskiej wyspy ciepła (UHI). UHI jest opisywany w literaturze jako dodatni bilans promieniowania słonecznego, specyficzny dla terenów zurbanizowanych (Lontorfos i in., 2018; Parsaee i in., 2019; Sharifi i in., 2016; L. Zhao i in., 2014). Intensywność efektu UHI obliczana jest na podstawie różnicy temperatur mierzonych w mieście oraz w stacji referencyjnej poza nim (Gonzalez-Trevizo i in., 2021; Martin i in., 2015). Pół wieku badań prowadzonych nad zjawiskiem UHI sprawiło, że jest ono jednym z lepiej opisanych rodzajów anomalii termicznych (Easterling i in., 1997; Grimmond & Oke, 1991; Karl i in., 1993; Kolokotroni i in., 2012; Kwak i in., 2020; Mitchell i in., 2001; Oke i in., 1991; Oke & Maxwell, 1975; Peron i in., 2015; Sachindra i in., 2016; Taha, 1997).

Intensywność efektu UHI jest wprost proporcjonalna do poziomu zurbanizowania, a temperatura w miastach może być nawet o 5°C wyższa niż w terenach do nich przyległych (ryc. 1) (Lehmann, 2014). Podwyższone temperatury notowane są przez cały rok we wszystkich miastach na Ziemi, jednakże miasta zlokalizowane w różnych strefach klimatycznych charakteryzują się zmiennością intensywności efektu UHI powodowaną różnym położeniem geograficznym (Arnfield, 2003; Oke, 1987; Oke i in., 1991; Sachindra i in., 2016). Warunkuje to wiele czynników i modyfikatorów (Santamouris, 2015; K. V. Wong i in., 2013). Czynniki klimatyczne, związane głównie z natężeniem promieniowania słonecznego, określane są jako niemożliwe do kontrolowania (Lauwaet i in., 2016; Rajagopalan i in., 2014). Wpływają one na wystąpienie efektu UHI i jego przebieg w czasie (Lauwaet i in., 2016; Rizwan i in., 2008; Santamouris, 2014; Santamouris i in., 1999;

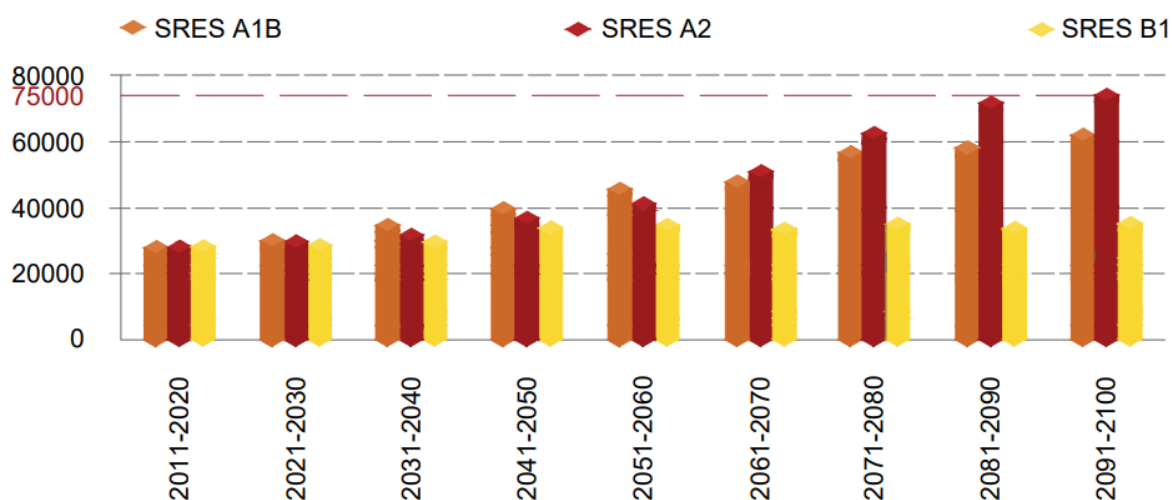
Santamouris & Kolokotsa, 2016). Istnieje jednak grupa czynników uzależnionych od geometrii, morfologii i topografii obiektów środowiska zurbanizowanego, które pozwalają na modyfikację wpływu czynników klimatycznych z poziomu planowania przestrzennego (Lehmann, 2014; Rajagopalan i in., 2014). Warunkują one wewnątrzmięski rozkład temperatury i intensywność efektu UHI (Coseo & Larsen, 2014; Erell i in., 2014; Kwak i in., 2020; Nakata-Osaki i in., 2018; Santamouris, 2018).



**Ryc. 1.** Rozkład profilu termicznego w ekosystemie miejskim w zależności od poziomu zurbanizowania przestrzeni: 1) las, 2) zabudowa wiejska, 3) tereny przemysłowe i komercyjne 4) centrum miasta, 5) zabudowa miejska, 6) tereny zieleni, 7) zabudowa podmiejska 8) tereny rolnicze (źródło: opracowanie własne)

Konsekwencją istnienia efektu UHI jest pogorszenie jakości życia mieszkańców miast głównie poprzez spadek ich komfortu termicznego (Iping i in., 2019; O'Malley i in., 2015). W wymiarze ekologicznym wzrost temperatury prowadzi do degradacji ekosystemu miejskiego, zmniejszenia bioróżnorodności, zwiększenia częstotliwości występowania susz i powodzi oraz wzrostu stężenia zanieczyszczeń. Z ekonomicznego punktu widzenia najważniejszym efektem rosnących temperatur jest destabilizacja rynku, powodowana występowaniem szczytów energetycznych w okresach letnich (Lehmann, 2014; Livesley i in., 2016; Mikami, 2005; Sailor & Fan, 2002; Sarrat i in., 2006). Wydłużenie czasu trwania, zwiększenie intensywności i częstotliwości występowania fal upałów zmniejsza zdolności adaptacyjne mieszkańców miast (Agarwal & Tandon, 2010; D. O. Lee, 1991; S. Yang i in., 2020). Efektem tego jest wzrost śmiertelności mieszkańców spowodowanej przez choroby wynikające ze zmian klimatu (Fahed i in., 2020; Gabriel & Endlicher, 2011; Krüger i in., 2011; Rosso i in., 2016; Taleghani, 2018a) (ryc. 2). Najważniejszym jednak skutkiem efektu

UHI w perspektywie globalnej jest jego wpływ na przyspieszenie wzrostu temperatur, za sprawą zwiększania emisji gazów cieplarnianych (Kolokotroni i in., 2012; Santamouris, 2016).



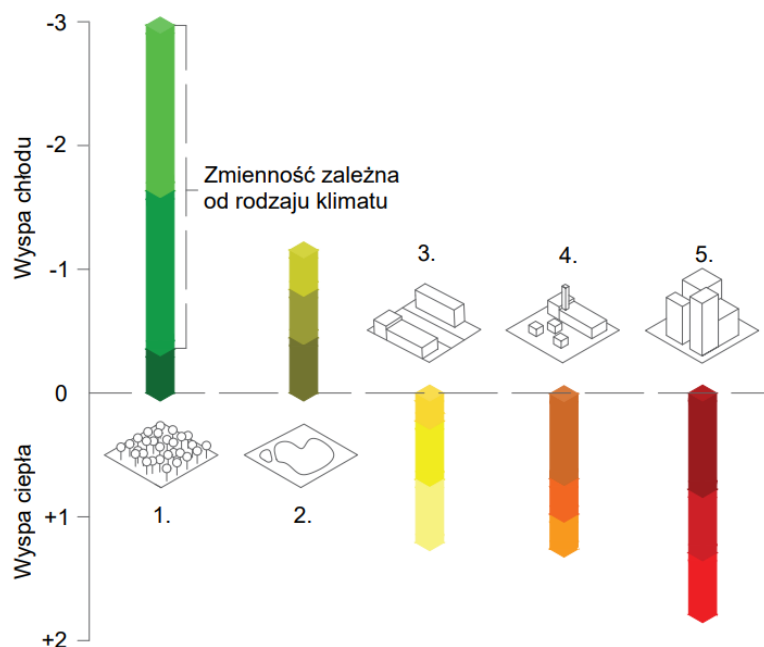
**Ryc. 2.** Przewidywana roczna liczba zgonów spowodowanych stresem ciepła w Polsce, w kolejnych dekadach XXI w. względem różnych scenariuszy rozwoju cywilizacji (SRES)(Nakicenovic i in., 2000) (źródło: opracowanie własne na podstawie (Błażejczyk & Baranowski, 2022)

Ogrom negatywnych konsekwencji istnienia efektu UHI sprawia, że jego mitygacja jest jednym z ważniejszych wyzwań XXI wieku (Shahrestani i in., 2015; Taleb & Abu-Hijleh, 2013). Rozpatrując trendy migracji i dynamicznego wzrostu światowej populacji, spowolnienie procesów urbanizacyjnych wydaje się mało możliwe. Implikuje to konieczność zmiany paradygmatu urbanizmu w celu minimalizacji intensywności efektu UHI. Symulowany wzrost temperatury globalnej, związany ze zmianami klimatu, narzuca już dzisiaj na środowisko naukowe i urbanistów konieczność opracowania strategii mitygacji i adaptacji do przyszłego kryzysu klimatycznego.

### ***Błękitno-zielona infrastruktura w mitygacji efektu UHI***

Problematyka przegrzewania miast weszła do polityki przestrzennej na różnych szczeblach. Zielony Europejski Ład (Unia Europejska), Strategiczny Plan Adaptacji (Polska) lub Krajowy plan na rzecz energii i klimatu na lata 2021-2030 (Polska) sygnalizują podjęcie tematu przez rządy. Wciąż istnieje jednak poważna luka w połączeniu najnowszych osiągnięć z zakresu adaptacji opartej na ekosystemach (EbA) i rozwiązań opartych na naturze (NBS) z planowaniem przestrzennym. Utrudnia to transfer wiedzy do praktyki i spowalnia tempo koniecznych zmian. Na podstawie aktualnego stanu wiedzy możliwe jest wskazanie

skutecznych strategii łagodzenia efektu UHI (ryc. 3) (Boyko & Cooper, 2011; Chokhachian i in., 2020). Do najważniejszych z nich należą: zwiększenie albedo i ewapotranspiracji, zmniejszenie emisji ciepła antropogenicznego, modyfikacja geometrii miasta i dezurbanizacją oraz stosowanie NBS (Akbari i in., 2016; Asmaa Barakat i in., 2017; Cole, 2012; Q. Huang i in., 2016; Jr i in., 2014; Sadri & Zeybekoglu, 2018; Salata i in., 2016; S. Yin & Xiao, 2016).



**Ryc. 3.** Wpływ czynników możliwych do kontrolowania z poziomu planowania przestrzennego na zmiany temperatury w mieście: 1) tereny zieleni, 2) obiekty wodne, 3) nawierzchnie utwardzone i pochłaniające ciepło, 4) antropogeniczna emisja ciepła, 5) geometria wewnętrznej (źródło: opracowanie własne na podstawie (Internet 1))

Najsukuteczniejszą praktyką stosowaną w łagodzeniu podwyższonych temperatur jest wprowadzanie rozwiązań NBS, takich jak błękitno-zielona infrastruktura (BGI), które do celów mitygacji efektu UHI wykorzystują tereny zieleni i obiekty wodne (Lehmann, 2014; B. B. Lin i in., 2016; Livesley i in., 2016). BGI to sieć strategicznie planowanych terenów zieleni i obiektów wodnych, holistycznie zarządzana jako zintegrowany system, mająca na celu zapewnianie szerokiej gamy usług ekosystemów (ES) dla środowiska i społeczeństwa (Ghofrani i in., 2016). Zielonymi przestrzeniami (GS) BGI są wszelkiego rodzaju: lasy miejskie, pola, łąki i pastwiska, obszary nieużytków, trawniki, parki, prywatne ogrody, obiekty sportowe, zielone dachy, zielone ściany i zieleń przyuliczna. Niebieskie przestrzenie (BS) stanowią natomiast: jeziora, sztuczne zbiorniki wodne, rzeki, tereny podmokłe i bagna, ogrody deszczowe itp. (Lehmann, 2014; Menon i in., 2010; Shou & Zhang, 2012; Xiao i in., 2015).



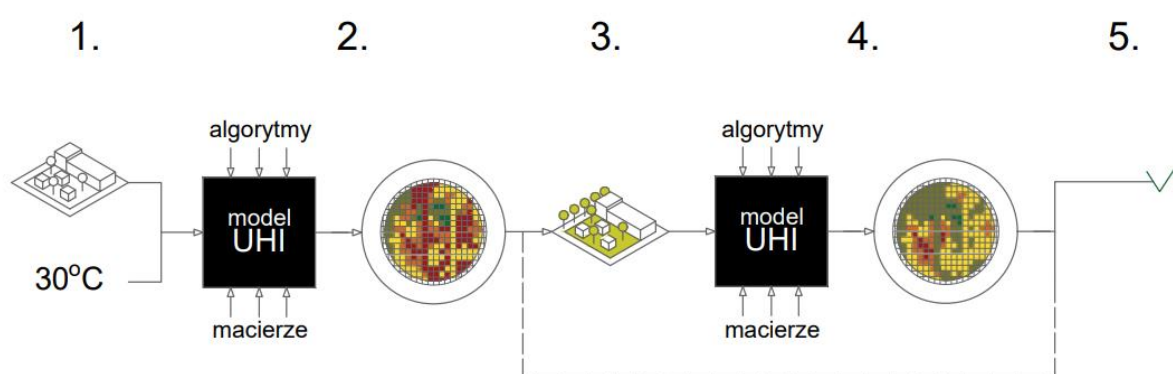
Negatywny wpływ BGI na intensywność efektu UHI wynika z regulacji procesów wymiany energii powierzchniowej (Bonan, 1997; Oke, 1982; Santamouris, 2013; Santamouris i in., 2010; Shou & Zhang, 2012; Xiao i in., 2015). BS stabilizują temperaturę w swoim otoczeniu głównie ze względu na większą pojemność cieplną od powietrza. GS odpowiadają za bezpośrednie pochłanianie promieniowania świetlnego i ciepłego (Lehmann, 2014; Shou & Zhang, 2012; Xiao i in., 2015), co wyraźnie zmniejsza stres termiczny człowieka (Perini & Magliocco, 2014). Włączanie BGI w strukturę miasta jest najkorzystniejszą strategią walki z efektem UHI, ponieważ niweluje główną przyczynę jego powstawania – zmiany w LCP (Bowler i in., 2010; X. Chen i in., 2015; Lehmann, 2014; Yan i in., 2014). Ze względu na zapewnianie bezpieczeństwa ekologicznego i klimatycznego miast oraz polepszanie warunków sanitarnych ich mieszkańców (A. C. K. Lee & Maheswaran, 2011; Tsilini i in., 2015) BGI powinna być włączana do planowania przestrzennego a jej rozwijanie wydaje się konieczne w procesie urbanistycznym.

Miasto to specyficzny rodzaj ekosystemu. Współczesne ekosystemy miejskie (UE) trudno opisać jako będące w stanie dynamicznej równowagi – klimaksie. Dopiero zaczynają być rozumiane korelacje tworzone podczas budowy poszczególnych elementów środowiska zurbanizowanego. By jednak poprawnie projektować BGI nakierowaną na łagodzenie efektu UHI konieczne jest zrozumienie związku między termiką ekosystemu miejskiego i wzorcami pokrycia terenu (LCP) (Liang i in., 2015; L. Zhou i in., 2005). Ta sieć głębokich synergii zachodzących w UE ukazuje mnogość prac do wykonania w celu poznania, zrozumienia i przetłumaczenia praw natury na wytyczne do optymalizacji środowiska termicznego miast (Giannaros i in., 2018; X. Huang & Wang, 2019; Lan & Zhan, 2017; Lau i in., 2015; H. Li i in., 2021; J. Yang, Menenti, i in., 2021).

### ***Komputerowe wspomaganie planowania mitygacji efektu UHI***

Wyzwania XXI wieku wymuszają na planistach stosowanie najnowszych odkryć naukowych i technologicznych w praktyce projektowej. Badania nad wykorzystaniem NBS w EbA celem mitygacji efektu UHI wyznaczają nowy trend w tym kierunku. Mimo to, na rynku istnieje wciąż tylko pięć rozwiązań z tego zakresu: 1) aplikacja „ENVI-met” opracowana przez prof. Michaela Bruse w niemieckim przedsiębiorstwie ENVI-met GmbH (Bruse, 2004), 2) aplikacja „UHI-DS” opracowana pod kierownictwem prof. Lan Ding we współpracy z CRC for Low Carbon Living Ltd z Australii (Ding i in., 2019), 3) moduł „uhiSolver” opracowany przez prof. Andrasa Horvatha i dr Marcusa Luissera w austriackim

przedsiębiorstwie Rheologic GmbH (Teichmann i in., 2021), 4) model „RayMan” opracowany w Niemczech pod przewodnictwem prof. Andreeasa Matzarakisa (Matzarakis i in., 2021), oraz 5) wtyczka „TreePlanter” opracowana przez prof. Fredrika Lindberga i Nilsa Wallenberga ze Szwecji, która jest rozwijana przez społeczność międzynarodową na zasadzie otwartego kodu (Wallenberg i in., 2022). Większość opracowanych do tej pory rozwiązań wykorzystuje modele matematyczne odwzorowujące mikroklimat miejski i ogniskuje się wokół testowania odpowiedzi termicznej przygotowanych planów mitygacji efektu UHI danej przestrzeni. Ich zasadę działania można sprowadzić do jednego ogólnego schematu (ryc. 4).



**Ryc. 4.** Generalna zasada działania programów wspierających decyzyjność w zakresie mitygacji efektu UHI: 1) implementacja danych przestrzennych i meteorologicznych, 2) obliczenie i reprezentacja graficzna środowiska termicznego, 3) implementacja planu mitygacji, 4) obliczenie i reprezentacja graficzna środowiska termicznego, 5) akceptacja lub implementacja nowego planu mitygacji

(źródło: opracowanie własne)

W aplikacjach użytkownik musi wprowadzić dane meteorologiczne lub skorzystać z możliwości automatycznego uzupełnienia danych z baz internetowych. Dane przestrzenne mogą być natomiast zaimportowane z komputera użytkownika, wpisane ręcznie lub pobrane automatycznie. Są one następnie przetwarzane przez moduły matematyczne odnoszące się do wewnętrznych macierzy i algorytmów, na których podstawie obliczany jest rozkład efektu UHI (Bruse, 2004; Matzarakis i in., 2021; Teichmann i in., 2021). Tego typu oprogramowanie umożliwia generowanie obiektów błękitno-zielonej infrastruktury w różnym stopniu zaawansowania, od samych drzew – tak jak „TreePlanter” (Wallenberg i in., 2022) – po całe układy uwzględniające zielone dachy i ściany oraz obiekty wodne, wzorem „ENVI-met” (Bruse, 2004). Na podstawie wprowadzonego do modelu przestrzennego rozkładu obiektów BGI (planu mitygacji efektu UHI) obliczany jest nowy rozkład temperatury, uwzględniający wprowadzone miejskie wyspy zimna (UCI), a wynik jest przedstawiany w formie graficznej

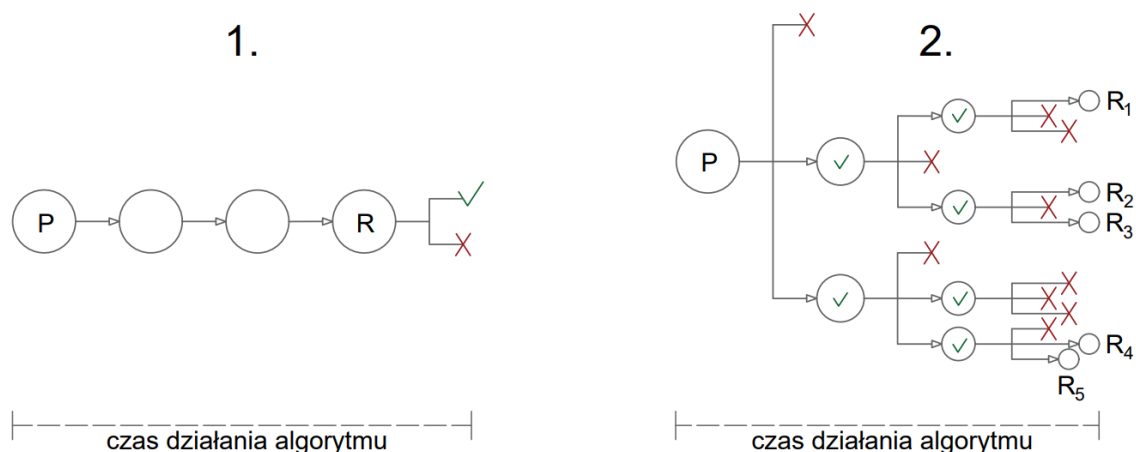
(2D lub 3D). Ostatnim etapem pracy jest konieczność określenia przez specjalistę czy dana alternatywna wersja rozwoju przestrzennego jest optymalna pod kątem zakładanego efektu obniżenia temperatury i na ile jest ona satysfakcjonująca dla strony zainteresowanej wdrożeniem.

Taki schemat działania programu ogranicza jego możliwości obliczeniowe tylko do wspierania podejmowania decyzji planistycznych – poprzez wybór najlepszego z implikowanych do programu planów. Sam użytkownik natomiast musi posiadać szeroką wiedzę z zakresu zagadnień mikroklimatycznych i projektowych. Pewną lukę, a zarazem niszę, stanowi znikoma liczba działań w kierunku bezpośredniego wykluczenia roli projektanta jako osoby determinującej końcowy rozkład przestrzenny obiektów błękitno-zielonej infrastruktury. Z punktu widzenia efektywności obniżania temperatury już sam plan mitygacji wprowadzany do programu przez użytkownika (jako dane wsadowe) stanowi największe ograniczenie optymalizacyjne. Odwrócenie zasady działania programu, w którym to projekt przestrzenny jest wynikiem działania algorytmów optymalizujących, a nie projektanta, może zintensyfikować mitygację efektu UHI poprzez najbardziej optymalny dobór obiektów BGI i ich rozmieszczenie względem siebie i innych obiektów budujących UE.

### ***Metaheurystyczna optymalizacja środowiska termicznego miasta***

Optymalizacyjne problemy naukowe i technologiczne cechują się wysoką złożonością, ogromem ilości danych, synergią zmiennych, koniecznością użycia dużej mocy obliczeniowej, ale też dużą przestrzenią możliwych rozwiązań przy twardych ograniczeniach ich wyszukiwania. Uzasadnionym więc jest stosowanie zaawansowanych technik ich rozwiązywania, takich jak optymalizacja metaheurystyczna zamiast klasycznych metod (Gogna & Tayal, 2013; Lazar, 2002; Nesmachnow, 2014). Metaheurystyka w optymalizacji jest zbiorem metod i procedur zaprojektowanych do efektywnego czasowo i skutecznego rozwiązywania problemów optymalizacyjnych, szczególnie w przypadku niekompletnych informacji lub ograniczonych możliwości obliczeniowych. Wykorzystanie algorytmów metaheurystycznych nie gwarantuje znalezienia optymalnego rozwiązania, ale pozwala na obliczenie najbardziej przybliżonych możliwości rozwiązania problemu (Balamurugan i in., 2015; Beheshti i in., 2013; Bianchi i in., 2009; Nesmachnow, 2014). Ponadto algorytmy te mogą rozwiązać wielopoziomowe problemy jednocześnie, poprzez utworzenie ogólnego schematu do indywidualnych problemów (Glover, 1986; Gogna & Tayal, 2013; Nesmachnow, 2014).

W literaturze znaleźć można wiele optymalizacyjnych algorytmów metaheurystycznych. Należą do nich np.: algorytmy genetyczne, symulowane wyżarzanie, ewolucja różnicowa, algorytmy pszczół itp. (Bianchi i in., 2009; Blum & Roli, 2003; Nesmachnow, 2014). Algorytmy te dzieli się, ze względu na zasadę działania, na deterministyczne i stochastyczne (ryc. 5). Algorytmem deterministycznym określa się algorytm działający w sposób ustalony na wejściu, mechaniczny, bez dozy losowości. Oznacza to, że każdorazowe uruchomienie tego typu algorytmu doprowadzi do identycznego wyniku optymalizacji. Dobrym przykładem algorytmu deterministycznego jest algorytm hill-climbing. Za algorytm stochastyczny uznaje się natomiast algorytm bazujący na pewnej dawce losowości. Mimo podania takich samych danych wejściowych algorytmy stochastyczne zwykle osiągają inny wynik końcowy lub pewną pulę wyników optymalnych o różnych parametrach. Do tego typu algorytmów należą np. algorytmy genetyczne. Bazując na biomimetyce selekcji naturalnej algorytmy genetyczne lepiej sprawdzają się przy rozwiązywaniu wszelkich złożonych i wielopoziomowych problemów optymalizacyjnych, w których efekt optymalizacji jest trudny do przewidzenia (X.-S. Yang, 2011).



**Ryc. 5.** Dualna natura działania algorytmów metaheurystycznych: 1) algorytm deterministyczny, 2) algorytm stochastyczny, P - problem, R – rozwiązanie,  $R_n$  - możliwe rozwiązania (źródło: opracowanie własne)

Prace nad wykorzystaniem metaheurystyki w optymalizacji termicznej miasta były do tej pory prowadzone przez niewielu badaczy. Stojakovic i in. (2020) zgłębiali możliwości wykorzystania algorytmu ewolucyjnego do pozycjonowania drzew celem złagodzenia intensywności nasłonecznienia w dziedzińcowym bloku zlokalizowanym w Belgradzie (Stojakovic i in., 2020). Ooka i in. (2008) wykorzystali algorytmy genetyczne w badaniu optymalnego położenia i rozmieszczenia drzew w symulacjach projektu bloku mieszkalnego

w Tokio (Ooka i in., 2008). Innym przykładem wykorzystania metaheurystyki w optymalizacji termicznej środowiska miejskiego jest przetestowanie przez Zhao i in. (2017) możliwości zoptymalizowania lokalizacji drzew przy użyciu algorytmu zachłannego, w celu zwiększenia efektu zacienienia budynku (Q. Zhao i in., 2017).

W badaniach Wallenberg i in. (2022) z powodzeniem wykorzystano algorytm hill climbing do przetestowania możliwych pozycji drzew, aby zidentyfikować najlepsze ich umiejscowienie w stosunku do sumarycznego zacienienia nawierzchni i redukcji obciążenia radiacyjnego (Wallenberg i in., 2022). Autorzy opracowali, jedyny do tej pory, ogólnodostępny program wykorzystujący metaheurystykę w optymalizacji termicznej środowiska zurbanizowanego. Wtyczka „TreePlanter” służy łagodzeniu stresu cieplnego powodowanego obciążeniem radiacyjnym w środowisku miejskim za pomocą optymalizacji umiejscowienia drzew. Algorytm hill-climbing, poprzez ocenę łącznego efektu zacienienia drzew i odpowiadający im spadek średniej temperatury radiacyjnej ( $T_{mrt}$ ), optymalizuje rozmieszczenie drzew w terenie symulacji. W tym wypadku zastosowanie algorytmu hill-climbing warunkuje końcowy wygląd projektu mitygacji, dobierając najbardziej optymalne rozmieszczenie obiektów w stosunku do największego sumarycznego spadku temperatury ich otoczenia (Wallenberg i in., 2022). Omawiany program ma jednak pewne ograniczenia, wynikające z deterministycznej natury zastosowanej heurystyki. Po pierwsze – konieczność określenia parametrów i liczby implementowanych drzew przed rozpoczęciem symulacji ogranicza dostęp do oprogramowania osobom niezwiązanym ze środowiskiem projektowym i naukowym. Po drugie – brak możliwości zastosowania wielopoziomowej puli rozwiązań z zakresu BGI (zielonych dachów lub ścian) w optymalizacji przestrzeni ogranicza możliwość zastosowania tego modelu w szerszym ujęciu, np. w istniejącej gęstej tkance miejskiej, gdzie nie ma możliwości wprowadzenia zieleni na poziomie gruntu.

## **1.2. Charakterystyka problemów badawczych**

Dzięki zastosowaniu odpowiednich narzędzi algorytmicznych proces generowania projektów mitygacji efektu UHI może zostać zautomatyzowany i przyspieszony, a ostatecznie możliwe będzie uzyskanie większego efektu obniżenia temperatury. Na podstawie wiedzy na temat parametrów obiektów BGI i środowiska zbudowanego (BE), wpływających na modyfikację środowiska termicznego miasta, możliwe jest zbudowanie wielowymiarowej puli rozwiązań problemu przegrzewania miast. Analiza wszystkich możliwych optymalnych

rozwiązań może być jednak niemożliwa lub nieracjonalna czasowo, stąd pożądane jest wdrożenie algorytmów metaheurystycznych w obliczeniach oraz zastosowanie optymalizacji z wykorzystaniem algorytmów genetycznych. Takie działanie, oparte o metodę selekcji naturalnej, pozwoli na wygenerowanie pierwszej liczby rozwiązań na podstawie losowo przybranych parametrów (populacja) oraz na ocenę i krzyżowanie rozwiązań o najkorzystniejszych genach w kolejnych iteracjach (pokoleniach). Poprzez losową mutację genów (wartości i konfiguracji parametrów), odpowiednie dobranie architektury algorytmu oraz hiper parametrów możliwe będzie znalezienie rozwiązań optymalnych, które pozwolą na wybór odpowiedniego dla użytkownika rozwiązania przestrzennego jako planu mitygacji efektu UHI. Taki kierunek działań pozwoli na 1) wyzbycie się ograniczeń dyktowanych projektem, 2) pełną automatyzację procesu projektowego oraz 3) uzyskanie najbardziej korzystnej z punktu widzenia obniżania temperatury optymalizacji środowiska termicznego w różnych kontekstach przestrzennych. Jednocześnie zwiększona zostanie dostępność oprogramowania dla szerszej grupy odbiorców za sprawą minimalizacji ilości danych wejściowych koniecznych do wprowadzenia do programu oraz braku konieczności posiadania wysokich kompetencji z zakresu wiedzy projektowej i mikroklimatycznej do oceny wyników pracy programu. Aby przeprowadzić optymalizację środowiska termicznego miasta, konieczne jest osadzenie algorytmów optymalizacyjnych w dokładnym modelu odwzorowania miejskiej termiki. Aby możliwe było zbudowanie takiego modelu konieczne jest poznanie wpływu szerokiej gamy parametrów obiektów występujących w przestrzeni zurbanizowanej na modyfikację intensywności efektu UHI. Ostatnie dwie dekady badań nad metodami mitygacji efektu UHI zaowocowały powstaniem wielu istotnych artykułów przeglądowych. Nie stanowią one jednak holistycznego przeglądu możliwych rozwiązań planistycznych, a ponadto często zestawiają wyniki z wielu stref klimatycznych, co jest błędem przy skalowaniu rozwiązań NBS. Precyzja modelu mikroklimatycznego zależy od ilości i normalizacji danych, na których bazuje. Pérez i in. (Pérez i in., 2014) twierdzą, że zwiększenie normatywizmu badań jest możliwe przy użyciu danych pochodzących z jednej strefy klimatycznej. Takie podejście pomaga wyzbyć się heterogeniczności danych, wynikających z: 1) odmienności amplitud rocznych i dobowych temperatur, 2) wzorców wiatru i 3) wilgotności powietrza pomiędzy poszczególnymi klimatami, które wpływają na różną intensywność oddziaływania poszczególnych parametrów obiektów BGI i BE na temperaturę powietrza (Kolokotsa i in., 2013; Yu i in., 2020).

Pozyskanie pełniejszego zakresu danych dotyczących wpływu wszystkich parametrów obiektów BGI i BE na intensywność efektu UHI w jednej strefie klimatycznej pozwoliłoby

na opracowanie cyfrowego modelu odwzorowania środowiska termicznego miasta, stworzenie wytycznych do jego optymalizacji termicznej oraz zaprojektowanie ścieżki symulacji optymalnych planów mitygacji efektu UHI dla każdego miasta zlokalizowanego w granicach danej strefy klimatycznej. Dokładne poznanie lokalnych aspektów prawnych związanych z możliwością lokalizacji poszczególnych obiektów BGI w tkance miejskiej pozwoliłoby natomiast na skuteczne wdrożenie opracowanego przez aplikację planu mitygacji.

### **1.3. Hipotezy badawcze i cele badań**

#### **Hipoteza badawcza nr 1:**

Modyfikacja środowiska termicznego ekosystemu miejskiego jest możliwa poprzez zmiany wartości parametrów geometrycznych, morfologicznych i topograficznych obiektów BE i BGI.

#### **Hipoteza badawcza nr 2:**

Mnogość znormalizowanych danych parametrycznych związanych z wpływem obiektów BE i BGI na termikę miast w kontekście jednej strefy klimatycznej umożliwia zbudowanie precyzyjnego cyfrowego modelu środowiska termicznego ekosystemu miejskiego oraz stworzenie wytycznych projektowych pozwalających na jego optymalizację.

#### **Hipoteza badawcza nr 3:**

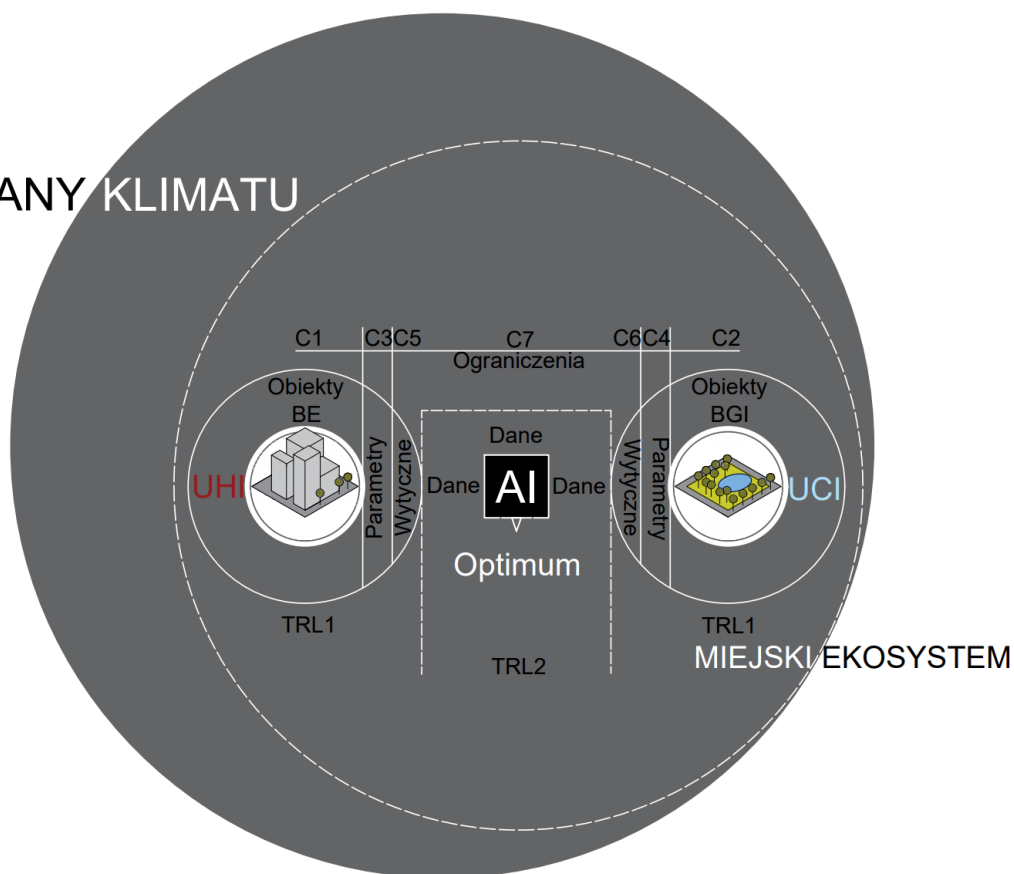
Możliwe jest zaprojektowanie oprogramowania automatycznie kreującego wielowarstwowe i realne w implementacji układy błękitno-zielonej infrastruktury w odpowiedzi na podane przez użytkownika warunki przestrzenno-termiczne obszaru zurbanizowanego. Celem którego jest uzyskanie najwyższego możliwego poziomu mitygacji efektu UHI i optymalizacji komfortu termicznego człowieka we wskazanym terenie.

Celem pracy jest stworzenie projektu oprogramowania optymalizującego środowisko termiczne miasta. Osiągnięcie celów cząstkowych ma potwierdzić pierwsze dwie hipotezy badawcze, a uzyskanie koncepcji produktu – jako celu głównego – potwierdzi hipotezę nr 3. Aby osiągnąć cel główny przewiduje się przejście dwóch etapów technologicznych dla projektowanego oprogramowania: TRL 1 – zaobserwowanie podstawowych zależności i TRL 2 – sformułowanie koncepcji technologii (Mankins, 1995). W ramach omawianych etapów technologicznych zostanie osiągniętych siedem celów cząstkowych (ryc. 6):

- 1) wykonanie obszernego przeglądu literatury w celu poznania i usystematyzowania parametrów geometrycznych, morfologicznych i topograficznych obiektów środowiska zbudowanego (BE), które mogą modyfikować intensywność efektu UHI w ekosystemie miejskim (TRL 1);
- 2) wykonanie obszernego przeglądu literatury w celu poznania i usystematyzowania parametrów projektowych geometrycznych, morfologicznych i topograficznych obiektów błękitno-zielonej infrastruktury (BGI), które mogą modyfikować intensywność efektu UHI w ekosystemie miejskim (TRL 1);
- 3) przeprowadzenie analizy statystycznej parametrów dla obiektów BE w celu wyselekcjonowania parametrów projektowych umożliwiających stworzenie architektury modelu środowiska termicznego ekosystemu miejskiego (TRL 1);
- 4) przeprowadzenie analizy statystycznej parametrów dla obiektów BGI w celu wyselekcjonowania parametrów projektowych umożliwiających stworzenie architektury modelu środowiska termicznego ekosystemu miejskiego (TRL 1);
- 5) opracowanie wytycznych do projektowania mikroklimatycznego (optymalizacji termicznej) miast z użyciem obiektów BE w celu przedstawienia możliwości ich zastosowania w mitygacji efektu UHI (TRL 1);
- 6) opracowanie wytycznych do projektowania mikroklimatycznego (optymalizacji termicznej) miast z użyciem obiektów BGI w celu przedstawienia możliwości ich zastosowania w mitygacji miejskiej wyspy ciepła (TRL 1);
- 7) przeprowadzenie analizy polskich aktów prawnych wyznaczających ograniczenia w projektowaniu obiektów BGI (optymalizacji termicznej) w celu określenia wykluczeń w lokalizacji i minimalnych odległości posadowienia obiektów BGI względem obiektów BE (TRL 1).



# ZMIANY KLIMATU



**Ryc. 6.** Diagram logiczny hipotez badawczych na tle celów cząstkowych i etapów technologicznych (źródło: opracowanie własne)

Osiągnięcie celu głównego będzie oznaczało uzyskanie drugiego poziomu gotowości technologicznej produktu.

## 2. Metodyka badań

Niniejsze opracowanie jest interdyscyplinarną pracą opisującą koncepcję systemu informatycznego oraz projekt procesu produkcji i wdrożenia oprogramowania. Różne aspekty badawcze poruszane w pracy związane są z architekturą krajobrazu, urbanistyką, inżynierią środowiska oraz informatyką. Na etapie przygotowania dysertacji przeprowadzono badania pilotażowe, których celem było zapoznanie się z literaturą przedmiotu i zdefiniowanie niszy badawczej. Badania pilotażowe zaowocowały powstaniem dwóch publikacji, w których zasygnalizowano konieczność dokładnego zdefiniowania i opisanie parametrów środowiska miejskiego, mających wpływ na mitygację efektu UHI.

Praca została podzielona strukturalnie na trzy części – część I i II zawiera zsyntetyzowane i zredagowane treści uzupełnione o treści graficzne i komentarze opracowane na potrzeby prezentacji wyników badań w dysertacji. Treści znajdujące się w części III są poufnymi danymi stanowiącymi know-how Uniwersytetu Przyrodniczego w Poznaniu:

- 1) część I („dekodowanie”) obejmuje badania teoretyczne w zakresie istniejącej literatury tematu i odpowiada za realizację celów cząstkowych (1 i 2). Jej zadaniem jest zdobycie i systematyzacja wiedzy o badanym zjawisku oraz opracowanie teorii z nim związanej;
- 2) część II („parametryzacja”) obejmuje badania przy użyciu metod statystycznych i odpowiada za realizację celów cząstkowych (3-7). Jej efektem jest opracowanie modelu logicznego zjawiska i przedstawienie możliwości jego optymalizacji;
- 3) część III („optymalizacja”) dotyczy działań badawczo-rozwojowych i odpowiada za realizację celu głównego. Jej bezpośrednim wynikiem jest projekt opracowania i wdrożenia systemu informatycznego celem symulacji optymalizacji zjawiska.

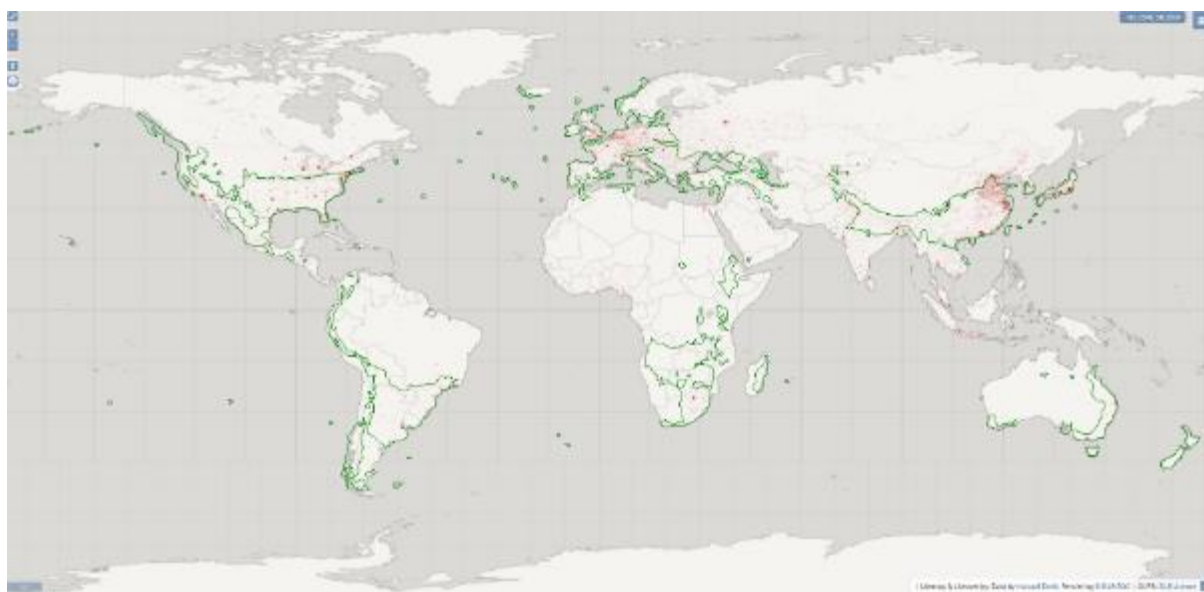
W realizacji pracy użyto mieszanej metodologii badań (MMR) z zakresu nauk o informacji (Cibangu, 2010; Schoonenboom & Johnson, 2017). W toku części badawczej komplementarnie wykorzystano badania ilościowe i jakościowe, które zintegrowano w celu potwierdzenia hipotez (Creswell, 2012; Tashakkori & Creswell, 2007).

- 1) Metody badań jakościowych wykorzystano w stosunku do badanych obiektów BGI i BE, ich parametrów oraz sposobu analizy danych, uwzględniając ich redukcję, reprezentację i opis wniosków w zadaniach związanych z systematyzacją wiedzy. Metody te wykorzystano również do zbudowania holistycznego obrazu modyfikatorów efektu UHI oraz wytycznych do optymalizacji środowiska termicznego miasta.
- 2) Metody badań ilościowych zastosowano w weryfikacji częstości występowania specyficznych badań z zakresu wpływu parametrów obiektów BGI i BE na

intensywność efektu UHI oraz w ocenie możliwości wykorzystania poszczególnych parametrów w modelowaniu środowiska termicznego miasta.

## 2.1. Delimitacja obszaru badań

Obszary o znaczącym wpływie wywieranym przez cywilizację, determinowanym zmianami w pokryciu terenu i zagęszczeniu obszarów zurbanizowanych, są najbardziej podatne na przegrzewanie. Największym poziomem tego zjawiska charakteryzują się tereny Azji południowo-wschodniej, Europy, południowo-wschodniej części Ameryki Północnej, środkowo-wschodniej części Ameryki Południowej, południowej Afryki i wschodniej Australii (Esch i in., 2022; Lamptey i in., 2005; Internet 2). Podobną zależność dostrzec można analizując mapy występowania efektu UHI na świecie (Manoli i in., 2019). Nakładając mapę klasyfikacji stref klimatycznych wg Köppena-Geigera (Rubel i in., 2017) na mapę poziomu „odcisku cywilizacyjnego” widoczna jest interferencja tych obszarów z zasięgiem strefy klimatu umiarkowanego (C) (ryc. 7).



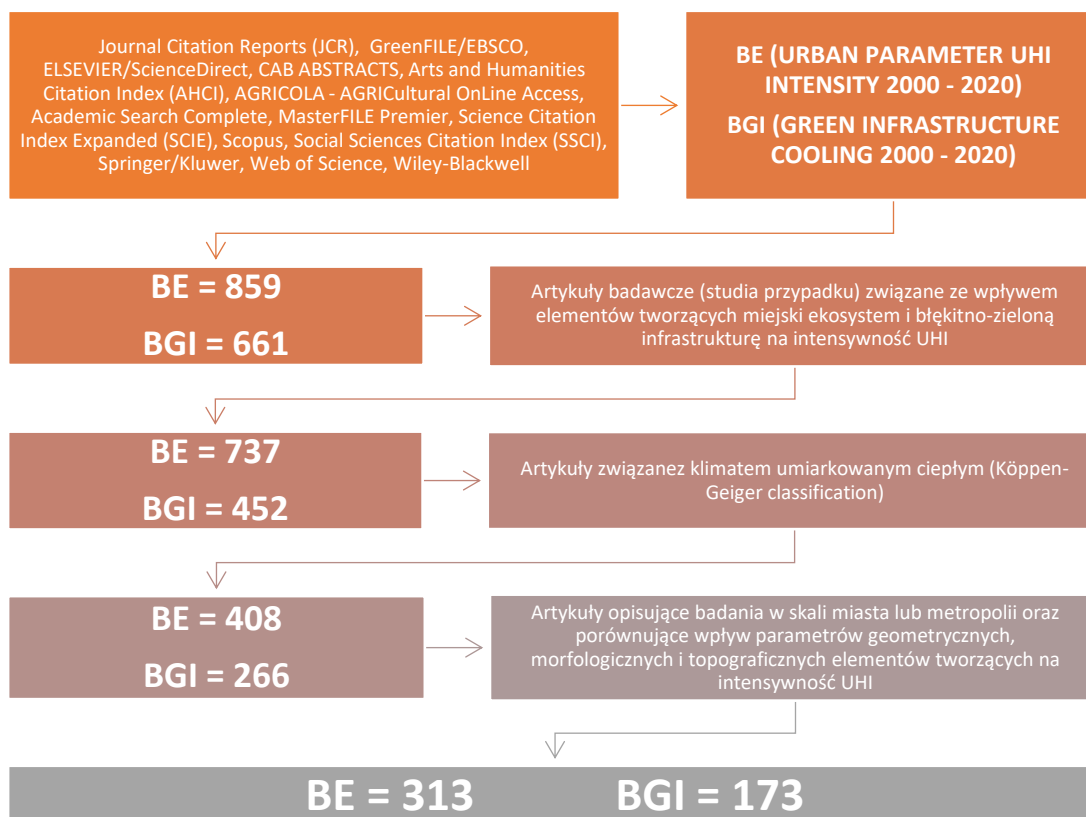
**Ryc. 7.** Zagęszczenie osad ludzkich na tle klimatu umiarkowanego (źródło: opracowanie własne na podstawie (Internet 3))

To właśnie strefa klimatu umiarkowanego powinna stać się modelowym obszarem badań nad efektem UHI oraz rozwiązaniami mitygacyjnymi z użyciem NBS. Wybór klimatu umiarkowanego jako kryterium delimitacji obszaru badań wydaje się zasadny w kontekście

nierównomiernego rozkładu przestrzennego obserwowanych zmian klimatu na Ziemi (Internet 4).

## 2.2. Przegląd parametrów obiektów BE i BGI

W badaniach przeprowadzono przegląd aktualnego stanu wiedzy z zakresu parametrów obiektów znajdujących się w ekosystemie miejskim, mogących mieć wpływ na modyfikację intensywności efektu miejskiej wyspy ciepła. Normalizacja pozyskanych danych została zapewniona poprzez wykorzystanie normatywnej, czteroetapowej procedury bibliograficznej stosowanej w przeglądach systematycznych z zakresu badań nad efektem UHI, która zakłada: 1) określenie szerokich kryteriów wyszukiwania dla uzyskania szerokiej puli badań; 2) ograniczenie, w oparciu o rygorystyczne kryteria, liczby badań do kwalifikującej się literatury; 3) zebranie informacji z kwalifikujących się dokumentów i zakodowania ich jako dane statystyczne; 4) przedstawienie dyskusji na temat wyników wybranych badań i synteza wniosków (ryc. 8) (Pullin & Stewart, 2006; Stewart, 2011).



**Ryc. 8.** Schemat logiczny wyboru publikacji do przeglądu parametrów BE i BGI mogących mieć wpływ na modyfikację intensywności efektu UHI (źródło: opracowanie własne)

Kwerendę bibliograficzną przeprowadzono w otwartych bazach danych i bazach danych z dostępem instytucjonalnym. W celu eliminacji nieaktualnych wyników badań w przeglądzie skupiono się na artykułach naukowych z ostatniego dwudziestolecia. Aby uzyskać zweryfikowane dane *in-situ* pozyskiwano artykuły naukowe zawierające studia przypadków, odrzucając artykuły opisujące zjawiska w przestrzeni modelowanej. Delimitację obszaru badań przeprowadzono w programie Google Earth Pro z wykorzystaniem reanalizowanego algorytmu modelującego rozkład stref klimatycznych w klasyfikacji Köppena-Geigera (Rubel i in., 2017). Koordynaty lokalizacji miast opisywanych w studiach przypadków przeanalizowano pod kątem przynależności do strefy klimatu umiarkowanego w roku publikacji danych. Przypadki sporne – miasta zlokalizowane na styku dwóch stref klimatycznych zostały zaklasyfikowane do przeglądu. W następnej fazie delimitacji usunięto artykuły opisujące badana w skali większej niż metropolia, a także wybrano te, które opisują i porównują wpływ geometrii, morfologii i lokalizacji komponentów ekosystemu zurbanizowanego i błękitno-zielonej infrastruktury na modyfikację temperatury powietrza.

Do badań literaturowych zakwalifikowało się sumarycznie 486 artykułów naukowych, z czego 313 dotyczyło parametrów obiektów BE a 173 parametrów obiektów BGI. Dane pozyskane w tym etapie miały 1) ujawnić złożoności sieci powiązań mikroklimatycznych istniejących w ekosystemie miejskim, 2) odkryć efekt synergii zachodzący pomiędzy poszczególnymi jego elementami oraz 3) wyselekcjonować możliwie wszystkie opisane dotychczas parametry obiektów BGI i BE.

Wszystkie ryciny w tej części pracy zostały wykonane przy użyciu oprogramowania Autodesk AutoCAD 2023.

### **2.3. Analiza statystyczna parametrów obiektów BE i BGI**

W celu wyznaczenia parametrów istotnych dla możliwości zastosowania w budowie modelu UHI wykonano analizę statystyczną wyników badań z pozyskanych 486 artykułów naukowych. Dane parametryczne zostały zgromadzone w tabeli (zał. 1) i opracowane w formie macryc wyników, na których ostatecznie przeprowadzono analizy.

Aby wykonać macrycę wynikową i przeprowadzić interpolację przeglądowych danych literaturowych na dane numeryczne zastosowano rozkład zero-jedynkowy. W obu wyszukiwaniach każda publikacja została potraktowana jako 1 n, a następnie skonstruowano dwie macierze zawierające powtarzalne zmienne dla:

1. przeglądu parametrów obiektów BE:
  - a) obiekty środowiska zbudowanego: jednostka sąsiedzka, kanion uliczny i budynek,
  - b) rodzina parametrów: geometryczne, morfologiczne i topograficzne,
  - c) kraj, w którym przeprowadzono badanie,
2. przeglądu parametrów obiektów BGI:
  - a) obiekty błękitno-zielonej infrastruktury: obiekt wodny, teren zieleni, zielen przyuliczna, zielony dach, zielona ściana,
  - b) rodzina parametrów: geometryczne, morfologiczne i topograficzne,
  - c) kraj, w którym przeprowadzono badanie.

Pozwoliło to na użycie technik statystycznych do tego typu danych opisowych.

Analizy statystyczne opierały się na analizie dyskryminacyjnej. Efektem analizy było sprawdzenie, które z rodzin parametrów są najczęściej badane dla BE i BGI oraz w jakich krajach były najczęściej badane. Zastosowano techniki ordynacji, porządkując próby badawcze wzdłuż gradientu reprezentowanego przez oś rzędnej i odciętej.

Analiza zgodności (CA) została przeprowadzona w celu sprawdzenia, która z technik będzie najbardziej odpowiednia dla analizowanego zbioru danych. Procedura ta miała wykazać charakter struktury analizowanego zbioru danych w oparciu o długość gradientu (liniowy lub jednomodalny). Długość gradientu ( $>3$ ) sugeruje, że do tego typu zbioru danych odpowiednia jest Kanoniczna Analiza Zgodności (CCA).

W analizie dyskryminacyjnej porównano rodziny parametrów i częstotliwość ich badania. Sprawdzone również, które rodziny parametrów BE i BGI są najczęściej badane. W tym celu zastosowano progresywną analizę krokową. Oceniono wszystkie zmienne, a te, które najbardziej przyczyniły się do dyskryminacji grupowej (w oparciu o wartości  $p$  i  $F$  dla każdej analizowanej zmiennej) zostały uwzględnione w modelu. Proces ten powtarzano aż do wzrostu wartości  $p$  powyżej 0,05 dla badanej zmiennej. Test permutacji Monte Carlo został przeprowadzony w celu określenia poziomu istotności (osobno dla każdej zmiennej, a następnie dla całego modelu).

Ostatecznie przeliczono wystąpienia poszczególnych parametrów dla BE i BGI z osobna, wpisując je w tabelach w celu wyszczególnienia parametrów możliwych do zastosowania jako modyfikatorów temperatury w modelu. Pozwolą one na zaprojektowanie architektury modułu obliczeniowego rozkładu przestrzennego intensywności efektu UHI.

Wszystkie testy, obliczenia i elementy graficzne tej części zostały przygotowane w oprogramowaniu Canoco for Windows oraz arkusza kalkulacyjnym Microsoft Excel.

Następujące narzędzia zostały użyte z oprogramowania Canoco dla Windows: Canoco dla Windows 4.5, CanoDraw dla Windows i WCanIMP.

Wszystkie ryciny w tej części pracy zostały wykonane przy użyciu oprogramowania Autodesk AutoCAD 2023.

## **2.4. Konstrukcja wytycznych optymalizacyjnych**

Wytyczne do optymalizacji termicznej miasta powstały na podstawie syntezy danych z przeglądu literatury dla statystycznie istotnych parametrów obiektów BE i BGI przydatnych do budowy modelu UHI. Przeprowadzenie pełnej systematyzacji danych z 20 lat badań dotyczących parametryzacji obiektów znajdujących się w ekosystemie miejskim pozwoliło na sprecyzowanie zaleceń optymalizacyjnych dotyczących pożądanych konfiguracji przestrzennych, morfologicznych i topograficznych obiektów BE i BGI w terenach zurbanizowanych. Opisane zostały możliwości optymalizacyjne zarówno obiektów projektowanych, jak i istniejących.

W zaleceniach uwzględniono ogólne kierunki koniecznych zmian oraz precyzyjne instrukcje optymalizacyjne – co ma na celu ułatwienie opracowania hiperparametrów dla algorytmów optymalizacji metaheurystycznej.

## **2.5. Analiza ograniczeń przestrzeni optymalizacji**

Aby było możliwe przeniesienie wyników optymalizacji środowiska termicznego do realnego ekosystemu, konieczne jest wyznaczenie przestrzeni możliwych ingerencji w mieście. W celu zaprezentowania ograniczeń przestrzennych w lokalizacji obiektów BGI – wymaganych przepisami prawa, na tym etapie wytypowano realny obszar wdrożenia produktu – Polskę.

Za pomocą przeglądarki Internetowego Systemu Aktów Prawnych (Internet 5) przeprowadzono kwerendę aktów prawnych związanych z planowaniem przestrzennym oraz aktów pokrewnych, mogących zawierać hasła: budowla, budynek, zabytek, ulica, droga, torowisko, chodnik, osiedle, zabudowa, dach, ściana, instalacja, zielen, teren zieleni, drzewo, woda, obiekt wodny, zbiornik wodny, oczko wodne, rzeka, ciek wodny, dach zielony, ściana zielona.

Poszczególne zapisy ustaw, na podstawie których można utworzyć wytyczne projektowe dla ograniczeń przestrzennych, przyporządkowano do konkretnych rodzajów obiektów BGI. Następnie dla każdej grupy obiektów BGI utworzono tabele zbiorcze dla przestrzeni ograniczeń, zawierające konkretne wymiary i odległości konieczne do zachowania przy projektowaniu planu mitygacji przez projektowane oprogramowanie.

Tabele zaprezentowane w tym podrozdziale mają na celu: 1) przedstawienie wymiarów, w jakich algorytmy aplikacji muszą się poruszać przy generowaniu obiektów błękitno-zielonej infrastruktury w poszczególnych częściach miasta (do opracowania hiperparametrów) oraz 2) systematyzację możliwych komend programu, obejmujących konieczne do wykonania czynności prawne przez użytkownika końcowego (pozwolenia, zgłoszenia).

## **2.6. Projekt opracowania i wdrożenia systemu informatycznego**

Opis dokumentacji projektowej systemu informatycznego oparto o podstawy metodologii UML, stosowanej w inżynierii oprogramowania. W procesie projektowym zastosowano najlepsze praktyki związane z tworzeniem start-upów bazujących na wiedzy naukowej, projektów naukowych i projektów badawczo-rozwojowych (Eriksson i in., 2003). Metodologie scalono, a ich elementy dopasowano do specyfiki projektu.

Opracowanie systemu informatycznego zakłada zaprojektowanie poszczególnych etapów gotowości technologicznej produktu, obejmujących:

- a) utworzenie macryc wsadowych z danymi parametrycznymi (TRL 3);
- b) opracowanie metody poboru danych przestrzennych przez użytkownika (TRL 4);
- c) opracowanie zmiany danych wejściowych w macrycę danych przestrzennych, zawierającą współrzędne siatki punktów oraz parametry określające istniejący stan przestrzenny (TRL 4);
- d) opracowanie algorytmu umożliwiającego wskazanie lokalizacji interwencji przestrzennej wraz z modyfikacją macrycy danych przestrzennych (TRL 4);
- e) opracowanie algorytmu obliczającego UHI na podstawie macryc danych przestrzennych oraz utworzenie modułu mapowania modelu Komfortu Termicznego Człowieka (w skali PET) (TRL 4);
- f) opracowanie algorytmu porównującego macrycę wejściową danych przestrzennych oraz macrycę zmodyfikowaną (TRL 4);



- g) porównanie algorytmów optymalizujących w celu wyboru algorytmu o najwyższej skuteczności oraz najniższym czasie obliczenia (TRL 5);
- h) implementację algorytmu genetycznego w celu optymalizacji rozwiązań (TRL 5);
- i) przygotowanie metody raportowania rozwiązań (TRL 5);
- j) analizę rozwiązań oraz przeprowadzenie testów prototypu (TRL 6);
- k) wskazanie i opracowanie zmian w prototypie (TRL 6);
- l) aktualizację i wprowadzenie zmian (TRL 7);
- m) implementację elementów opracowanego prototypu w formie programu w języku C# (TRL 7);
- n) wdrożenie przygotowanego programu poprzez usługę chmurową (TRL 8);
- o) opracowanie makiet interfejsu użytkownika (TRL 8);
- p) przygotowanie działającego interfejsu użytkownika wraz z połączeniem poprzez Application Programming Interface (API) z serwerem programu (TRL 8).

Dokumentacja projektowa została podzielona na główne sekcje tematyczne związane z:

- a) opisem koncepcji systemu informatycznego;
- b) planem i metodologią opracowania systemu informatycznego;
- c) potencjałem technologii i strategią marketingową.

W opisie koncepcji zawarto cztery podsekcje opisujące 1) podstawowe informacje o produkcie, 2) architekturę logiczną systemu informatycznego oraz 3) funkcje systemu informatycznego. W podsekcji pierwszej przedstawiono cele projektu, uzasadniono wybór nazwy dla produktu i przedstawiono jego znak towarowy. Na podstawie analizy prac wykonanych w pierwszej i drugiej części opracowania oszacowany został również poziom gotowości technologicznej produktu w klasyfikacji TRL (Mankins, 1995).

W sekcji związanej z opisem planu i metodologii pracy przedstawiono pakiety pracy przewidzianej do wykonania w projekcie, które podzielono na szczegółowe zadania i podzadania projektowe. Wyznaczono również kamienie milowe świadczące o postępach prac projektowych oraz ryzyka, jakie będzie można napotkać w trakcie realizacji. Elementy te przedstawiono na wykresie Ganta z użyciem narzędzi dostępnych na stronie [www.canva.com](http://www.canva.com). Ostatecznie przedstawiono opis produktów, jakie zostaną uzyskane na zakończeniu projektu oraz harmonogram wykonania prac w projekcie – z alokacją poszczególnych zasobów do adekwatnych zadań.

Ostatnia sekcja związana z opisem potencjału rynkowego projektowanej technologii i strategią jej komercjalizacji zawiera 1) analizę rynku, 2) planowane działania w związku z przewidzianym wdrożeniem produktu, 3) ocenę jego wartości rynkowej oraz 4) perspektywy

rozwoju produktu w przyszłości. Na podstawie analizy rynku przeprowadzonej z użyciem ogólnodostępnych danych pozyskanych z Internetu (opracowania analityczne i statystyczne, GUS) w kolejnej sekcji opisano zapotrzebowanie rynkowe na produkt, obejmujące informacje o cechach rynku docelowego, w którym będzie funkcjonował produkt. Opisano również wady i zalety produktów oferowanych przez konkurencję. Ponadto wytypowano potencjalnych odbiorców produktu i scharakteryzowano cechy produktu pożądane z ich punktu widzenia. Ustalono kluczowych partnerów i działania konieczne do przeprowadzenia w celu komercjalizacji produktu oraz opisano szczegółowy proces wdrożenia technologii i niezbędne w tym celu zasoby. Aby ocenić potencjał technologii w aspekcie finansowym przeprowadzono analizy związane z symulowanymi strukturami przychodów z użytkowania technologii i kosztów poniesionych na utrzymanie jej operacyjności w rzeczywistości gospodarczej. Na końcu opisano możliwe ścieżki rozwoju produktu i jego powiązania z innymi projektami autora.

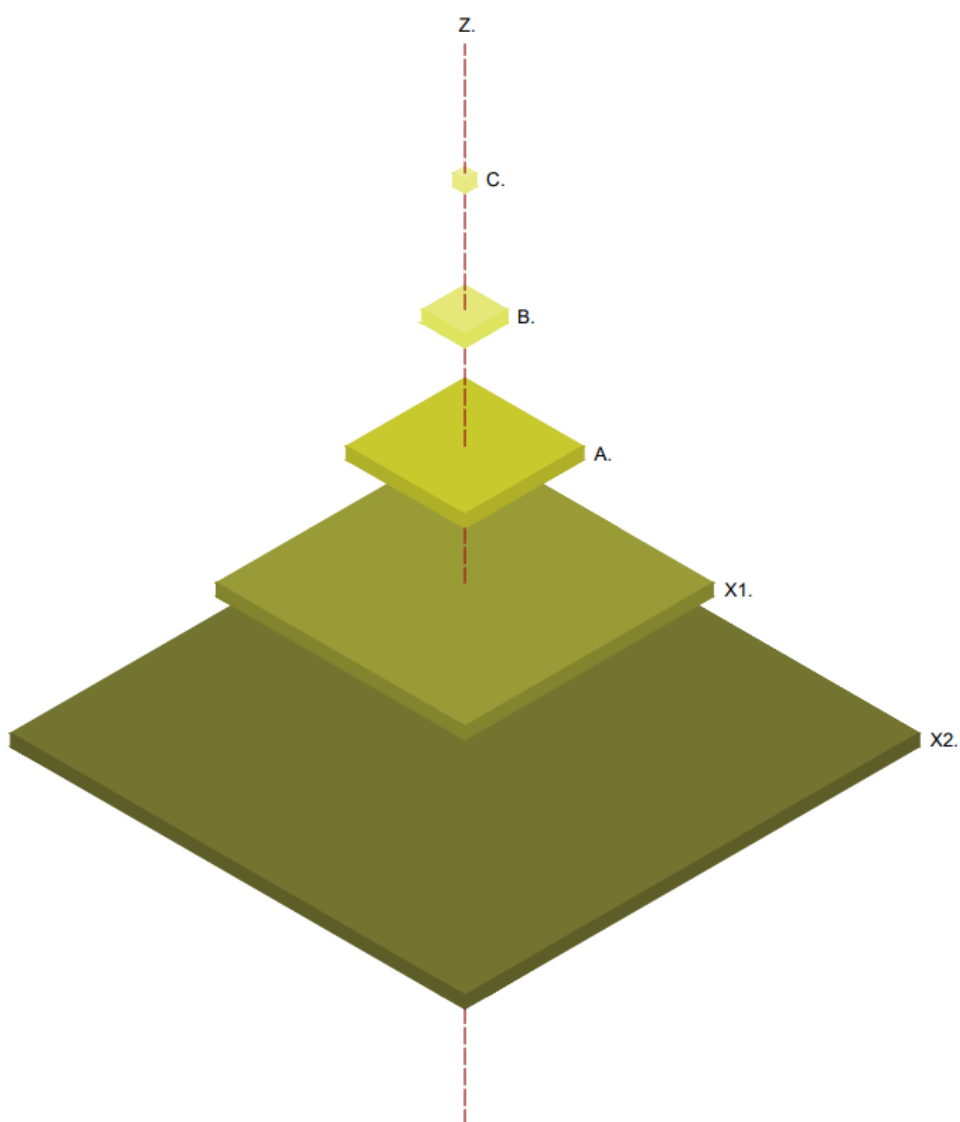
Wszystkie ryciny w tej części pracy zostały wykonane przy użyciu oprogramowania Autodesk AutoCAD 2023.

# **Część I**

Dekodowanie

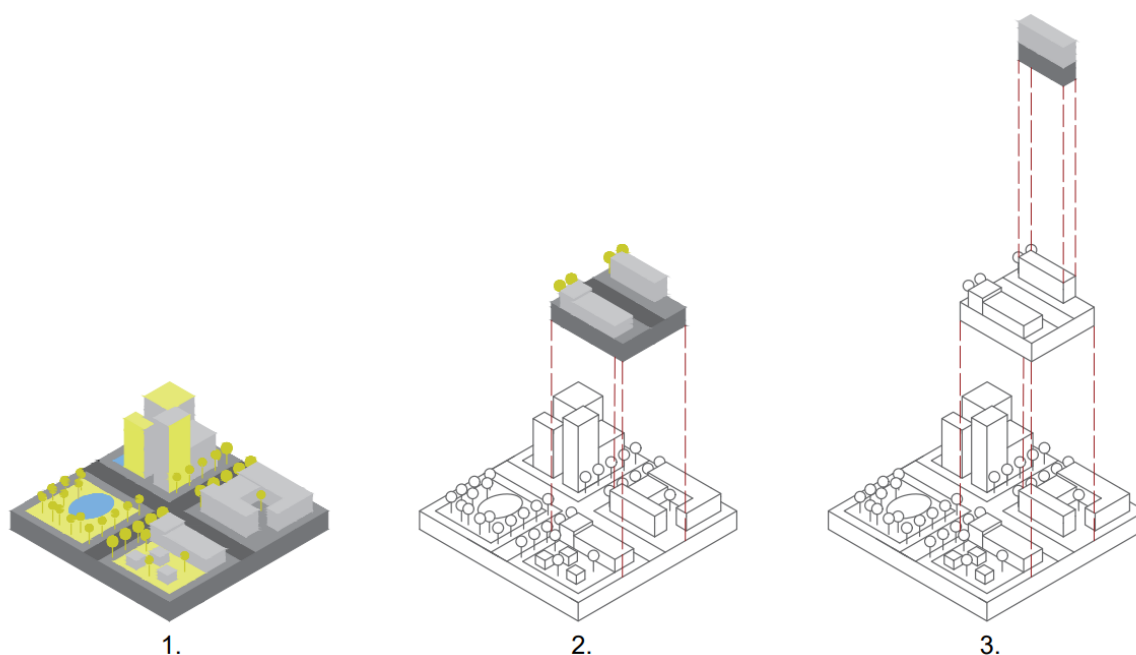
### 3. Parametry elementów ekosystemu miejskiego modyfikujące środowisko termiczne

Zastosowanie krajobrazowo-ekologicznego ujęcia teorii biogeograficznej wysp do opisu ekosystemu miejskiego ułatwia zrozumienie synergii przestrzenno-mikroklimatycznych w mieście (Cartwright, 2019; Turner, 2005). Ekosystem miejski, rozumiany tutaj jako wyspa ekologiczna, osadzony jest w przestrzeni nieurbanizowanej. W samym ekosystemie znajdują się natomiast trzy skale obiektów o specyficznych właściwościach termicznych, wypełniające go w sposób hierarchiczny i komplementarny (ryc. 9).



**Ryc. 9.** Układ logiczny hierarchii osadzenia elementów miejskiego ekosystemu w obszarze nieurbanizowanym na tle siły wpływu obiektów na środowisko termiczne: X2) przestrzeń nieurbanizowana; X1) ekosystem miejski; A) skala jednostki sąsiedzkiej; B) skala kanionu ulicznego; C) skala budynku; Z) właściwości materiałów  
(źródło: opracowanie własne)

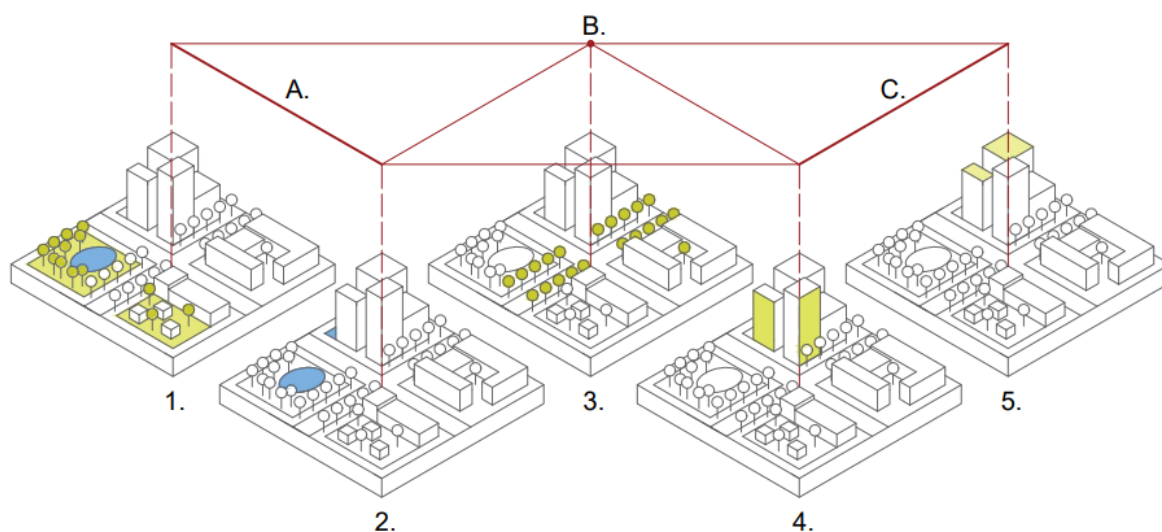
Trzem skalom przestrzenno-krajobrazowym o różnym wpływie na mikroklimat odpowiadają trzy rodzaje jednostek architektoniczno-urbanistycznych (ryc. 10). Budynek, jako elementarny obiekt ulokowany najwyżej w hierarchii, odpowiada logicznie drzewu i w najmniejszym stopniu wpływa na zmiany temperatury w miejskim ekosystemie. Kanion uliczny – związany z drugą skalą – tworzony jest z układów budynków i ulic, na wzór rzeki i drzew w dolinach. Zlokalizowana najniżej w hierarchii, ale jednocześnie zajmująca największą przestrzeń jest jednostka sąsiedzka. Budynki, ulice i inne elementy przestrzenne tworzące jednostkę sąsiedzka warunkują powstawanie złożonych wzorców przestrzennych o najwyższym wpływie na ekosystem miasta (Antoszewski i in., 2022).



**Ryc. 10.** Rodzaje jednostek architektoniczno-urbanistycznych odpowiadające głównym skalom przestrzenno-krajobrazowym w ekosystemie miejskim: 1) jednostka sąsiedzka; 2) kanion uliczny; 3) budynek  
(źródło: opracowanie własne)

Bezpośrednią reprezentacją wysp ekologicznych w niesprzyjającym ekosystemie miejskim są obiekty błękitno-zielonej infrastruktury, czyli błękitno-zielone przestrzenie. Tworzą one nisze ekologiczne o zbliżonym charakterze, bezpośrednio związane z odmiennymi obiektami środowiska zurbanizowanego, znajdujące się w trzech skalach przestrzenno-krajobrazowych. Synergie oddziaływań mikroklimatycznych są specyficzne dla danej skali. Jednak skale, przenikając się wzajemnie, tworzą skomplikowaną sieć skorelowanych powiązań (ryc. 11). Zieleń powierzchniowa wypełniona często drzewami i obiektami wodnymi, jak i same obiekty wodne (duże jeziora i rzeki), ze względu na zajmowany obszar miasta, modyfikują głównie środowisko termiczne w skali jednostki

sąsiedzkiej. Zieleń przyuliczna – z racji swojej lokalizacji – związana jest termicznie z kanionem ulicznym. Dachy i ściany zielone jako obiekty najmniejszej skali będą natomiast warunkowały mikroklimat wewnątrz i wokół budynku.



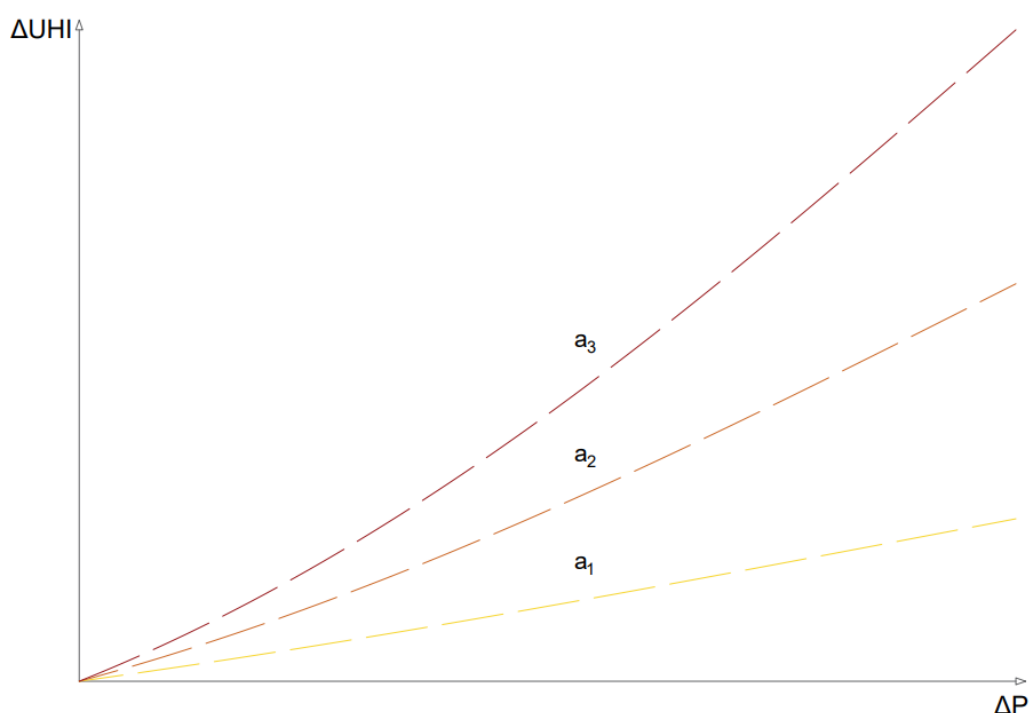
**Ryc. 11.** Rodzaje obiektów błękitno-zielonej infrastruktury na tle głównych skali przestrzenno-krajobrazowych i synergii zachodzących pomiędzy jednostkami architektoniczno-urbanistycznymi w nich osadzonymi: A) skala jednostki sąsiedzkiej; B) skala kanionu ulicznego; C) skala budynku; 1) zieleni powierzchniowa; 2) obiekt wodny; 3) zieleni przyuliczna; 4) ściana zielona; 5) dach zielony (źródło: opracowanie własne)

Każdy z obiektów ekosystemu miejskiego charakteryzuje się pewną kombinacją parametrów uzależniających jego odpowiedź termiczną, która bezpośrednio wpływa na bilans cieplny w danej skali, a pośrednio wpływa również na całe środowisko termiczne ekosystemu miejskiego. Elementy pozaskalowe – reprezentowane z osobna przez właściwości termiczne materiałów oraz parametry geometryczne, morfologiczne i topograficzne ekosystemu miejskiego i przestrzeni niezurbanizowanej – oddziałują wielopłaszczyznowo na obiekty znajdujące się w ekosystemie. Są one modyfikatorami wpływu parametrów obiektów zagnieżdżonych na przestrzenny rozkład intensywności efektu UHI – ze względu na otwarty przepływ energii w systemie.

### 3.1. Ekstra skala przestrzenno-krajobrazowa

Powierzchnia obszaru zurbanizowanego warunkuje jego obraz termiczny. Im większe miasto tym większy stopień zurbanizowania jednostki, a temperatura w jego wnętrzu jest wyższa (J.-M. Huang i in., 2020). Zwiększenie powierzchni o taką samą wartość skutkować

będzie innym wynikiem termalnym dla miasta małego i dużego. Wynika to z wykładniczej natury parametru, na którego zachowanie ma wpływ jego wartość początkowa i zagęszczenie obiektów osadzonych w miejskim ekosystemie. W ten sposób całościowy stopień rozwoju urbanistycznego miasta warunkuje intensywność występującego w nim efektu wyspy ciepła (J. Guo i in., 2020; Y. Li i in., 2020; J. Yang i in., 2020). Modyfikacja stopnia zagęszczenia obiektów architektonicznych w ekosystemie może zaburzać naturę tej zależności sprawiając że małe miejscowości o dużej gęstości zabudowy mogą wykazywać większą intensywność efektu UHI niż rozległe miasta o rozproszonej zabudowie (ryc. 12) (J. Guo i in., 2020; Salvati, Palme, i in., 2017).

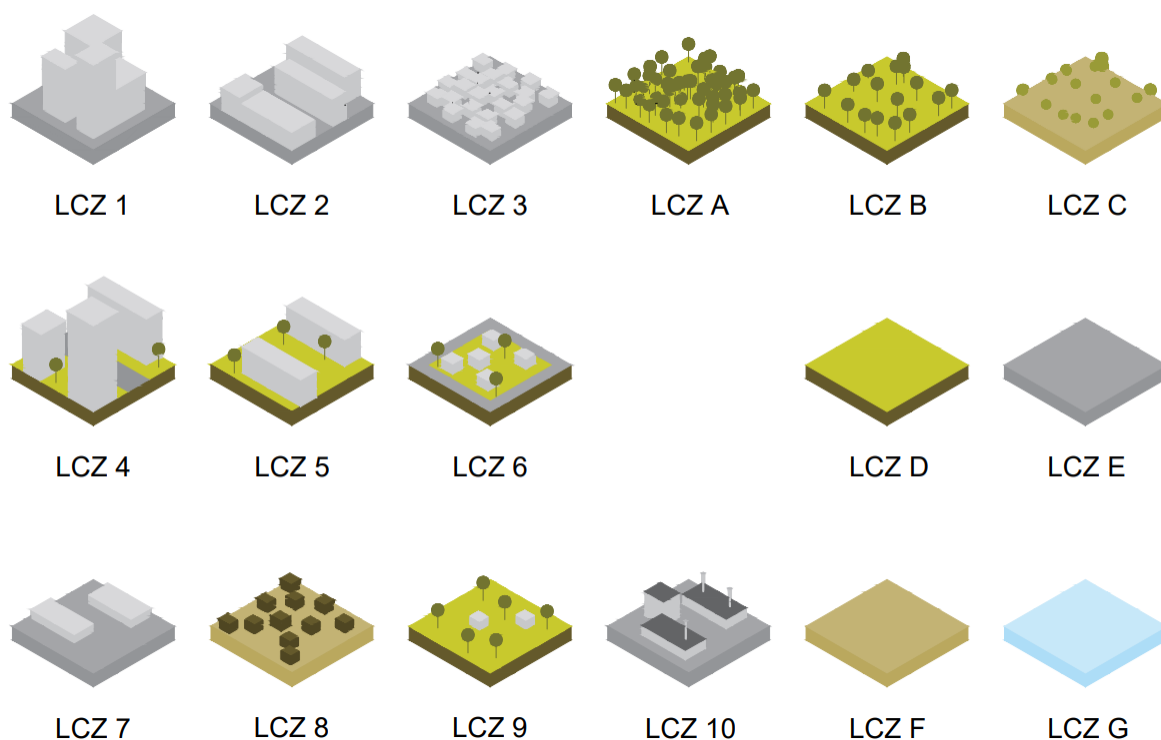


**Ryc. 12.** Reprezentacja logiczna efektu synergii zachodzącego pomiędzy parametrami gęstości zabudowy i powierzchni ekosystemu miejskiego na tle korelacji z intensywnością efektu UHI. Wzrost poziomu zagęszczenia zabudowy ( $a_{1,2,3}$ ) w zależności od przyrostu wielkości powierzchni miasta ( $\Delta P$ ) charakteryzują się różnym wpływem na wzrost intensywności efektu miejskiej wyspy ciepła ( $\Delta UHI$ ). Wartości dla gęstości zabudowy:  $a_1$ ) niski stopień zagęszczenia zabudowy;  $a_2$ ) średni stopień zagęszczenia zabudowy;  $a_3$ ) wysoki stopień zagęszczenia zabudowy (źródło: opracowanie własne)

Stopień scentralizowania obszaru zurbanizowanego to kolejny parametr modyfikujący intensywność efektu UHI w ekstra skali. Wzrost stopnia scentralizowania miasta warunkuje powstawanie większej liczby plam ciepła. Zależność ta wynika bezpośrednio ze zwiększonej powierzchni, gęstości i złożoności zabudowy oraz infrastruktury drogowej ośrodków o układzie centralnym (Mathew i in., 2016; Xu i in., 2019). Jest to układ charakterystyczny dla większości starych i dużych miast europejskich (Noro i in., 2014).

Ze względu na różnice w rodzaju pokrycia terenu i typie zabudowy poszczególne strefy miasta, opisywane jako lokalne strefy klimatyczne (LCZ), oddziałują w odmienny sposób na środowisko termiczne ekosystemu miejskiego (ryc. 13) (Bechtel i in., 2015; Erdem i in., 2021). Siła wpływu tego parametru wynika ze specyfiki poszczególnych obszarów funkcyjnych miasta: wzoru przestrzennego, procentu uszczelnienia powierzchni, całkowitej ilości roślinności i liczby obiektów wodnych oraz intensywności emisji ciepła i zanieczyszczeń. Wzrost temperatury powietrza powodują obszary przemysłowe, komercyjne i mieszkalne (X. Huang & Wang, 2019; J. Li i in., 2011; Nakano i in., 2015; J. Yang i in., 2020; Y. K. Yang i in., 2017). Największym wpływem na wzrost intensywności efektu UHI charakteryzują się strefy przemysłowe. Stanowią one jednak niewielki procent całkowitej powierzchni miasta, stąd ich wpływ na ogólny obraz termiczny miasta jest ograniczony (Erdem i in., 2021; Henits i in., 2017; J. Li i in., 2011). Podobną charakterystyką odznaczają się strefy komercyjne o mniejszej emisji zanieczyszczeń, które – w odróżnieniu od stref przemysłowych – często zlokalizowane są w centrach miast, co zwiększa negatywny wpływ zabudowy mieszkaniowej na ogólną temperaturę takiego ekosystemu (Y. Choi i in., 2018). Zabudowa mieszkaniowa emituje największe ilości ciepła w ciągu dnia, co wynika z konieczności ogrzewania i schładzania pomieszczeń. Strefa ta jednak, podobnie jak obiekty użyteczności publicznej, często charakteryzuje się wysokim udziałem terenów zieleni i niską gęstością zabudowy, które zmniejszają jej wpływ na temperaturę otoczenia (Erdem i in., 2021; Ronchi i in., 2020). Najbardziej korzystną LCZ w kontekście zmniejszania poprawy jakości mikroklimatu miasta są tereny zieleni, nieużytki, pola i łąki oraz obiekty wodne odpowiadające za powstawanie tzw. miejskich wysp chłodu (UCI) (Jia i in., 2020; W. Liu i in., 2017; Pigliautile i in., 2020; Y. Sun i in., 2019).





**Ryc. 13.** Rodzaje lokalnych stref klimatycznych w zależności od typu zabudowy i pokrycia terenu: LCZ 1) zabudowa wysoka i zwarta; LCZ 2) zabudowa zwarta średniej wysokości; LCZ 3) zabudowa niska i zwarta; LCZ 4) zabudowa wysoka i otwarta; LCZ 5) zabudowa otwarta średniej wysokości; LCZ 6) zabudowa niska i otwarta; LCZ 7) zabudowa niska wielkokubaturowa; LCZ 8) zabudowa niska, lekka, o dużym zagęszczeniu; LCZ 9) zabudowa o dużym rozproszeniu; LCZ 10) zabudowa przemysłowa; LCZ A) obszar gęsto pokryty drzewami; LCZ B) obszar rzadko pokryty drzewami; LCZ C) obszar pokryty zaroślami i krzewami; LCZ D) obszar pokryty niską roślinnością; LCZ E) obszar pokryty nawierzchnią utwardzoną bądź skałami; LCZ F) obszar pokryty nagą glebą lub piaskiem; LCZ G) obszar pokryty wodą  
(opracowanie własne na podstawie (Bechtel i in., 2015))

Odległość od poszczególnych stref stanowiących wyspy ciepła lub chłodu w mieście jest jednym z parametrów wpływających na temperaturę obiektów w nim zlokalizowanych (Giridharan i in., 2007). Ujemna korelacja występuje między odległością od cieplejszych obszarów, takich jak centrum miasta (wysoki stopień zurbanizowania), a temperaturą lokalną (Azhdari i in., 2018; Giridharan i in., 2005, 2007; J.-M. Huang i in., 2020; Noro i in., 2014). Odległość od chłodniejszych obszarów jest dodatnio skorelowana ze wzrostem temperatury powietrza w ciągu dnia (Y. Choi i in., 2018; Ha i in., 2016; W. Zhou i in., 2011). W nocy natomiast sytuacja ta się odwraca – wynika to z radiacji obiektów wodnych i pułapkowania ciepła pod koronami drzew (Giridharan i in., 2005; Lau i in., 2019; Shafizadeh-Moghadam i in., 2020). Opisana stabilizacja amplitudy dobowych temperatur w miastach jest – do pewnego stopnia – zjawiskiem korzystnym, obserwowanym w ekosystemach naturalnych.

### 3.2. Materiały budowlane

Porowatość określająca przepuszczalność materiałów wykorzystywanych w ekosystemie miejskim jest istotnym parametrem warunkującym lokalną intensywność ewaporacji. Wpływ tego parametru na powstawanie i czas trwania efektu UHI jest znaczący (Y. Choi i in., 2018; Y. Wang, Zhang, i in., 2020). Największym stopniem przepuszczalności charakteryzują się nawierzchnie naturalne – właściwe dla terenów zieleni (Elnahas, 2003; Erdem Okumus & Terzi, 2021; Hendel i in., 2018). Pozytywny wpływ nawierzchni porowatych zauważalny jest szczególnie w okresie letnim, ponieważ intensywność chłodzenia wyparnego oraz zasięg jego oddziaływania uzależniony jest od temperatury i wilgotności powietrza (Y. Wang, Zhang, i in., 2020).

Transmisja promieniowania cieplnego w głąb materiału związana jest z jego przewodnością cieplną. Poziom transmisji zależy od struktury materiału, jego gęstości oraz wilgotności. Zmniejszenie zakresu tego parametru powoduje spadek ilości pochłoniętego przez materiał ciepła, jednocześnie powodując wzrost temperatury na jego powierzchni (D. Feng & Gong, 2012; Pasetto i in., 2019). Natomiast zwiększenie przewodności cieplnej powoduje przyrost głębokości penetracji cieplnej (Dimoudi i in., 2013; Hendel i in., 2018). Stopień przewodności cieplnej odpowiada za izolację termiczną przegród budowlanych, wpływając na natężenie wymiany energii między wnętrzem a zewnątrz budynku (Georgakis & Santamouris, 2006). Wysoka przewodność cieplna materiałów tworzących przegrodę budowlaną nasila antropogeniczną emisję ciepła, a skala tego efektu jest zależna od sumarycznej powierzchni przegrody (Ali-Toudert, 2021; Ghadban i in., 2020).

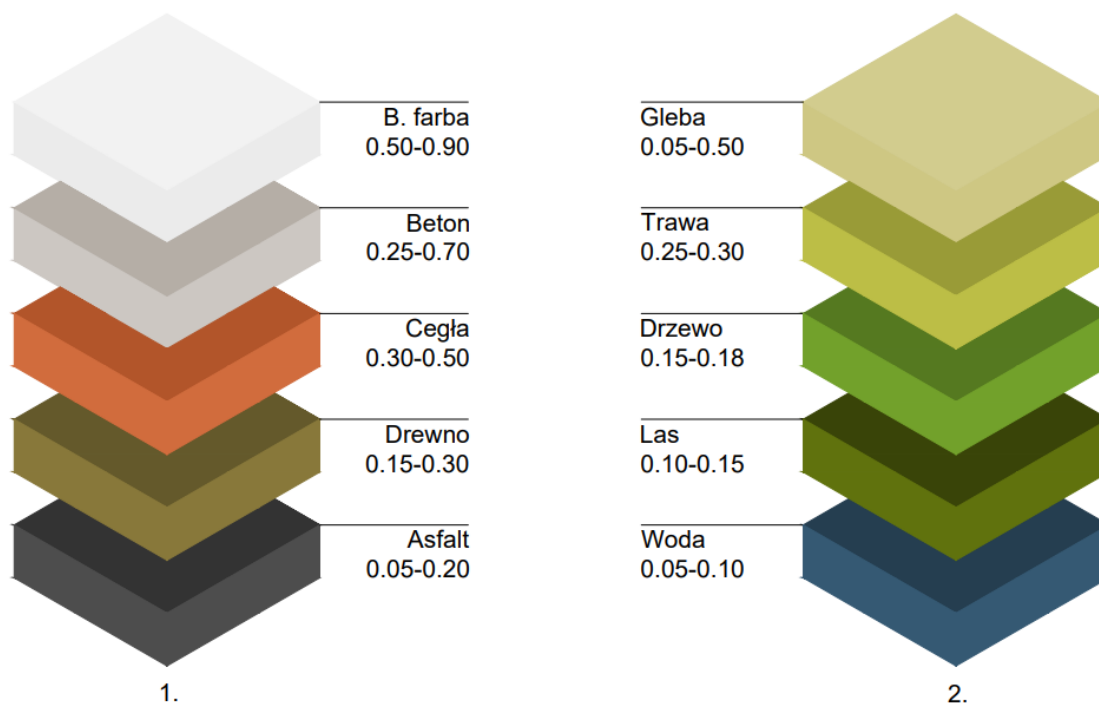
Pojemność cieplna jest parametrem definiowanym jest jako ilość zaabsorbowanego promieniowania cieplnego niezbędnego do zmiany temperatury o jeden stopień. Zależy ona od masy i gęstości materiału, stąd zwiększenie grubości i gęstości lub zmniejszenie porowatości materiału doprowadzi do wzrostu jego pojemności cieplnej (Fikfak i in., 2017; Vargas-Nordbeck & Timm, 2012). Wysoką pojemnością cieplną mogą wyróżniać się zarówno materiały budowlane, jak i powierzchnie biologicznie czynne – np.: cegły, beton, asfalt, nawierzchnie ziemne lub woda. Wysoka pojemność cieplna wywołuje opóźnienie fazy emisji cieplnej, pochłaniając więcej ciepła i oddając je w nocy, czego efektem jest zmniejszenie wahań dobowej amplitudy temperatury powietrza, ale też jej wzrost w nocy (Ali-Toudert, 2021; Dimoudi i in., 2013; Liao i in., 2014; Taleghani, Kleerekoper, i in., 2014). W skali całego ekosystemu miejskiego pojemność termiczna nazywana jest masą termiczną (Y. Wang, Li, i in., 2020). Z uwagi na dużą masę termiczną, dzienny komfort termiczny może być

o wiele wyższy w centrach starych miast niż w nowych jednostkach sąsiedzkich (Elnahas, 2003; Johansson i in., 2001). Masa termiczna w miastach jest zależna – podobnie jak pojemność termiczna – od gęstości, objętości i powierzchni zabudowy. Zmiana wartości parametrów geometrycznych i morfologicznych ścian budynków znajdujących się w kanionie miejskim umożliwia jej modyfikację (Elnahas, 2003; Kantzioura i in., 2012; Yahia & Johansson, 2013).

Emisyjność materiału odpowiada jego zdolnościom do emisji promieniowania długofalowego. Parametr ten ma istotny wpływ na bilans energetyczny w mieście (Bokaie i in., 2016; Georgakis & Santamouris, 2006). Jego wpływ jest zauważany głównie w nocy, kiedy powoduje wzrost temperatury powietrza (D. Feng & Gong, 2012; Giannaros i in., 2018; Hamdi & Schayes, 2008). Istnieje kilka możliwości modyfikacji emisyjności w różnych skalach. Może ona zostać zmniejszona poprzez zastosowanie tzw. zimnych materiałów, farb powłokotwórczych oraz zmianę geometrii osiedla (Battista i in., 2021; Gaffin i in., 2012; J. Yang i in., 2015). Podobnie jak zmniejszenie parametrów transmisji i pojemności cieplnej, spadek emisyjności przegród budynku może zwiększyć jego izolację termiczną przyczyniając się do redukcji emisji ciepła antropogenicznego, spowodowanej utrzymaniem optymalnej dla człowieka temperatury wewnątrz budynku (Gaffin i in., 2012).

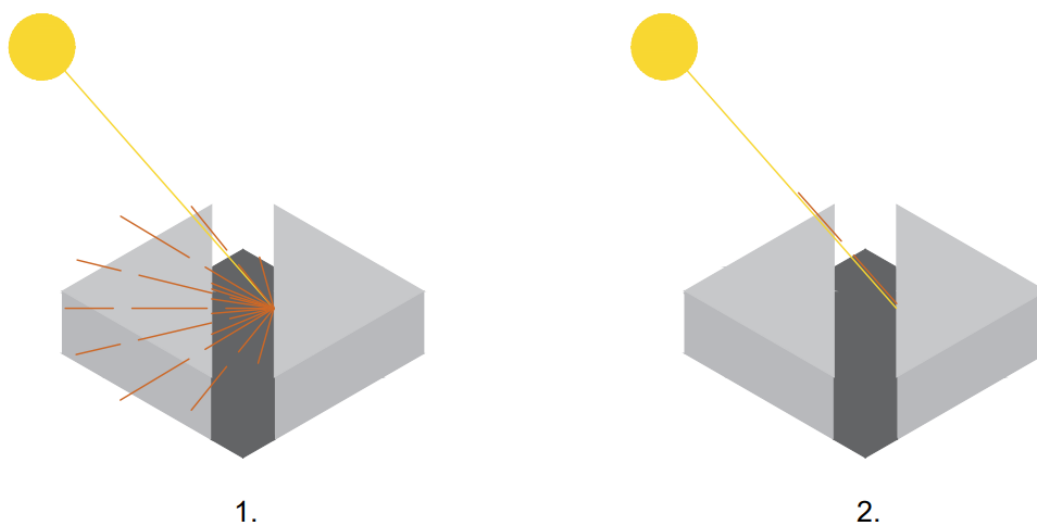
### *Albedo*

Albedo jest parametrem odpowiadającym za skuteczność odbijania promieniowania przechodzącego przez materiały w ekosystemie miejskim (Morini i in., 2016; Salvati i in., 2020). Miasto składa się z mozaiki obszarów o różnym albedo. Różnorodność tych obszarów definiuje temperaturę nawierzchni (LST) i pośrednio fizjologiczną temperaturę ekwiwalentną (PET) odzwierciedlającą komfort termiczny człowieka (Bonafoni i in., 2017; Taleghani, 2018b). Podwyższenie parametru albedo materiału powoduje spadek temperatury przypowierzchniowej, a także skraca czas trwania szczytu termicznego (Gerçek i in., 2016; Tsoka i in., 2017). Przy wzroście globalnego albedo o 0,13 jednostki możliwy jest spadek temperatury powietrza (AT) nawet o 4°C (Georgakis & Santamouris, 2006). Intensywność oddziaływania tego parametru na AT jest jednak uzależniona od ekspozycji słonecznej w danym dniu. W dni pochmurne i w porach nocnych chłodzący efekt materiałów o wysokim albedo diametralnie spada na korzyść reemisji promieniowania długofalowego z materiałów o niskim albedo (ryc. 14) (Y. Choi i in., 2018; Gerçek i in., 2016; Giridharan i in., 2005; Pigliautile i in., 2020).



**Ryc. 14.** Porównanie albedo: 1) materiałów budowlanych; 2) powierzchni biologicznie czynnych (źródło: opracowanie własne, na podstawie (An i in., 2017; Hu i in., 2023; Kotak i in., 2015))

Na poziom globalnego albedo w skali jednostki sąsiedzkiej ma wpływ wiele parametrów, takich jak nieregularność, wysokość i gęstość zabudowy oraz poziom ekspozycji kruszywa w bitumach (Imran i in., 2018; Macintyre & Heaviside, 2019; Morini i in., 2017; Pomerantz, 2000; X. Yang & Li, 2015). Zwielokrotnienie pozytywnego wpływu materiałów o wysokim albedo na intensywność efektu UHI możliwe jest poprzez zmniejszenie stosunku wysokości do szerokości kanionów miejskich ( $H/W$ ) i rozproszenie zabudowy (Andreou, 2013; Sen i in., 2020). Materiały o wysokim albedo w rzadkiej zabudowie obniżają AT, zwiększają komfort termiczny na ulicach i redukują obciążenie chłodnicze budynków (Andreou, 2013; Georgakis & Santamouris, 2006; Pigliatile i in., 2020; Santamouris i in., 2018; Susca, 2012). Wprowadzenie materiałów o wysokim albedo w gęstej zabudowie zwielokrotnia odbicia promieniowania krótkofalowego, doprowadzając do: spadku komfortu termicznego i optycznego, wzrostu średniej temperatury promieniowania ( $T_{mrt}$ ) oraz obciążenia chłodniczego w budynkach (H. Lee & Mayer, 2018; Taleghani, Tenpierik, i in., 2014; Tsoka i in., 2017). Dlatego w powyższym kontekście, w celu zmniejszenia  $T_{mrt}$ , konieczne jest zmniejszenie parametru albedo materiałów lub zastosowanie materiałów odblaskowych (RRM), które pozwalają na uniknięcie efektu zwielokrotnienia fali w kanionie przy zachowaniu wysokiego albedo (ryc. 15)(Georgakis i in., 2014; Morini i in., 2017).



**Ryc. 15.** Porównanie materiałów o różnych właściwościach odbić promieniowania krótkofalowego: 1) odbicie dyfuzyjne właściwe dla materiałów o wysokim albedo; 2) odbicie refleksyjne właściwe dla materiałów odblaskowych  
(źródło: opracowanie własne)

### 3.3. Skala budynku

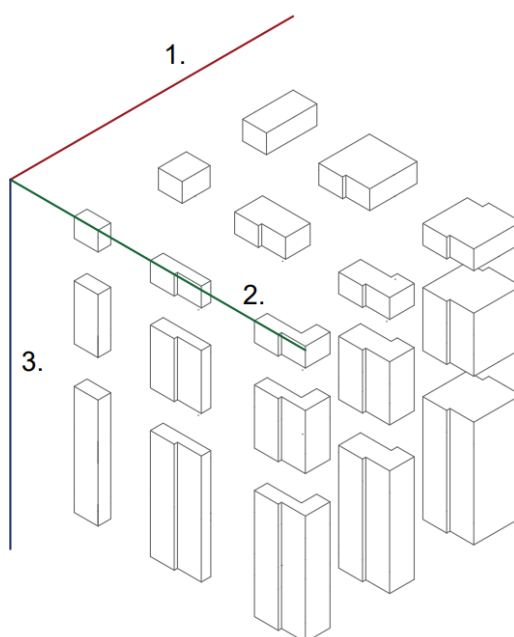
W podrozdziale opisane zostały parametry istotnie oddziałujące na temperaturę zarówno wewnątrz budynku, jak i w jego otoczeniu. Dach i ściana zielona, jako obiekty błękitno-zielonej infrastruktury, stanowią integralną część przegrody zewnętrznej budynku w rozumieniu architektoniczno-budowlanym.

#### *Geometria przegród zewnętrznych*

Grupa parametrów tworzących geometrię przestrzenną budynku to jego wysokość, kształt i powierzchnia, które w największym stopniu modyfikują środowisko termiczne w skali budynku (ryc. 16).

Parametr wysokości budynku, poprzez modyfikację lokalnych wzorców światłocienia i wiatru, stawiany jest na pierwszym miejscu czynników wzrostu temperatury powietrza (AT) w skali budynku (H. Li i in., 2021). Przyrost wartości tego parametru powoduje zwiększenie dobowej amplitudy AT w niedalekiej odległości od obiektu budowlanego, a obiektami o większym negatywnym wpływie na środowisko termiczne są budynki sięgające 10 m wysokości (Alexander, 2021; H. Li i in., 2021). Wpływ wysokości budynku na AT uzależniony jest jednak od gęstości zabudowy, która warunkuje ekspozycję słoneczną jego

fasad (X. Huang & Wang, 2019; J. Yang, Menenti, i in., 2021). Z tego względu w gęstej zabudowie wyżej położone piętra budynku będą charakteryzowały się wyższymi dobowymi amplitudami temperatur elewacji niż te położone poniżej linii cienia (Bennet & Ewenz, 2013).



**Ryc. 16.** Reprezentacja logiczna przestrzeni rozwiązań modyfikacji trzech parametrów geometrycznych dla budynku: 1) powierzchni; 2) złożoności kształtu; 3) wysokości (źródło: opracowanie własne)

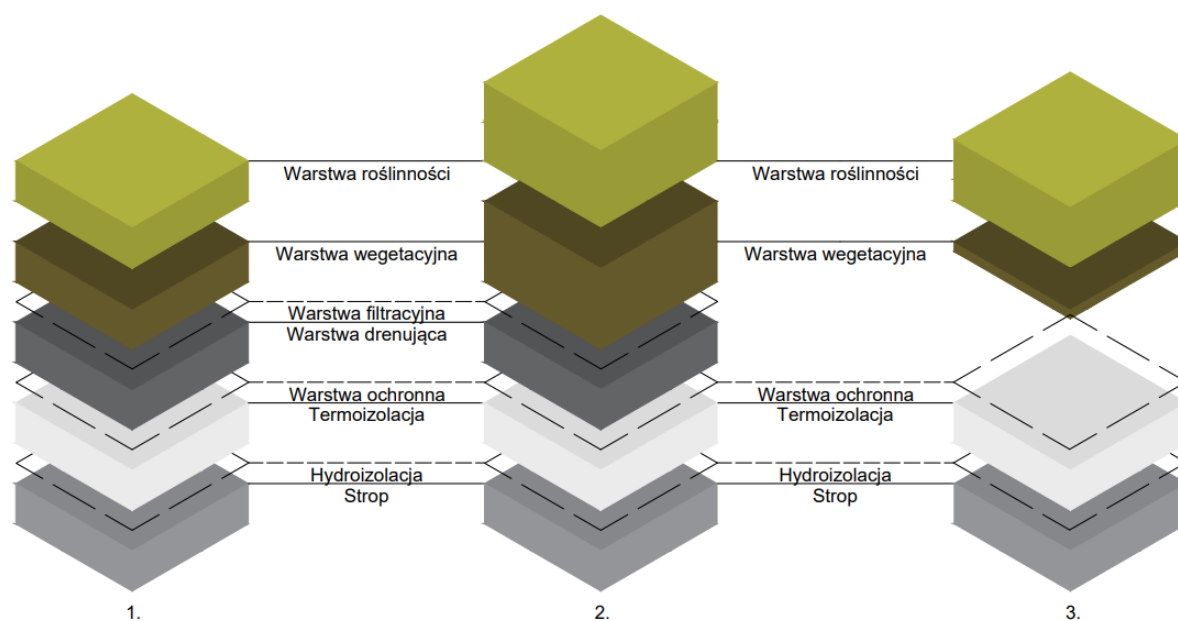
Złożoność kształtu zewnętrznych przegród budynku, podobnie jak ich wysokość, warunkuje poziom ekspozycji fasad na promieniowanie słoneczne (C. Guo i in., 2019; Nakano i in., 2015). Z jednej strony, poprzez zastosowanie wypustów i balkonów, możliwe jest moderowanie ścieżki cienia na fasadzie, skutkujące zmniejszeniem jej ekspozycji słonecznej. Z drugiej strony sam wzrost skomplikowania fasady może zwiększać ekspozycję i prowadzić do negatywnych zmian w rozkładzie AT. W przypadku lokalizacji budynku wśród zieleni, wzrost złożoności fasady może skutkować chłodzeniem jego wnętrza – za sprawą intensyfikacji przepływu energii między budynkiem a roślinnością (Takebayashi & Moriyama, 2012; W. Zhou i in., 2011). Jednak w przestrzeniach pozbawionych roślinności mniejsza złożoność kształtu i zastosowanie form o regularnych planach wpływa na ograniczenie wzrostu temperatury (P. Lin i in., 2021).

Korelacja powierzchni budynku i intensywności efektu UHI jest pozytywna w ciągu doby (X. He i in., 2021; Ronchi i in., 2020; Sugie i in., 2017; Zwoliński & Wochna, 2021). Wzrost powierzchni zabudowy skutkuje bowiem podniesieniem wartości zewnętrznej temperatury przypowierzchniowej (LST) oraz wydłużeniem okresu utrzymywania się podwyższonej temperatury powietrza (AT) (Chun & Guldmann, 2014).

## Zielony dach

Pokrycia dachowe budynków zaliczane są do najbardziej rozgrzanych powierzchni w terenach zurbanizowanych (Chudnovsky i in., 2004). W celu zmniejszenia temperatury przegród dachowych stosuje się praktykę ich zazieleniania. Dachy zielone, oprócz pozytywnego wpływu na izolacyjność budynku, potrafią wywołać spadek AT w najbliższym otoczeniu aż o 10°C (Lehmann, 2014; Oberndorfer i in., 2007; Sailor i in., 2012; L. Zhou i in., 2005). Pokrycie dachowe w technologii zielonego dachu to wielowarstwowy system umożliwiający całoroczną wegetację roślin. Ze względu na rodzaj roślinności, grubość substratu glebowego i technologię ułożenia warstw, dachy zielone dzieli się na ekstensywne, intensywne i bagienne (ryc. 17) (Sailor i in., 2012; Song i in., 2013).

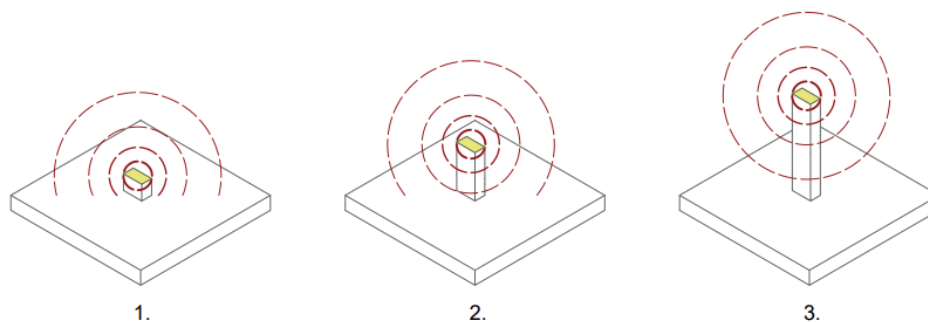
Rodzaj technologii wykorzystanej w pokryciu dachowym ma ogromne znaczenie w kontekście odpowiedzi termicznej budynku – głównie ze względu na znaczące różnice w wysokości warstwy substratu, która odpowiada za jego ogólną wilgotność oraz wielkość możliwych do wprowadzenia na dach roślin (Lundholm i in., 2010; Oberndorfer i in., 2007; Tian i in., 2017). Wzrost parametru grubości warstwy substratu pozytywnie wpływa na zmniejszenie temperatury wnętrza budynku we wszystkich porach roku. Ponadto większa miąższość tej warstwy pozwala na utrzymanie większej wilgotności substratu przez dłuższy czas (Y. He i in., 2017b; Song i in., 2013).



**Ryc. 17.** Rodzaj dachów zielonych w zależności od technologii wykonania warstw: 1) ekstensywny; 2) intensywny; 3) bagienny (źródło: opracowanie własne)

Większy wpływ na modyfikację temperatury otoczenia budynku ma wzrost parametru powierzchni liści, co związane jest z przyrostem obszaru zacienienia dachu i intensywności ewapotranspiracji (D’Orazio i in., 2012; Y. He i in., 2017b; Ouldboukhitine i in., 2011). Rośliny o większej powierzchni liści i pokryte kutnerem – takie jak *Stachys* sp. lub *Salvia* sp. – za sprawą większej siły ewapotranspiracyjnej mają większy wpływ na spadek AT niż rośliny z gatunków *Sedum* sp. i *Vinca* sp. – o liściach małych i pokrytych nalotem woskowym. Zastosowanie roślinności z drugiej grupy jest korzystniejszym rozwiązaniem w klimacie charakteryzującym się wyższymi temperaturami i niską wilgotnością – właśnie ze względu na naturalne ograniczenie intensywności parowania z liści (Azeñas i in., 2018; Blanusa i in., 2013; Ouldboukhitine i in., 2014; Ramyar i in., 2019; Vaz Monteiro i in., 2017).

Rozpatrując siłę wpływu dachu zielonego na zewnętrzny komfort termiczny pieszych (PET), najbardziej istotnym jego parametrem jest wysokość nad poziomem chodnika. Dach zielony zlokalizowany w niskim budynku ochładza przestrzeń pieszą w większym stopniu niż taki, który został umieszczony w budynku wyższym (ryc. 18) (Ng i in., 2012). Ważna jest w tym wypadku również gęstość zabudowy, w której znajduje się budynek pokryty dachem zielonym. Dach zielony zlokalizowany w budynku znajdującym się w gęstej zabudowie może w większym stopniu wpływać na temperaturę na poziomie pieszego, jednak w takim wypadku jego siłę chłodzenia może ograniczyć wysoki stopień zacienienia przez otaczające budynki (Pigliautile i in., 2020).



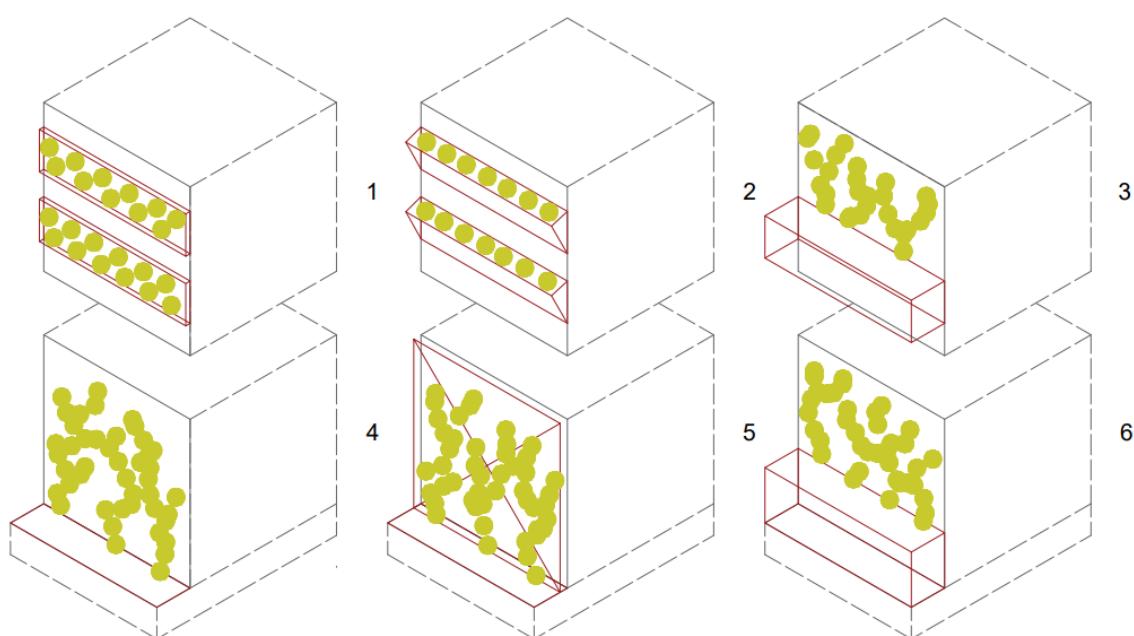
**Ryc. 18.** Zależność wpływu wysokości budynku na zasięg i siłę optymalizacji PET na poziomie pieszego dla budynku: 1) niskiego; 2) średniego; 3) wysokiego (źródło: opracowanie własne)

Przy rozpatrywaniu wpływu dachów zielonych na LST konieczne jest uwzględnienie parametru wielkości powierzchni dachu zielonego. LST jest odwrotnie skorelowane z powierzchnią tego rodzaju dachu (Dong i in., 2020). Zwiększenie sumy powierzchni dachów zielonych o 1000 m<sup>2</sup> w skali ekosystemu i optymalizacja ich lokalizacji umożliwia spadek temperatury miejskiego LST o 0,4°C (Dong i in., 2020; Gill i in., 2007).



## Zielona ściana

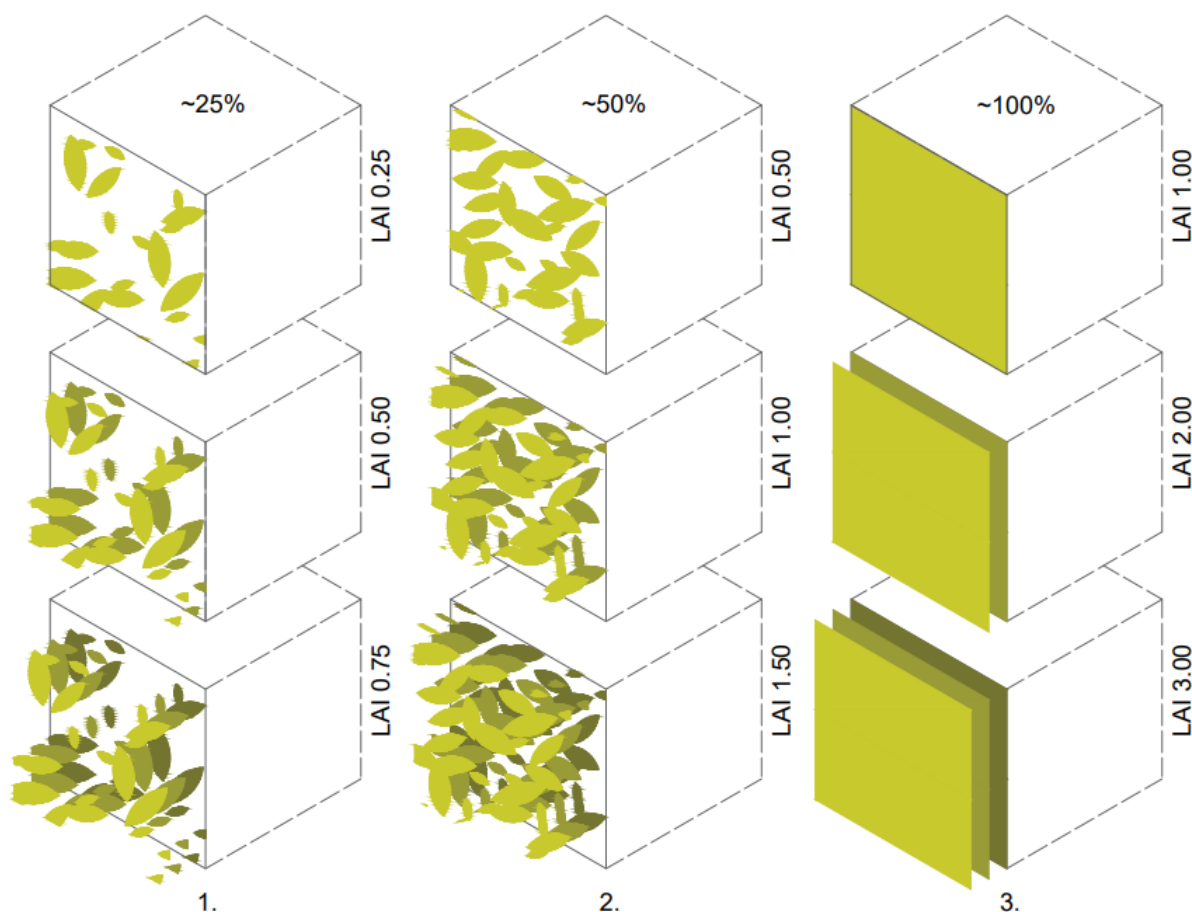
W skali budynku możliwe jest zastosowanie zieleni w postaci żywych ścian i zielonych fasad. Nazwa pierwszego z wymienionych obiektów odnosi się do systemów wegetacyjnych zintegrowanych ze ścianami. Zielone fasady natomiast stanowią rośliny porastające ściany budynku, posadzone bezpośrednio w gruncie lub w pojemnikach (ryc. 19) (Pearlmutter i in., 2021). Systemy zieleni wertykalnej minimalizują antropogeniczną emisję ciepła oraz AT w bezpośrednim sąsiedztwie budynku poprzez zwiększenie izolacyjności przegród zewnętrznych budynku i chłodzenie wyparne (Akbari & Taha, 1992; Hunter i in., 2014; Jamei & Tapper, 2019; Köhler, 2008; Lehmann, 2014).



**Ryc. 19.** Podstawowe rodzaje zieleni wertykalnej: 1) żywa ściana w systemie panelowym; 2) żywa ściana w systemie wielodoniczkowym; 3) zielona fasada sadzona w pojemniku przykręconym do ściany; 4) zielona fasada bezpośrednia sadzona w gruncie; 5) zielona fasada niebezpośrednia sadzona w gruncie; 6) zielona fasada sadzona w pojemniku na poziomie gruntu (źródło: opracowanie własne na podstawie (Pearlmutter i in., 2021))

Procent pokrycia roślinnością wertykalną przegrody zewnętrznej budynku to jeden z bardziej istotnych parametrów wpływających na jego odpowiedź termiczną. Jest on odwrotnie skorelowany z AT (Morakinyo i in., 2019). W odniesieniu procentowym parametr ten można przyrównać do wskaźnika pokrycia liśćmi fasady budynku (LAI), ponieważ LAI w tym wypadku wyznacza powierzchnię całkowitą wszystkich roślin stanowiących ścianę lub fasadę zieloną (Kontoleon & Eumorfopoulou, 2010; Pérez i in., 2017). W związku z powyższym na wartość wskaźnika LAI będzie wpływać zarówno powierzchnia liści, jak i gęstość ulistnienia

w danym układzie roślinnym (Y. He i in., 2017a). Zakres tego parametru może osiągnąć maksymalnie do 5 jednostek (ryc. 20), a zwiększenie LAI do maksimum może wywołać największy spadek temperatury ściany (o 12°C) i znaczne zmniejszenie obciążenia chłodniczego budynku w ujęciu rocznym (o 1,4%) (Cuce, 2017; Dahanayake i in., 2017; Jim, 2015; Koyama i in., 2013).



**Ryc. 20.** Wartość wskaźnika pokrycia liśćmi (LAI) w zależności od procentu pokrycia całkowitej powierzchni ściany lub fasady zielonej i liczby warstw liści (źródło: opracowanie własne)

Jednym z głównych czynników determinujących skuteczność zmniejszania temperatur przez zielen wertykalną jest jej ekspozycja słoneczna. Zależy ona bezpośrednio od parametru opisującego orientację budynku względem stron świata i – pośrednio – od gęstości zabudowy otaczającej budynek (Morakinyo i in., 2019). Na fasadach o najdłuższej ekspozycji w ciągu dnia ewapotranspiracja przebiega najintensywniej. Dlatego na półkuli północnej – uwzględniając niską ogólną gęstość zabudowy – najlepszą lokalizacją zieleni wertykalnej, mającą polepszyć komfort termiczny na zewnątrz, jest fasada południowa. Jednak wraz ze zmianą pory dnia ekspozycja ścian zachodnich i wschodnich będzie się zwiększać i należy to

uwzględnić przy lokalizacji zielonych ścian i fasad (Jim, 2015; L. S. H. Lee & Jim, 2017). Ściana o wystawie najmniej istotniej z punktu widzenia ograniczania temperatury zewnętrznej nabiera znaczenia w przypadku zwiększenia komfortu termicznego wewnątrz budynku. Na tym tle roślinność zlokalizowana na ścianach zachodniej i wschodniej przynosi najwięcej korzyści (Kontoleon & Eumorfopoulou, 2010).

Poziom spadek temperatur we wnętrzu i na zewnątrz budynku może zależeć od rodzaju zastosowanej technologii (Hoelscher i in., 2016; Jamei & Tapper, 2019). Zintegrowane nawadnianie roślin pozwala zapewnić optymalne chłodzenie ewapotranspiracyjne i dobrą kondycję roślin – w porównaniu z systemami pasywnymi (Cheng i in., 2010; Jamei & Tapper, 2019). Natomiast zwiększenie szczeliny powietrznej między ścianą a roślinnością wpływa na wzrost wydajność chłodzenia (Kontoleon & Eumorfopoulou, 2010; L. S. H. Lee & Jim, 2017; Tudiwer & Korjenic, 2017; H. Yin i in., 2017).

### ***Emisja antropogeniczna***

Budynki mogą generować nawet do 40% ciepła antropogenicznego uwalnianego w mieście, co przyczynia się do pogorszenia komfortu termicznego pieszych i formowania się efektu miejskiej wyspy ciepła (X. Huang i in., 2021; J. Yuan i in., 2019). Emisja ciepła antropogenicznego występuje w ciągu całego roku za sprawą regulacji temperatury wewnątrz budynków (Salvati, Palme, i in., 2017). Na poziom jego emisji mają wpływ parametry takie, jak efektywność energetyczna, poziom zaizolowania, rodzaju materiału użytego do budowy oraz ogólna powierzchnia przegród zewnętrznych (Kalman i in., 2013; Oh i in., 2021). Ponadto samo położenie budynku odgrywa pewną rolę w regulacji emisji ciepła antropogenicznego ze względu na lokalny mikroklimat i światłocień warunkowany typem otaczającej zabudowy (Kalman i in., 2013; Kantzioura i in., 2012). Im wyższa i bardziej zwarta zabudowa znajduje się w otoczeniu budynku, tym większa jest jego efektywność energetyczna (Salvati, Coch, i in., 2017).

Korzystanie z urządzeń klimatyzacyjnych (A/C) może podnieść lokalną temperaturę zewnętrzną o 1,7°C za sprawą strumieni ciepła tłoczonych z wewnątrz budynków (Salvati, Palme, i in., 2017). Z używaniem urządzeń A/C związany jest paradoks. Polega on na wzroście zewnętrznej temperatury powietrza spowodowanej przez gorące powietrze pochodzące z budynków, co skutkuje koniecznością zwiększenia mocy chłodzenia wewnątrz. Z jednej strony rozwiązaniem tego problemu jest chłodzenie budynków w sposób pasywny – poprzez manipulacje jego morfologią, geometrią i topografią – w celu ograniczenia transferu

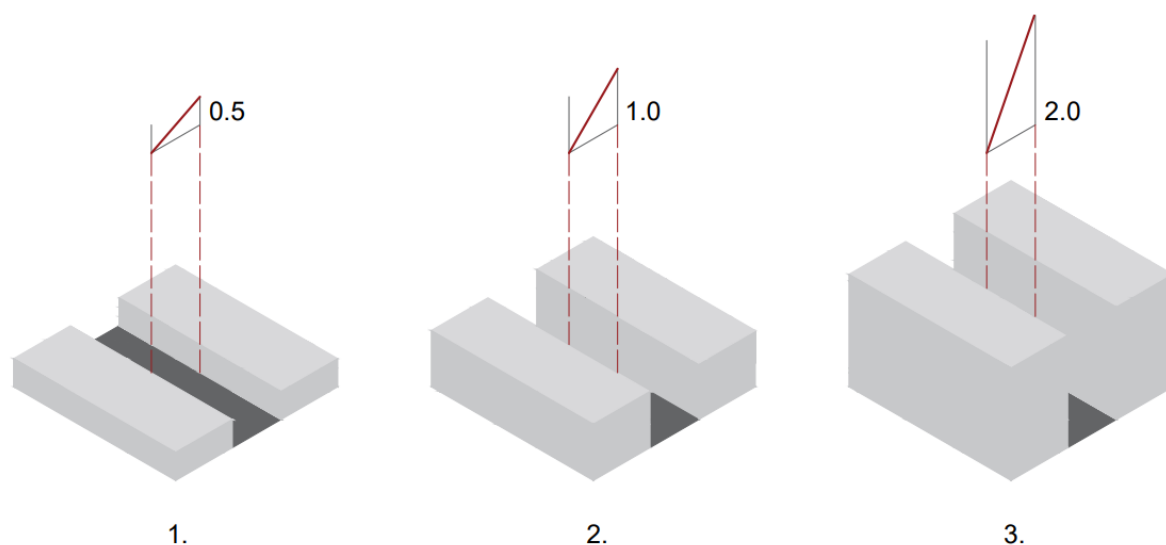
ciepła do środka budynku (Dan i in., 2016; Shashua-Bar i in., 2012). Z drugiej strony rozsądne ustawienie temperatury i przełączenie A/C w tryb energooszczędny może ograniczyć negatywny wpływ tych urządzeń na środowisko termiczne w skali budynku i zmniejszyć czas trwania wysokich temperatur nawet o około 30% (X. Huang i in., 2021; Tremeac i in., 2012).

### **3.4. Skala kanionu ulicznego**

W skali kanionu opisano układy składające się z budynków (ściany kanionu) oraz ulic i placów (dno kanionu). Wyróżnia się dwa rodzaje kanionów miejskich – liniowe (z budynkami o zabudowie pierzejowej) oraz koncentryczne (z budynkami skupionymi wokół centralnego placu). Obiekty znajdujące się w tej skali mogą oddziaływać na mikroklimat lokalny i ponadlokalny. Opisywane w tym podrozdziale zależności są właściwe dla półkuli północnej (Antoszewski i in., 2022).

#### ***Geometria powierzchni***

Stosunek szerokości odstępu między budynkami do ich wysokości ( $H/W$ ) określa głębokość kanionu miejskiego, a tym samym jest jednym z bardziej istotnych parametrów warunkujących poziom ekspozycji słonecznej w kanionie i jego ogólną masę termiczną (ryc. 21). Zmiana proporcji  $H/W$  zawsze wpływa na modyfikację warunków termicznych wewnątrz tego układu (Abreu-Harbach i in., 2014; G. Chen i in., 2020; Erdem Okumus & Terzi, 2021; Herrmann & Matzarakis, 2012; Johansson i in., 2001; Sharifi & Lehmann, 2014). Wzrost wysokości kanionu powoduje pogorszenie warunków termicznych w jego wnętrzu – jednak zmiany te zauważalne są dopiero przy uzyskaniu stosunku  $H/W$  wyższego niż 1,3 (Montávez i in., 2000; Takebayashi & Moriyama, 2012; Tong i in., 2018). Przekroczenie stosunku  $H/W = 5,5$  powoduje zatrzymanie wzrostu temperatury ze względu na ograniczenie ekspozycji dna kanionu na promieniowanie słoneczne (Martinelli & Matzarakis, 2017). W tym wypadku może również nastąpić spadek obciążenia chłodniczego i grzewczego (Muhaisen & Abed, 2014).

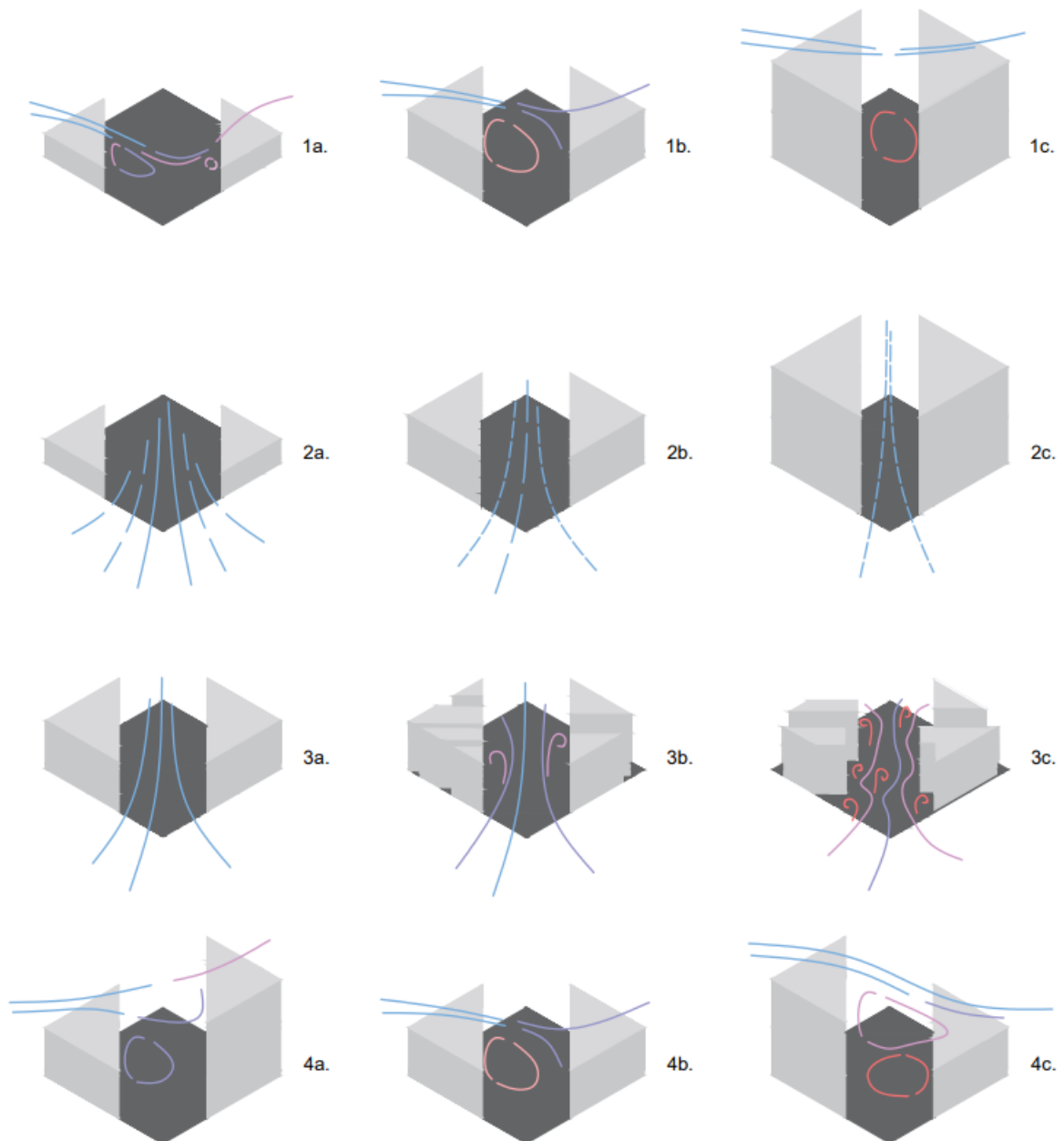


**Ryc. 21.** Współczynnik proporcji dla kanionu miejskiego: 1) kanion płytki/szeroki; 2) kanion proporcjonalny; 3) kanion głęboki/wąski (źródło: opracowanie własne)

Wpływ parametru współczynnika proporcji kanionu jest dynamiczny w ciągu dnia i całego roku (Boccalatte i in., 2020; Chatzidimitriou & Axarli, 2017; Johansson, 2006; Kantzioura i in., 2015; Martinelli & Matzarakis, 2017; Nazarian & Kleissl, 2015). Różnica w dziennych amplitudach temperatur powietrza w kanionach o różnych proporcjach jest widoczna w większym stopniu w okresie letnim (Achour-Younsi & Kharrat, 2016; Boccalatte i in., 2020; Chatzidimitriou & Axarli, 2017; Johansson, 2006; Martinelli & Matzarakis, 2017; Shashua-Bar i in., 2004). Z jednej strony płytkie kaniony miejskie, mające większy odsetek powierzchni wyeksponowanych na promieniowanie słoneczne nagrzewają się szybciej i silniej o poranku niż kaniony głębokie, które najwięcej promieniowania otrzymują dopiero około południa (G. Chen i in., 2021; Nazarian & Kleissl, 2015). Z drugiej strony – charakteryzują się większym poziomem chłodzenia konwekcyjnego i mniejszym stopniem pochłaniania promieniowania długofalowego. Powoduje to szybszy spadek temperatury ich wnętrza w godzinach popołudniowych (G. Chen i in., 2020, 2021; Kantzioura i in., 2015). O tej porze dnia kanion głęboki ma niższą  $T_{mrt}$  niż kanion płytki, co przekłada się na lepszy komfort termiczny w tego typu układach (Andreou, 2013; G. Chen i in., 2020; Equere i in., 2020; Erdem Okumus & Terzi, 2021; Jamei & Rajagopalan, 2019; Thorsson i in., 2011; Unger, 2006; Xi i in., 2021, 2021). Wpływ kanionów o różnej głębokości na mikroklimat, za sprawą efektu pułapkowania termalnego, ulega diametralnej zmianie w późnych godzinach popołudniowych. O tej porze wyższe ściany kanionu działają niekorzystnie, zaburzając bilans promieniowania krótkofalowego, z wielokrotnością odbicia promieni słonecznych i

jednocześnie ograniczając możliwość konwekcyjnego chłodzenia jego wnętrza, co przyczynia się do zwiększenia efektu UHI i pogorszenia komfortu termicznego pieszych (Jamei & Rajagopalan, 2019; Johansson, 2006; Kalman i in., 2013; Loughner i in., 2012; Thorsson i in., 2011). Stąd – mimo większej dobowej amplitudy temperatury powietrza – szersze i płytsze kaniony charakteryzują się niższym wpływem na powstawanie efektu UHI niż kaniony węższe i głębsze (G. Chen i in., 2021; Johansson i in., 2001; Le i in., 2020).

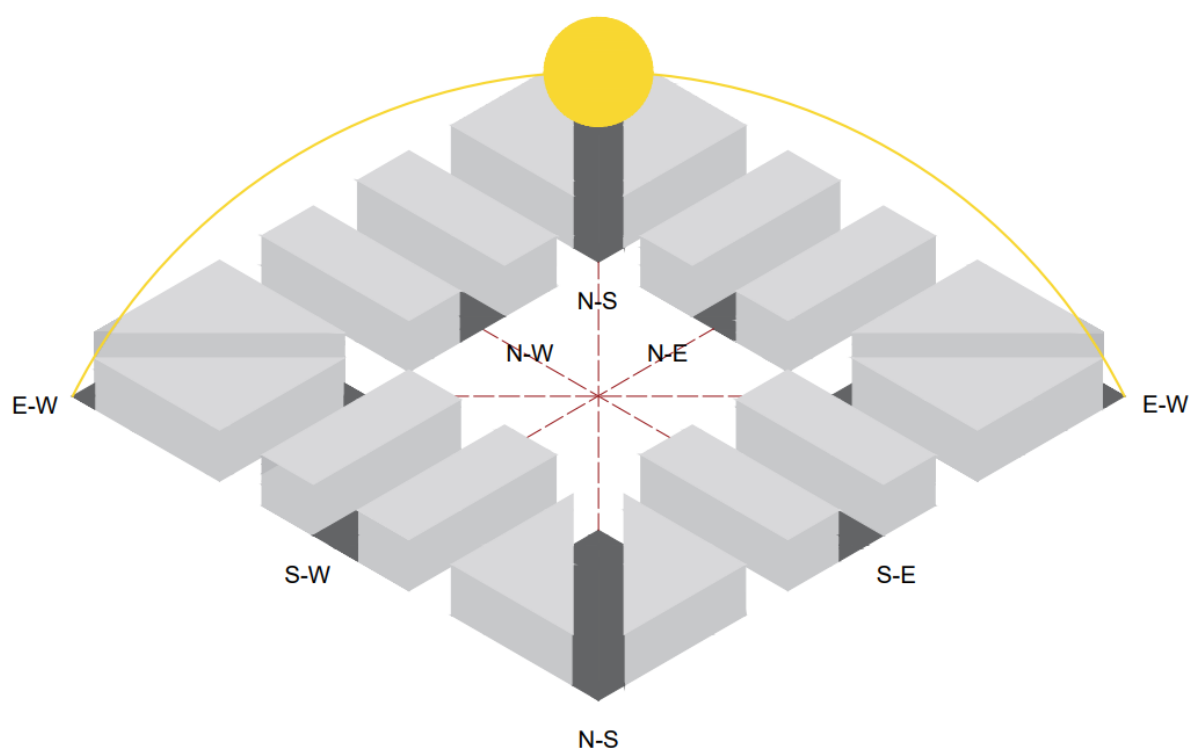
Rozpatrując wpływ współczynnika proporcji kanionu na komfort termiczny człowieka należy uwzględnić jego zdolność do modyfikacji przepływu powietrza w kanionie (Giannopoulou i in., 2010; Muniz-Gaal i in., 2020). W takim wypadku gładkość – określana odległością pomiędzy budynkami wzdłuż ulicy oraz ilością elementów związanych z budynkami (wnęki lub wypusty), a także symetria kanionu pośrednio warunkują jego temperaturę (ryc. 22) (Chatzidimitriou & Yannas, 2016; C. Guo i in., 2019; P. Lin i in., 2021; Shashua-Bar i in., 2004). Szerokie kaniony, w porównaniu do kanionów głębokich, umożliwiają większą penetrację wiatru. Dzięki temu ich powierzchnia chłodzona jest konwekcyjnie intensywniej niż w kanionach wąskich (Chatzidimitriou & Yannas, 2016). W cieplejszych odmianach klimatu umiarkowanego taki stan rzeczy może być mniej korzystny, ze względu na gorące powietrze docierające do kanionów z terenów niezurbanizowanych (Chatzidimitriou & Yannas, 2016). Wzrost wartości stosunku H/W kanionu równoległego do głównych kierunków wiatrów pozwala zwiększyć prędkość przepływu powietrza i komfort termiczny pieszych – nawet w głębokich kanionach (Chatzidimitriou & Yannas, 2016; Jiang i in., 2020; Muniz-Gaal i in., 2020; W. Wang & Ng, 2018). W przypadku wysokiego kanionu, prostopadłego do kierunku dominujących wiatrów, następuje spadek prędkości wiatru i komfortu termicznego pieszych poprzez zawirowania powietrza między budynkami i jego większą wyporność (Kantzioura i in., 2015; W. Wang & Ng, 2018). W tym wypadku zwiększenie asymetrii kanionu pozwala uzyskać lepszą cyrkulację powietrza w jego wnętrzu (L. Chen & Mak, 2021; C. Guo i in., 2019). Przy takim samym natężeniu wiatru tzw. kaniony wstępujące charakteryzują się niższymi temperaturami powietrza niż kaniony zstępujące (Z. Li i in., 2020). Poprzez wzrost długości odstępów pomiędzy budynkami tworzącymi kanion możliwe jest również zmniejszenie gładkości kanionu. Taki układ zmniejsza obszar cienia wentylacyjnego budynku w kanionie zlokalizowanym poprzecznie do kierunku wiatru i zwiększa komfort termiczny pieszych (S. Yang i in., 2020). Ponadto samo zmniejszenie wysokości budynków znajdujących się na krańcu kanionu umożliwia zwiększenie dopływu wiatru do centrum kanionu i uzyskanie spadku temperatury o  $0,2^{\circ}\text{C}$  (Ramyar i in., 2019).



**Ryc. 22.** Wpływ geometrii powierzchni kanionu na wzorce wiatrów: 1a,b,c) wpływ stosunku H/W na głębokość penetracji wiatru; 2a,b,c) wpływ stosunku H/W na prędkość przepływu wiatru; 3a,b,c) wpływ gładkości na rodzaj przepływu wiatru; 4a,b,c) wpływ asymetrii na głębokość penetracji wiatru (a. kanion wstępujący, b. kanion zstępujący)  
 (źródło: opracowanie własne na podstawie (Z. Li i in., 2020; Zajic i in., 2011)).

## ***Orientacja ulicy***

Parametr orientacji ulicy względem „wędrówki” Słońca po niebie warunkuje długość i intensywność okresu nasłonecznienia wewnątrz kanionów miejskich oraz nasilenie wiatrów przez nie przepływających (ryc. 23) (Elnahas, 2003; Fikfak i in., 2017). Ze względu na uzależnienie od natężenia promieniowania słonecznego, wpływ orientacji ulicy na temperaturę w kanionie charakteryzuje wysoka zmienność czasowa (Andreou, 2013; Carrasco & Palme, 2020; Chatzipoulka i in., 2016). Orientacja kanionu warunkuje temperaturę jego powierzchni oraz komfort termiczny pieszych (Xu i in., 2019; Yahia & Johansson, 2013; Y. Zhang i in., 2017).



**Ryc. 23.** Orientacja osi ulicy w stosunku do przebiegu ścieżki słonecznej  
(źródło: opracowanie własne)

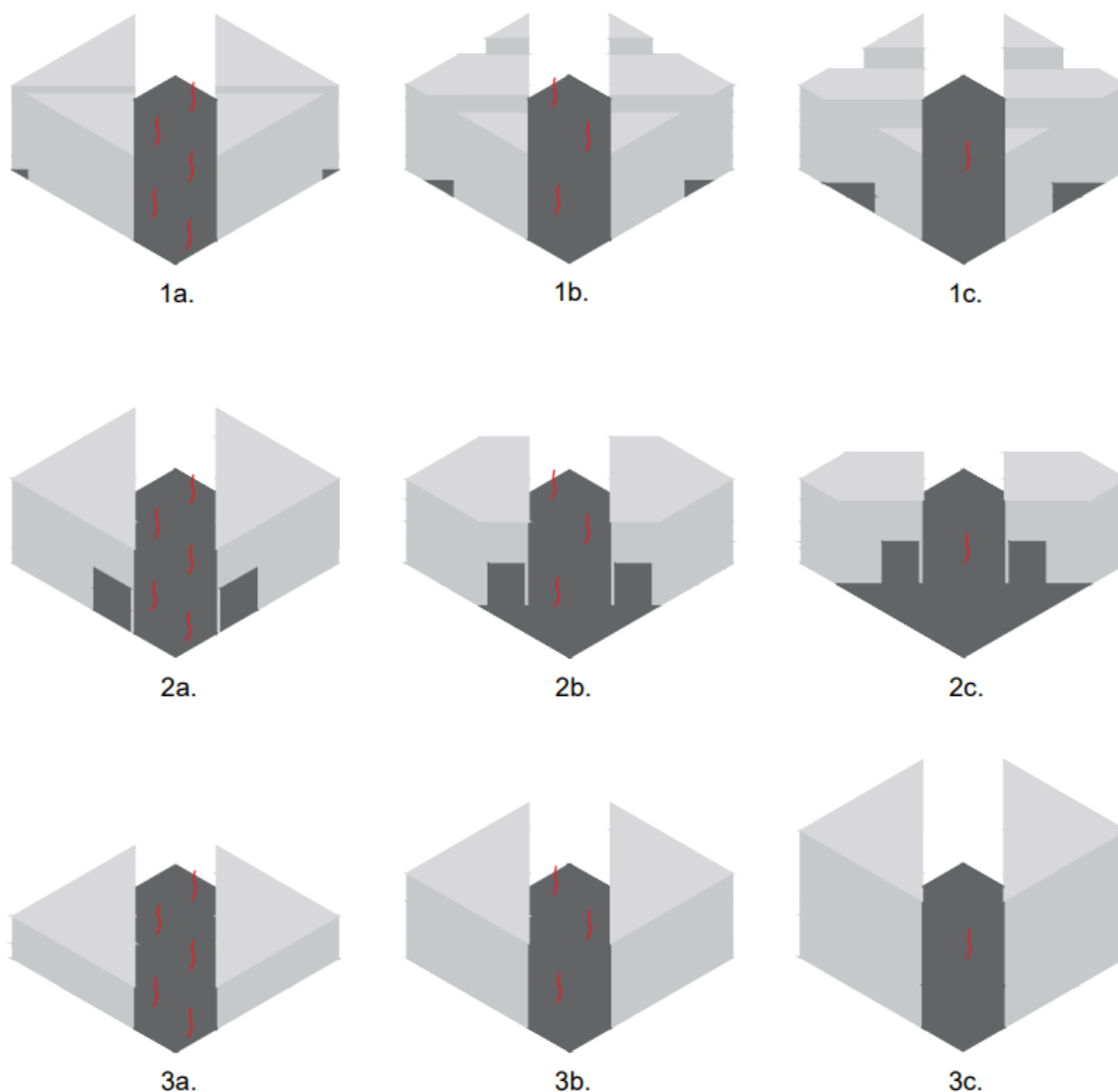
Wpływ orientacji kanionu na temperaturę jego wnętrza wynika z synergii tego parametru z geometrią kanionu. Ze względu na wzrost ekspozycji słonecznej, zmniejszenie H/W powoduje spadek znaczenia parametru orientacji w modyfikacji temperatury powietrza. Z drugiej strony nadmierne zwiększenie H/W może wyeliminować siłę oddziaływania orientacji kanionu na mikroklimat (Jamei & Rajagopalan, 2019). W proporcjonalnym kanionie parametr orientacji odpowiada jednak za odmienną specyfikę termiczną powierzchni o różnych wystawach (Andreou & Axarli, 2012).



Najmniejszym zakresem dobowym natężenia promieniowania słonecznego wyróżnia się kanion zlokalizowany wzdłuż osi północ-południe (N-S) (Taleghani, Tenpierik, i in., 2014).  $T_{mrt}$  może przekraczać próg stresu termicznego dla człowieka w kanionach zorientowanych w kierunku N-S ze względu na wysoki poziom promieniowania w godzinach okołopołudniowych. Stan dyskomfortu może utrzymywać się przez dłuższy czas niż w kanionach zorientowanych na osi wschód-zachód (E-W) (Lau i in., 2015). Obie fasady przeciwległych budynków w kanionach N-S odznaczają się zblizoną roczną sumą zacienienia, jednakże ich dobowy rozkład jest zróżnicowany (Andreou, 2014). Ściany takiego kanionu nagrzewają się intensywniej niż powietrze, co jest zauważalne szczególnie na silnie wyeksponowanych, wyższych kondygnacjach budynków. Podobna sytuacja ma miejsce na poziomie ulicy, co jest spowodowane zwiększonym natężeniem promieniowania odbitego od nawierzchni dna kanionu (G. Chen i in., 2021; Niachou i in., 2008). W ujęciu dobowym to wschodnia fasada kanionu przyjmuje większe obciążenie radiacyjne, stąd też uzyskuje wyższe  $T_{mrt}$  i większą amplitudę zmian temperatury niż ściana zachodnia (G. Chen i in., 2021).

Ściana kanionu o ekspozycji wschodniej otrzymuje promieniowanie do 10<sup>00</sup>. Od tej pory  $T_{mrt}$  tej ściany spada. W godzinach 10<sup>00</sup>-15<sup>00</sup> największą ekspozycję na promieniowanie słoneczne ma dno kanionu. Ściana o ekspozycji zachodniej zaczyna się natomiast rozgrzewać dopiero około 15<sup>00</sup>, a szczyt  $T_{mrt}$  przypada w godzinach 17<sup>00</sup>-20<sup>00</sup>. Po tym czasie następuje spadek temperatur nawierzchni w kanionie, a w porach nocnych ich temperatury się wyrównują (G. Chen i in., 2021; Targhi & Van Dessel, 2015).

Specyficzna modyfikacja geometrii kanionu N-S jest w stanie zwiększyć komfort termiczny w jego obrębie (ryc. 24). Dla przykładu – poszerzenie przestrzeni pomiędzy budynkami zlokalizowanymi wzdłuż drogi może zmniejszać  $T_{mrt}$ , ze względu na zwiększenie obszaru cienia na terenie kanionu. Skrócenie ulic arkadowych, zlokalizowanych na osi N-S, obniża ich temperaturę, ponieważ ograniczony zostaje efekt pułapkowania termicznego w podcieniu (S. Yin i in., 2019; Y. Zhang i in., 2017). Ze względu na spadek sumarycznej ekspozycji słonecznej jego wnętrza, zwiększenie stosunku H/W w kanionie N-S wpływa na zrównanie się dziennych amplitud temperatur na obu jego ścianach i spadek temperatury powietrza w kanionie (G. Chen i in., 2021). Przy średnich i wysokich proporcjach kanionu N-S, znajdujących się w przedziale H/W od 0,8 do 3,0, odnotowuje się najkorzystniejsze warunki termiczne (Achour-Younsi & Kharrat, 2016; S. Yin i in., 2019). W tej konfiguracji ściany w kanionach N-S mniej się nagrzewają niż ściany o wystawie południowej (półkula północna) w kanionach zlokalizowanych na osi E-W (Andreou, 2014).



**Ryc. 24.** Wpływ geometrii kanionu o orientacji N-S na temperaturę w kanionie: 1a,b,c) wpływ długości szczeliny pomiędzy budynkami wzdłuż ulicy; 2a,b,c) wpływ długości ulic podcieniowych; 3a,b,c) wpływ głębokości kanionu  
(źródło: opracowanie własne)

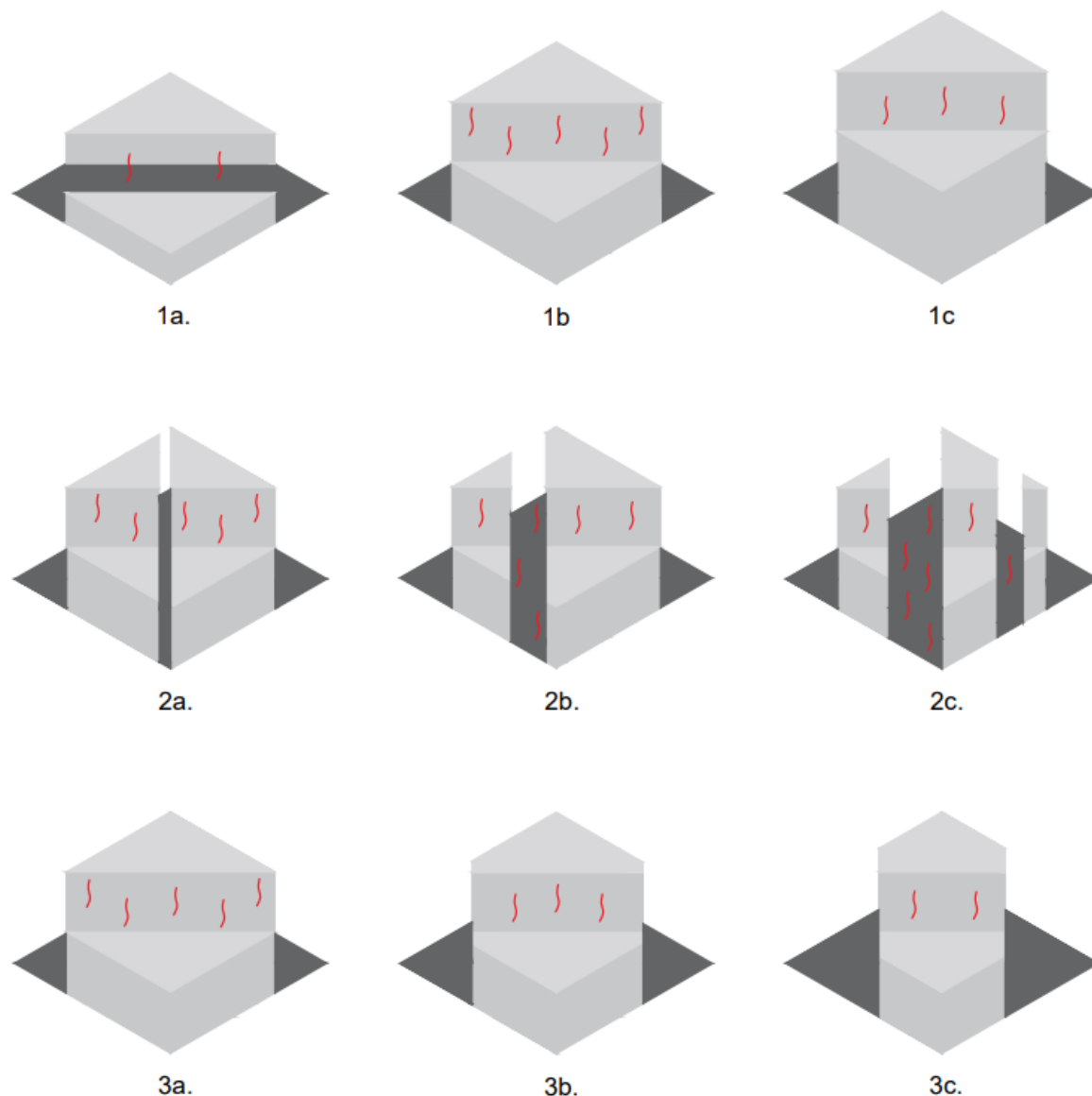
Kaniony E-W charakteryzują się największą ekspozycją słoneczną w ciągu doby, stąd osiągają one najwyższe temperatury spośród wszystkich konfiguracji obrotu (Achour-Younsi & Kharrat, 2016; Jamei & Rajagopalan, 2019). Od wczesnego poranka ściany o ekspozycji południowej (półkula północna) nagrzewają się, uzyskując wysoki  $T_{mrt}$  już około południa. Stan maksymalnego nagrzania trwa najpóźniej do 17<sup>00</sup>, kiedy  $T_{mrt}$  zaczyna stopniowo maleć, podnosząc AT przez emisję promieniowania krótkofalowego. Powoduje to możliwość odczuwania stresu termicznego przez przechodniów nawet do 20<sup>00</sup> (Kantzioura i in., 2012).

Zmiana proporcji kanionu o orientacji E-W nie przynosi znaczących zmian w temperaturze jego wnętrza (Delpak i in., 2021; Jamei & Rajagopalan, 2019). Zmiana proporcji może nieznacznie zmniejszyć potrzebę chłodzenia pomieszczeń w okresie letnim, ale – z

drugiej strony – przyczynić się też do konieczności dogrzewania pomieszczeń zimą (Andreou, 2014; Muhaisen & Abed, 2014). Kaniony o H/W 0,6-3,0 pozostają w tej konfiguracji przestrzennej poza granicami komfortu termicznego, jednak podniesienie H/W >3,0 pozwala na zapewnienie pieszym komfortu w ulicach o orientacji E-W (ryc. 25) (Andreou, 2013; Lau i in., 2015). Ze względu na niską ekspozycję ścian o wystawie południowej kaniony o H/W <0,6 będą odznaczały się najkorzystniejszym rozkładem temperatury. W dalszym ciągu to ściany o wystawie południowej otrzymują najwięcej promieniowania ciepłego – zarówno bezpośredniego, jak i odbitego od dna kanionu. W związku z tym najwyższy  $T_{mrt}$  notuje się na parterze, a różnica pomiędzy obiema ścianami kanionu może wynosić aż 20°C (Lau i in., 2016). Wzrost odległości pomiędzy budynkami wzdłuż ulicy na osi E-W dodatkowo ogrzewa kanion, podobnie jak wzrost długości samych kanionów w tej najmniej korzystnej termicznie konfiguracji topograficznej. Oba rozwiązania sprawiają, że wydłużony zostaje czas penetracji słonecznej w głąb kanionu oraz jej zasięg (Ramyar i in., 2019; Taleghani, Tenpierik, i in., 2014). Ulice w układzie podcieniowym, zyskując na długości, tworzą większy obszar wyspy zimna (S. Yin i in., 2019).

Temperatura ulic diagonalnych znajduje się pomiędzy wcześniej wspomnianymi konfiguracjami obrotu. Za najlepszy układ pod względem komfortu termicznego człowieka uważa się kaniony SE-NW (Andreou, 2014; Y. Zhang i in., 2017). Natężenie ekspozycji słonecznej jest uzależnione od kąta odchylenia od ścieżki słonecznej stąd fasady o ekspozycji SW nagrzewają się silnie od wczesnego poranka ale temperatury tam występujące są niższe niż na fasadach o wystawie NE, które nagrzewają się w godzinach popołudniowych (Georgakis & Santamouris, 2006; Niachou i in., 2008).

Wpływ parametru H/W na czas ekspozycji słonecznej w kanionach diagonalnych zależy od kąta obrotu ulicy względem „wędrówki” Słońca po niebie. Im mniejszy jest kąt odchylenia od niej, tym niższy jest wpływ proporcji kanionu na czas jego ekspozycji słonecznej (Jamei & Rajagopalan, 2019). Utrzymanie wysokiego komfortu termicznego w kanionach o orientacji skośnej jest możliwe przy zapewnieniu H/W na poziomie 1,5-3,0 (Andreou, 2013; Ketterer & Matzarakis, 2014).



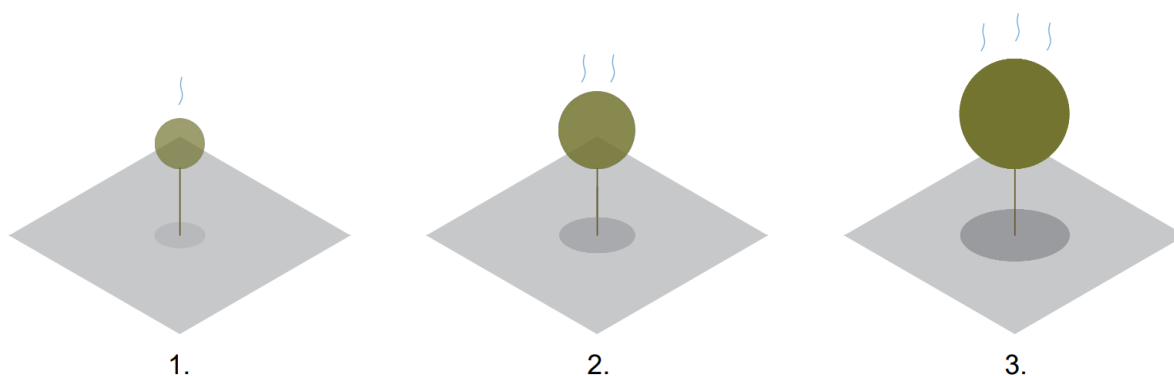
**Ryc. 25.** Wpływ geometrii kanionu o orientacji E-W na temperaturę w kanionie: 1a,b,c) wpływ głębokości kanionu; 2a,b,c) wpływ długości szczelin pomiędzy budynkami wzdłuż ulicy; 3a,b,c) wpływ długości kanionu  
(źródło: opracowanie własne)

### ***Zieleń przyuliczna***

Wprowadzanie drzew do kanionów miejskich jest pożądaną praktyką, skutkującą poprawą jego mikroklimatu (Edmondson i in., 2012; L. Zhou i in., 2005). Umieszczenie w kanionie ulicznym może jednak działać wieloaspektowo na jego środowisko termiczne. Z jednej strony, w ciągu dnia, drzewa znacząco obniżają  $T_{mrt}$  poprzez modyfikację wzorców cienia i chłodzenie ewaporacyjne, poprawiając komfort termiczny pieszych (Lobaccaro i in., 2019; Loughner i in., 2012; Mayer i in., 2008; Spronken-Smith & Oke, 1999). Z drugiej strony może zaburzać bilans promieniowania za sprawą pułapowania termalnego pod

koronami (T. Chen i in., 2021; Johansson i in., 2001). Finalnie drzewa umiejscowione w kanionie modyfikują prędkość wiatrów, zmniejszając poziom wentylacji ulicy (Bourbia i in., 2005; T. Chen i in., 2021; X. He i in., 2021). Wpływ drzew ulicznych na temperaturę przestrzeni kanionu uzależniony jest od wielu czynników geometrycznych, morfologicznych i topograficznych (T. Chen i in., 2021; Jamei & Rajagopalan, 2019; Shashua-Bar i in., 2012; Shashua-Bar & Hoffman, 2002).

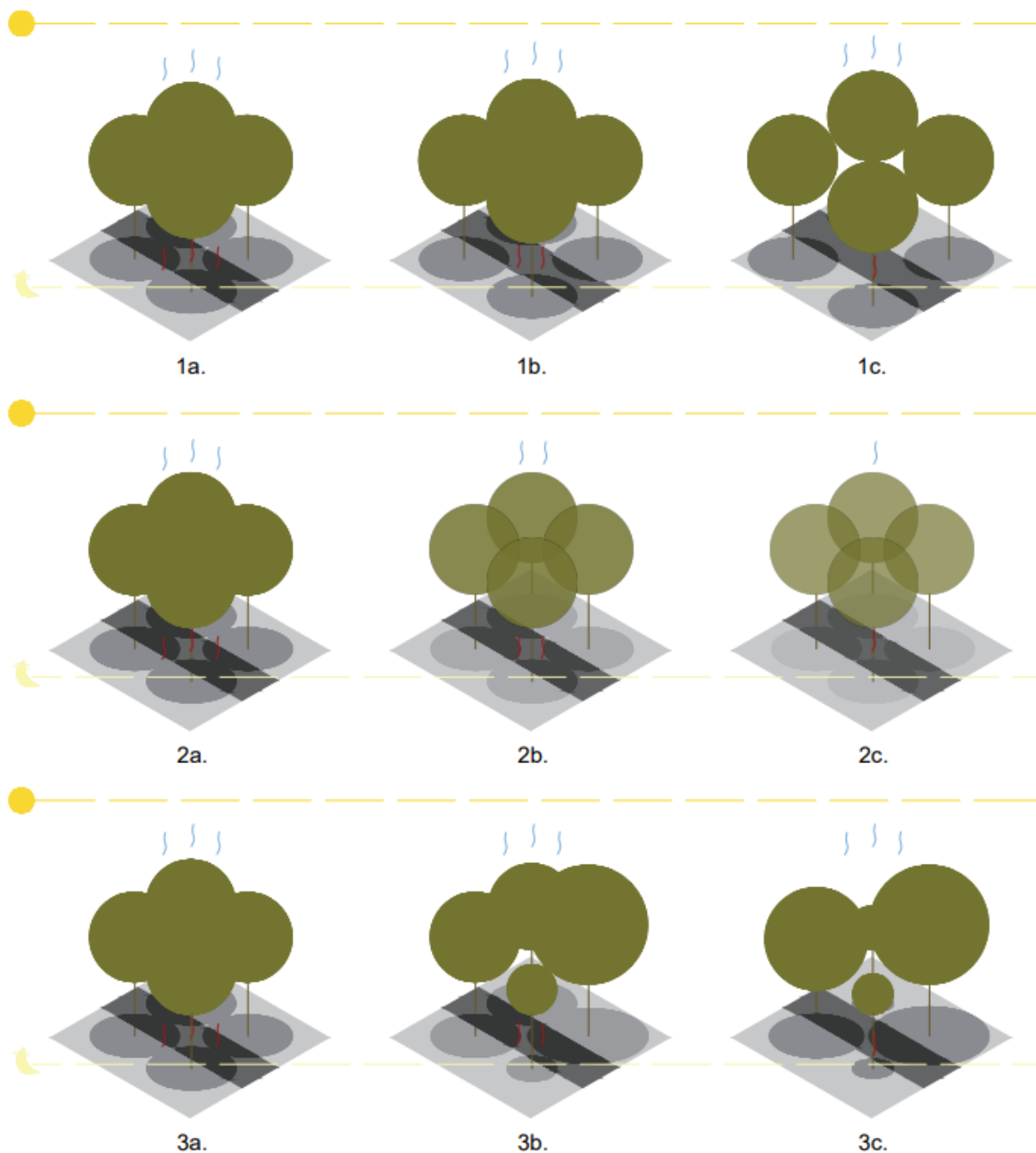
Konstrukcja drzewa, określana jego wysokością oraz szerokością i zagęszczeniem korony, warunkuje ilość przechwyconego promieniowania, rzucanego cienia i komfort termiczny w okolicy drzewa (ryc. 26) (Ketterer & Matzarakis, 2014; Pataki i in., 2011; Shashua-Bar i in., 2010). Zwiększenie wysokości drzew i szerokości ich koron pozwala na zwiększenie obszaru rzucanego cienia, a tym samym na zmniejszenie temperatury powietrza w otoczeniu drzewa (X. Huang i in., 2021; L. Kong i in., 2017). Wielkość liści drzew, modyfikująca gęstość ich korony, ma znaczenie w przypadku ewapotranspiracji oraz pochłaniania i odbijania promieniowania słonecznego (Jamei & Tapper, 2019). Drzewa o dużych liściach mają wyższy potencjał chłodzenia ewapotranspiracyjnego i niższą temperaturę korony, a rzucany cień jest większy niż w przypadku drzew iglastych i drobnolistnych (Gillner i in., 2015; F. Kong i in., 2016; Meier & Scherer, 2012). Aby jednak umożliwić drzewom ochładzanie wyparne, konieczne jest zapewnienie im optymalnych warunków wodnych. W przeciwnym razie konieczne jest zastosowanie drzew o mniejszych liściach lub gatunków iglastych o mniejszym potencjale schładzania kanionu, ale odpornych na niekorzystne warunki wodno-glebowe (Dixon & Mote, 2003; L. Kong i in., 2017; Leuzinger i in., 2010; B.-S. Lin & Lin, 2010; Pataki i in., 2011; Shashua-Bar i in., 2009, 2010).



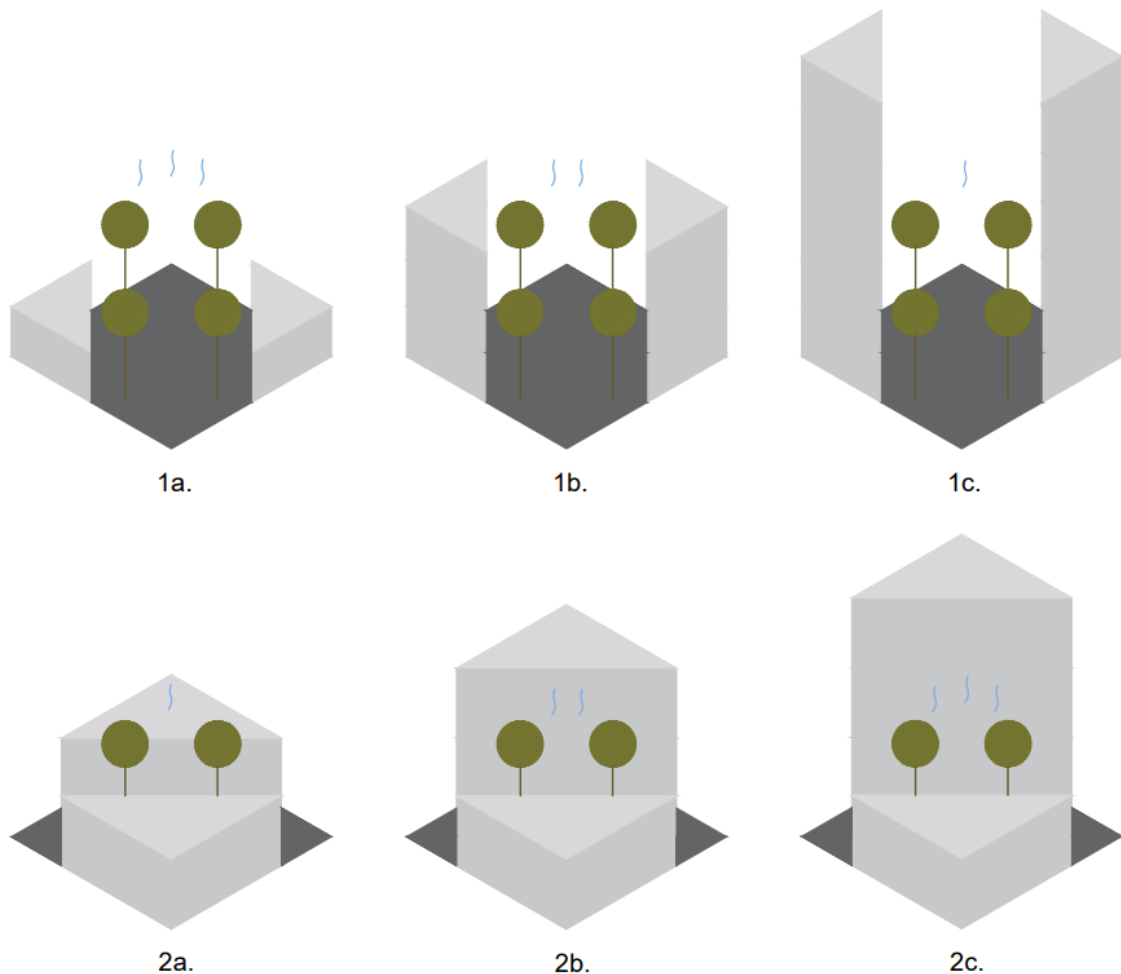
**Ryc. 26.** Wpływ konstrukcji drzewa na natężenie ewapotranspiracji i ilość rzucanego cienia: 1) niskie drzewo o wąskiej i rzadkiej koronie; 2) drzewo o uśrednionych parametrach; 3) wysokie drzewo o szerokiej i gęstej koronie  
(źródło: opracowanie własne)

Wzór rozmieszczenia przestrzennego drzew w kanionie wpływa na modyfikację jego temperatury. Specyficzny rozkład drzew może powodować zarówno ochłodzenie przestrzeni, jak i sprzyjać jej przegrzewaniu (ryc. 27) (Coutts i in., 2016; Duarte i in., 2015). Zmniejszenie odstępów pomiędzy drzewami o gęstej koronie wpływa na zmianę UCI na UHI w porze nocnej, kiedy promieniowanie długofalowe nie może opuścić kanionu przez gęste pokrycie koronami drzew. W tym przypadku – im bardziej zwarta struktura koron drzew, tym bardziej intensywny efekt pułapkowania termicznego pod nimi (Spronken-Smith & Oke, 1999). Im gęstsza korona mają drzewa, tym większa powinna być odległość pomiędzy nimi w układzie ulicznym. Zmniejszenie gęstości korony drzew pozwala na uwolnienie promieniowania długofalowego w okresie nocnym – przy zachowaniu tego samego rozstawu sadzenia. Możliwa też jest modyfikacja struktury pionowej drzew w kanionie poprzez lokalizację obok siebie drzew o różnej konstrukcji korony. Ze względu na intensywne cieniowanie, zachowanie bilansu promieniowania oraz możliwość wentylacji poziomej pieszych, rozwiązania bazujące na zapobieganiu łączenia się koron drzew o tej samej gęstości poprawiają mikroklimat kanionu (Coutts i in., 2016; Dimoudi & Nikolopoulou, 2003; Morakinyo i in., 2020; Pauleit, 2003).

Parametry topograficzne, takie jak geometria oraz kąt obrotu kanionu względem „wędrówki” Słońca po niebie i głównych kierunków wiatrów, znacząco wpływają na efektywność schładzania otoczenia przez drzewa (ryc. 28) (T. Chen i in., 2021; Coutts i in., 2016; Tan i in., 2016). Drzewa posadzone po obu stronach ulicy w kanionach N-S mają większy wpływ na zmniejszanie temperatury niż drzewa o tym samym układzie w kanionach E-W (Achour-Younsi & Kharrat, 2016; Andreou, 2014). Drzewa zlokalizowane w okolicy fasad o wystawie południowej i zachodniej z największą skutecznością obniżają temperaturę. Zwiększenie wysokości ściany budynku, przy założeniu optymalnej wilgotności gleby, skutkuje jej wzrostem skuteczności chłodzenia (Park i in., 2012; S. Yang i in., 2020). Modyfikacje ekspozycji drzew na słońce i wiatr powodują zmiany parametru H/W kanionów, wpływając na różną efektywność chłodzenia przestrzeni. Efektywność identycznych układów drzew spada wraz ze wzrostem proporcji kanionów, co można tłumaczyć wzrostem objętości powietrza, które musi być schłodzone (Shashua-Bar & Hoffman, 2002; Y. Zhang i in., 2017).



**Ryc. 27.** Wpływ parametrów związanych z zagęszczeniem drzew w kanionie na natężenie ewapotranspiracji, ilość rzucanego cienia oraz efekt pułpki termalnego: 1a,b,c) wpływ gęstości poziomej; 2a,b,c) wpływ gęstości wewnętrznej; 3a,b,c) wpływ gęstości pionowej (źródło: opracowanie własne)



**Ryc. 28.** Wpływ parametrów lokalizacyjnych drzew w kanionie na intensywność chłodzenia wyparnego: 1a,b,c) wpływ stosunku H/W; 2a,b,c) wpływ wielkości asymetrii dla ścian obciążonych radiacyjnie  
(źródło: opracowanie własne)

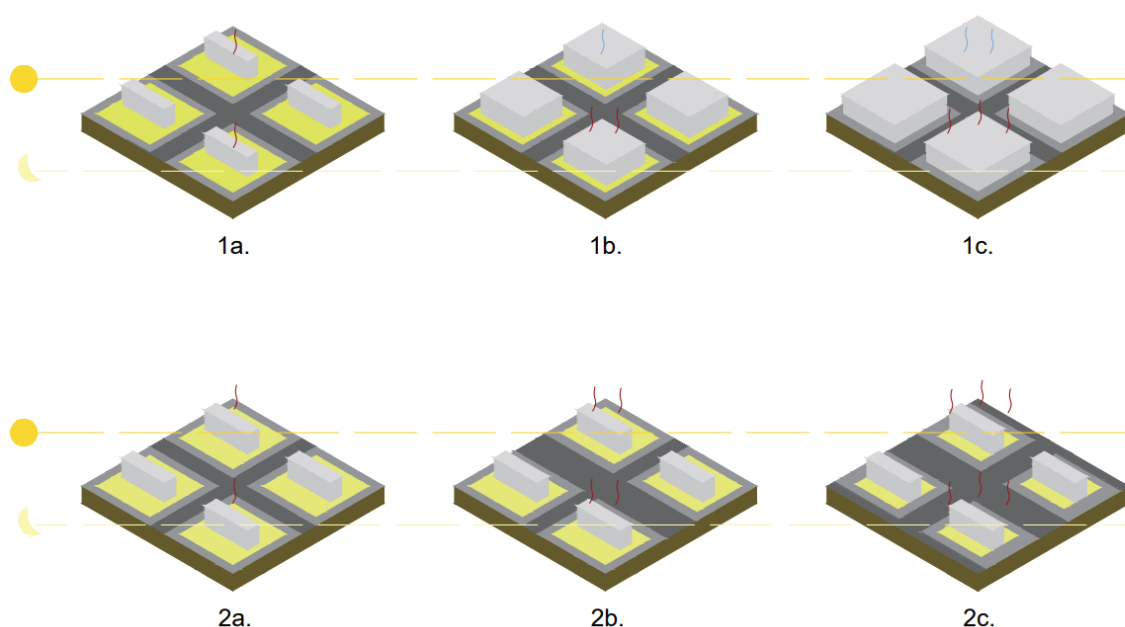
### 3.5. Skala jednostki sąsiedzkiej

Stopień złożoności relacji występujących w mieście wzrasta z jego skalą, tworząc głębokie synergie pomiędzy obiektami osadzonymi w danej skali. Jednostki miejskie to układy zbudowane z czterech głównych składowych: budynków, ulic, terenów zieleni i obiektów wodnych. Termika jednostki urbanistycznej uzależniona jest od wzajemnych relacji między biotycznymi i abiotycznymi składnikami środowiska. Dlatego, w skali jednostki sąsiedzkiej, możliwe jest dostrzeżenie antagonistycznych i nieantagonistycznych oddziaływań właściwych dla elementów tej skali (Antoszewski i in., 2022).



## Powierzchnia zabudowy

Parametr powierzchni obiektów budowlanych, takich jak budynki i drogi, w skali jednostki sąsiedzkiej decyduje o intensywności jej zabudowy. Podstawową zależnością wynikającą ze zwiększenia powierzchni zabudowanej jest ograniczenie powierzchni terenów zieleni – a tym samym stopnia przepuszczalności terenu dla wody (ryc. 29) (Dobrowolny & Krahula, 2015; K. Liu i in., 2014). Wzrost powierzchni obiektów budowlanych w jednostce sąsiedzkiej jest silnie skorelowany ze wzrostem intensywności efektu UHI ze względu na zmiany w pokryciu terenu (K. Liu i in., 2014; Lu, Li, Yu, i in., 2012; Shimazaki i in., 2021; Smith i in., 2011; Weng i in., 2008; X. Zhang i in., 2017; H. Zhao i in., 2018).



**Ryc. 29.** Ustawienie różnych wartości parametru powierzchni zabudowy: 1a,b,c) budynkami; 2a,b,c) nawierzchniami utwardzonymi  
(źródło: opracowanie własne)

Poziom pokrycia terenu jednostki sąsiedzkiej budynkami modyfikuje jej ekspozycję słoneczną oraz rozkład wiatrów i temperatury na poziomie pieszych (Berger i in., 2017; Erdem Okumus & Terzi, 2021; Xu i in., 2019). Podnosząc wartość tego parametru, mikroklimat osiedla ulega pogorszeniu (F. Sun i in., 2020; Unger, 2006; C. Yuan & Ng, 2012). Wpływ powierzchni pokrycia budynkami na temperaturę jest istotny przez całą dobę, ale wykazuje pewną zmienność czasową (Liao i in., 2014; W. Liu i in., 2017; F. Sun i in., 2020). W porze dziennej zwiększenie liczby budynków na terenie osiedla może wpływać na niższe  $T_{mrt}$  na poziomie pieszego – co wynika bezpośrednio z ograniczenia ekspozycji słonecznej ulic (Wei i in., 2016). Z drugiej strony – w porze nocnej zależność ta powoduje ogrzewanie przestrzeni

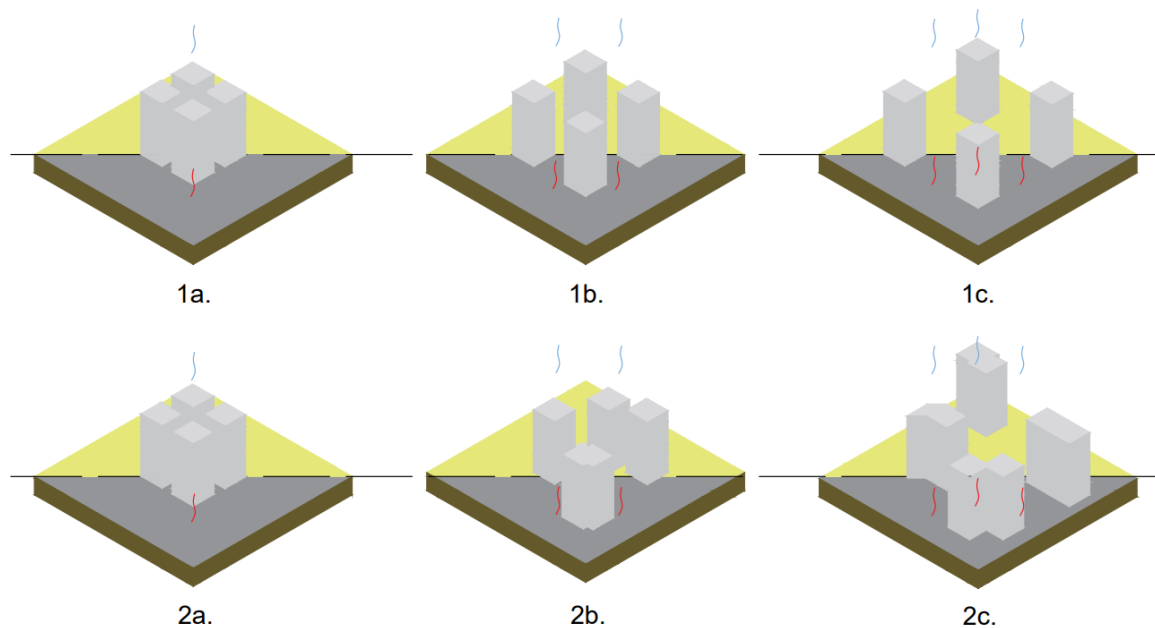
osiedla za sprawą reemisji promieniowania uwięzionego w jego masie termicznej (Y. Li i in., 2021; Lu, Li, Yu, i in., 2012; C.-Y. Sun, 2011; Wei i in., 2016). Czas przejścia UCI w UHI i nocna intensywność efektu wyspy ciepła wynika z poziomego nagrzania przestrzeni osiedla w ciągu dnia. W związku z tym dni cieplejsze będą wpływać na późniejszą – ale bardziej intensywną, nocną – emisję promieniowania długofalowego (Y. Li i in., 2021).

Silną korelacją odznacza się stopień pokrycia szarą infrastrukturą ze wzrostem temperatury osiedla. (Cheung & Jim, 2019; Gerçek i in., 2016; Xu i in., 2019). Zwiększenie liczby dróg odpowiada za wzrost temperatury w ciągu dnia za sprawą wzrostu ekspozycji słonecznej, ciepła antropogenicznego generowanego przez pojazdy oraz obniżenia ogólnego albedo jednostki sąsiedzkiej (Gerçek i in., 2016; Ha i in., 2016; J.-M. Huang i in., 2020; Liao i in., 2014). Zwiększenie masy termicznej osiedla wywołane wzrostem powierzchni dróg powoduje wydłużenie czasu trwania wysokich temperatur powietrza, obejmującego również godziny nocne (Lan & Zhan, 2017).

### ***Wzór przestrzenny zabudowy***

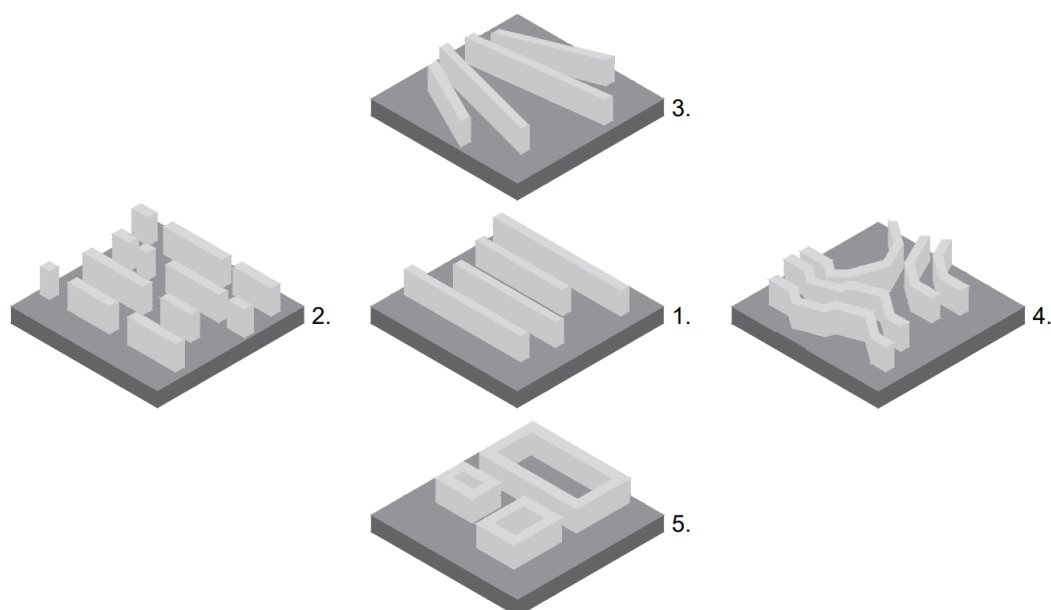
Przestrzenna konfiguracja parametryczna jednostki urbanistycznej definiuje kształt i rozkład poziomy nawierzchni utwardzonych oraz budynków. Ma ona zdecydowany wpływ na modyfikowanie intensywności efektu UHI z uwagi na ingerowanie we wzorce nasłonecznienia i przewietrzania oraz generalny udział zieleni w strukturze jednostki (Fikfak i in., 2017; Kedissa i in., 2016; Lyu i in., 2019; F. Yang i in., 2010).

Wzrost poziomu skupienia zabudowy podnosi temperaturę powietrza na terenie osiedla, a jego spadek ją obniża. Jednak dzieje się to tylko wtedy, gdy otoczeniem budynków są tereny zieleni (ryc. 30) (X. Huang & Wang, 2019; Lan & Zhan, 2017). Rozproszenie i izolacja budynków oraz nawierzchni utwardzonych (główne drogi, duże parkingi, itp.), które nie są cieniowane przez otaczające budynki lub zieleń, prowadzi do znacznego wzrostu  $T_{mrt}$  i efektu UHI (X. Huang & Wang, 2019; Sharifi & Lehmann, 2014, 2015). Spadek heterogeniczności rozkładu i kształtu bloków w jednostce zmniejsza amplitudę jej temperatury powietrza. Jednak w przypadku położenia osiedla w otoczeniu zieleni większa nieregularność i skomplikowanie kształtu bloków poprawia wewnętrzny mikroklimat dzięki większemu obszarowi styku środowiska abiotycznego z biotycznym (Erdem i in., 2021; W. Zhou i in., 2011).



**Ryc. 30.** Wpływ różnych konfiguracji przestrzennych na mikroklimat jednostki urbanistycznej: 1a,b,c) rozproszenie budynków; 2a,b,c) heterogeniczność rozkładu i kształtu budynków (źródło: opracowanie własne)

Linearność bloków jednostki sąsiedzkiej odpowiada za modyfikację rozkładu cienia i wiatru na terenie osiedla (ryc. 31) (C. Guo i in., 2019; Jiang i in., 2020). Układy urbanistyczne o zabudowie liniowej mają najmniej korzystną dla człowieka odpowiedź termiczną, a ich charakterystyka mikroklimatyczna jest identyczna jak w przypadku kanionów miejskich (Dirksen i in., 2019; Taleghani, Kleerekoper, i in., 2014; F. Yang i in., 2010, 2011). Zmniejszenie linearności poprzez zastosowanie układów o większym zróżnicowaniu rozłożenia bloków wzdłuż linii zapewnia pieszym lepszy komfort termiczny w ciągu roku (Andreou & Axarli, 2012). Podobne rezultaty uzyskuje się poprzez wprowadzanie skwerów i odstępów do zabudowy liniowej – jednak jedynie przy lokalizacji bloków na osi N-S, przy prostopadłej relacji względem głównych kierunków wiatrów (Delpak i in., 2021; S. Yang i in., 2020; C. Yuan & Ng, 2012). Możliwe jest również ustawienie bloków w konfiguracji schodzącej, co – w przypadku równoległego przepływu wiatru przez bloki – wywoła efekt leja i zwiększy prędkość wiatru na poziomie pieszego, wpływając na poprawę jego komfortu oraz skrócenie czasu trwania wysokich temperatur powietrza (Jiang i in., 2020; C. Yuan & Ng, 2012). Zamknięte bloki są układami urbanistycznymi o niekorzystnym wpływie na ich wentylację. Charakteryzują się niższą temperaturą w porze dziennej, zapewniając więcej cienia. Przy zachowaniu wysokiego stosunku szerokości do wysokości bloku, układy te są bardziej korzystne pod kątem mikroklimatu niż układy o wysokiej linearności (Jiang i in., 2020; Taleghani, Kleerekoper, i in., 2014; Vartholomaios, 2017; F. Yang i in., 2010).



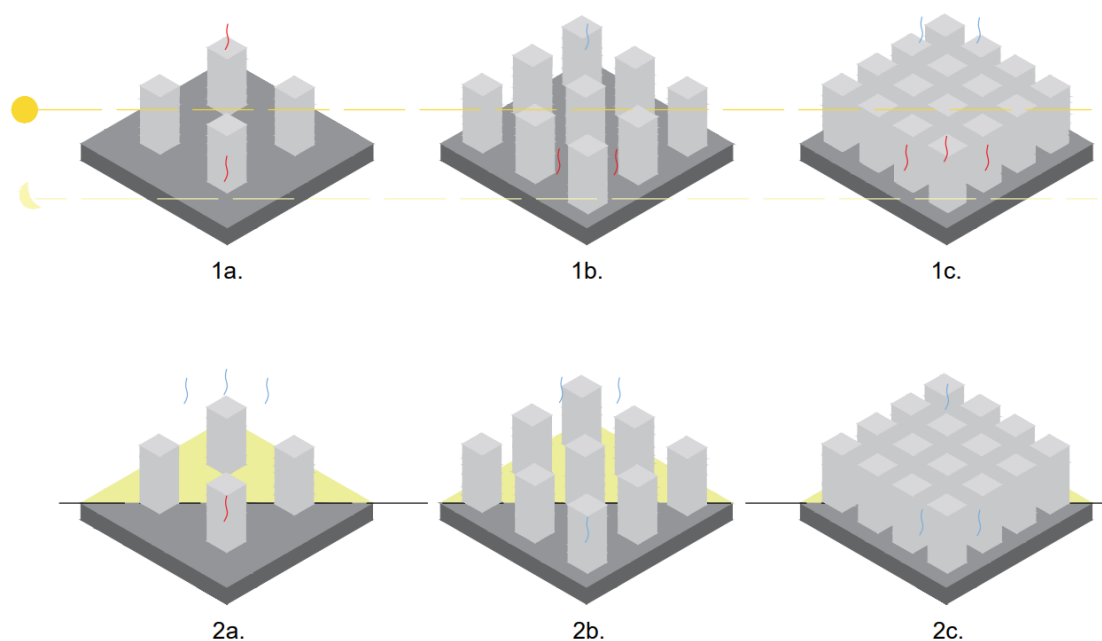
**Ryc. 31.** Reprezentacja przestrzenna zmian linearności bloków w jednostce urbanistycznej: 1) rozkład liniowy; 2) rozkład liniowy rozproszony; 3) rozkład liniowy z odchyleniem; 4) rozkład liniowy zniekształcony; 5) rozkład liniowy zamknięty (źródło: opracowanie własne)

### *Gęstość zabudowy*

Parametrem geometrycznym o największej złożoności i opisującym wzajemne relacje pomiędzy budynkami, drogami i zielenią w jednostce sąsiedzkiej jest gęstość zabudowy (Elnahas, 2003; Lan & Zhan, 2017; Y. Li i in., 2021). Warunkuje on przede wszystkim masę termiczną, wzorce cienia na terenie jednostki oraz jej emisję antropogeniczną (Erdem i in., 2021; Giridharan i in., 2008; W. Liu i in., 2017; M. Zhang & Gao, 2021). Jest to parametr o dualnej naturze ze względu na jego jednoczesną pozytywną i negatywną korelację z LST, która zależy od szerokości geograficznej, w której położone jest miasto (Y. Li i in., 2021; W. Liu i in., 2017; W. Zhou i in., 2011). Ponadto parametr ten oddziałuje synergistycznie z innymi parametrami, takimi jak odległość od centrum miasta lub promień zabudowy miasta (Azhdari i in., 2018; Lu, Li, Yu, i in., 2012).

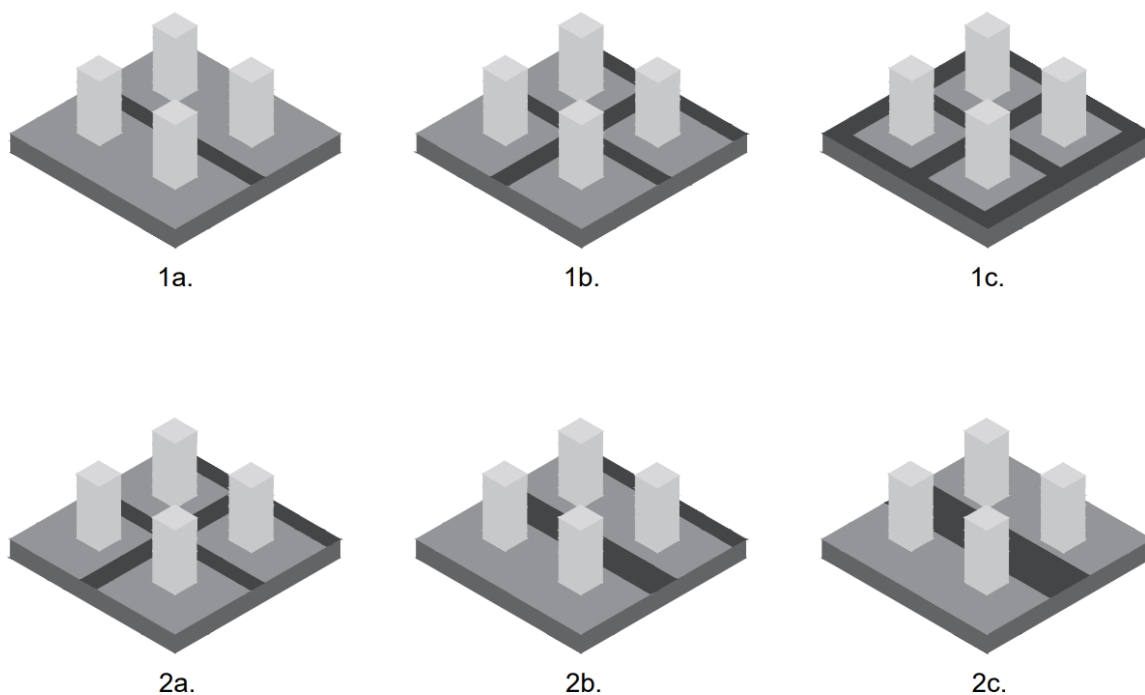
Wpływ parametru gęstości zabudowy budynkami na roczny i dobowy rozkład temperatur w jednostce sąsiedzkiej jest zmienny (ryc. 32) (Giridharan i in., 2007; Y. Yang i in., 2017). W okresie letnim wzrost tego parametru powoduje spadek ekspozycji słonecznej na poziomie pieszego – stąd może on zmniejszać AT i temperaturę radiacyjną dolnych partii bloków w godzinach o najsilniejszym natężeniu promieniowania słonecznego (Chatzipoulka i in., 2015; L. Chen i in., 2012; J. Yang, Shi, i in., 2021; X. Yang & Li, 2015). Z drugiej strony zbyt duża wartość gęstości zabudowy budynkami obniża skuteczność chłodzenia

konwekcyjnego przestrzeni osiedla i zwiększa jego masę termiczną, co prowadzi do intensyfikacji pułapkowania termicznego w nocy (S. Chen i in., 2018; X. He i in., 2021). Zimą i w lokalizacjach o niższych temperaturach wysoka wartość gęstości zabudowy budynkami zapewnia wyższy komfort termiczny pieszych i zmniejsza obciążenie grzewcze budynków (L. Chen i in., 2012; Lau i in., 2015; H. Li i in., 2021; Vartholomaios, 2017; M. Zhang & Gao, 2021).



**Ryc. 32.** Zmiana intensywności oddziaływania parametru gęstości zabudowy na temperaturę powietrza w zależności od: 1a,b,c) pory dnia i 2a,b,c) rodzaju materiału dna jednostki sąsiedzkiej (źródło: opracowanie własne)

Zagęszczenie elementów komunikacyjnych, takich jak drogi, chodniki i parkingi, wykazuje dodatnią korelację z podwyższonymi temperaturami jednostki sąsiedzkiej, co wynika z niekorzystnych właściwości termofizycznych tych elementów (ryc. 33) (Erdem Okumus & Terzi, 2021; Rhee i in., 2014; Sharifi & Lehmann, 2015). Parametr ten współdziała z parametrami rodzaju i przepustowości drogi, które warunkują poziom ciepła antropogenicznego emitowanego z poziomu drogi (Erdem i in., 2021). Jednak wbrew logice – ten sam poziom zagęszczenia dróg o różnej przepustowości może wpływać odmiennie na temperatury. Spadek projektowanej prędkości na drogach oraz wzrost liczby węzłów i połączeń dróg powoduje wzrost ilości czasu, przez jaki pojazdy emitują ciepło w jednostce sąsiedzkiej. Dlatego przy tej samej gęstości pokrycia drogi tranzytowe zapewniają niższe temperatury w jednostce sąsiedzkiej (Azhdari i in., 2018; Erdem i in., 2021; Mathew i in., 2016).

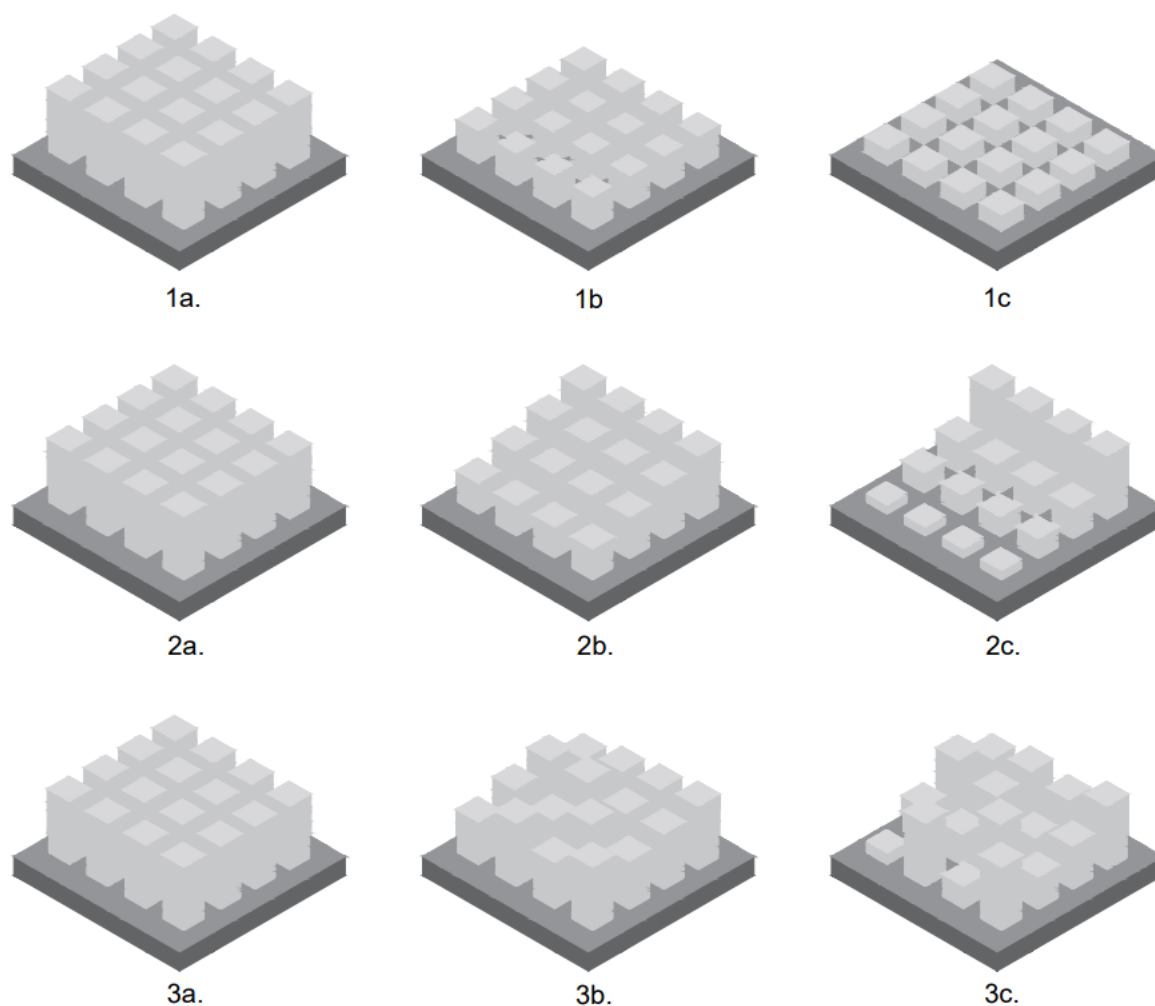


**Ryc. 33.** Reprezentacja przestrzenna zmiany: 1a,b,c) gęstości zabudowy drogami i liczby węzłów komunikacyjnych; oraz 2a,b,c) przepustowości dróg dla tej samej gęstości  
(źródło: opracowanie własne)

### ***Wysokość zabudowy***

Rozkład wysokości budynków tworzących jednostkę sąsiedzką jest istotnym modyfikatorem jej temperatury. Różne konfiguracje zmiany wysokości warunkują odmienny rozkład wiatru i cienia (ryc. 34) (Chatzipoulka i in., 2015; S. Chen i in., 2018; Mirzaee i in., 2018; Taleghani, Kleerekoper, i in., 2014; C. Yuan & Ng, 2012).

Niskie budynki zapewniają swobodny przepływ chłodnego powietrza na terenie jednostki, gdy są one położone są w otoczeniu zieleni. Taka sytuacja pozwala również drzewom na cieniowanie zabudowy i obniżanie jej temperatury (W. Wang & Ng, 2018; J. Yang, Shi, i in., 2021). W przypadku braku zieleni nieznaczny wzrost wysokości bloków zwiększa ilość cienia na poziomie pieszego, zmniejszając AT wewnątrz układu (X. Yang & Li, 2015; Y. Yang i in., 2017). Wysoka zabudowa powoduje jednak spadek prędkości wiatru na poziomie pieszego i przyczynia się do powstawania efektu pułapkowania termicznego w zabudowie o wysokiej emisji antropogenicznej (Duan i in., 2019; W. Wang & Ng, 2018; Xi i in., 2021).



**Ryc. 34.** Reprezentacja przestrzenna zmian parametrów związanych z wysokością budynków: 1a,b,c) jednolitej wysokości; 2a,b,c) powierzchni czołowej; 3a,b,c) homogeniczności wysokości (źródło: opracowanie własne)

Jednorodność wysokości zabudowy warunkuje jej powierzchnię czołową (FAI), która zwiększa się wraz z wysokością bloków. Powoduje to blokowanie swobodnego przepływu wiatru przez jednostkę (Y. Wang, Li, i in., 2020; F. Yang i in., 2011). Gradacja wysokości w kierunku głównych wiatrów i zwiększenie jej niejednorodności obniża FAI (F. Yang i in., 2011). Chropowatość aerodynamiczna jest ujemnie skorelowana z jednorodnością wysokości zabudowy. Określa ona wzorce cienia, prędkość oraz kierunki przepływu wiatru wewnątrz jednostki miejskiej (Ghadban i in., 2020; J. Yang, Menenti, i in., 2021). Bloki o jednolitej wysokości wpływają na powstawanie turbulentnego przepływu wiatru na poziomie pieszego, co jest zjawiskiem pozytywnym (W. Wang & Ng, 2018; X. Yang & Li, 2015). Ograniczony wzrost niejednorodności wysokości budynków wpływa pozytywnie na jednoczesne zwiększenie powierzchni cienia i chłodzenie przestrzeni pieszej konwekcyjnymi ruchami powietrza (F. Yang i in., 2010, 2011; J. Yang, Shi, i in., 2021). Zbyt duża różnica wysokości

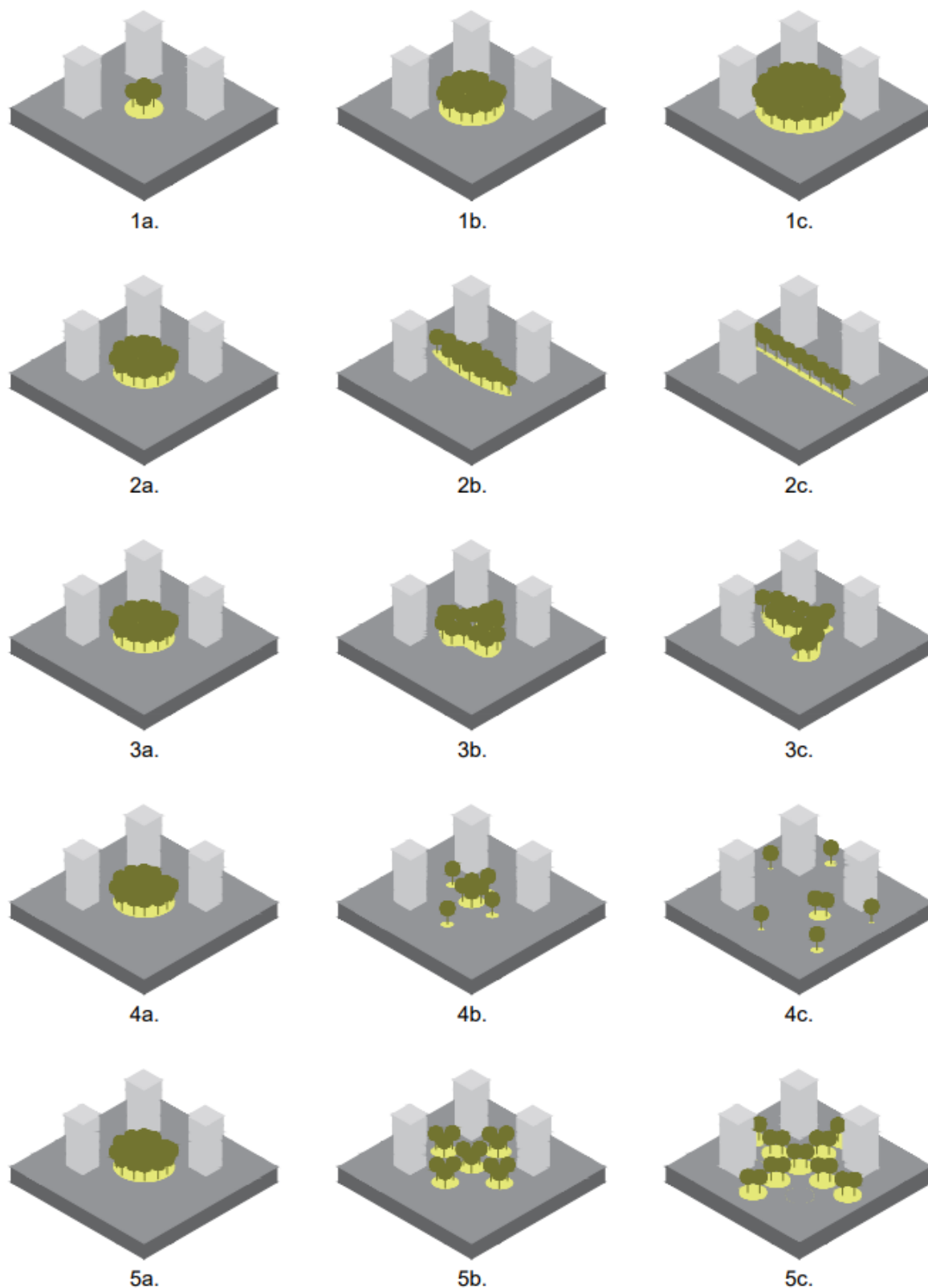
budynków prowadzi natomiast do turbulentnego przepływu powietrza przez jednostkę sąsiedzką, który utrudnia jej skuteczne przewietrzanie (Y. Choi i in., 2018).

### ***Tereny zieleni***

Miejskie tereny zieleni tworzone są przez: niezabudowane przestrzenie, lasy miejskie, parki, obiekty sportowe i cmentarze. Obiekty te są najistotniejszymi elementami tworzącymi miejską wyspę chłodu (Duarte i in., 2015; Erdem Okumus & Terzi, 2021; Giles-Corti i in., 2005; Han i in., 2008; X. He i in., 2021; Jin i in., 2005). Ich pozytywny wpływ jest zauważalny przez cały dzień, szczególnie w dni o wysokim natężeniu promieniowania słonecznego. Jest to możliwe dzięki modyfikowaniu przepuszczalności gruntów, ich pojemności wodnej, powierzchni zacienienia jednostki sąsiedzkiej i wspieraniu chłodzenia konwekcyjnego (Erdem Okumus & Terzi, 2021; J. Li i in., 2011; P. Lin i in., 2017; Mathew i in., 2016; Mohegh i in., 2018). Jednak wiele parametrów geometrycznych modyfikuje wpływ tych obiektów na mikroklimat miasta (ryc. 35). Parametr powierzchni pokrycia jednostki terenami zieleni jest ujemnie skorelowany z intensywnością efektu UHI na jej obszarze, a sama zieleń zapewnia mieszkańcom wysoki wewnętrzny i zewnętrzny komfort termiczny (Santamouris i in., 2018; M. S. Wong i in., 2010; Y. Yang i in., 2017). Stąd im większy obszar pokrycia terenu zielenią, tym większa notowana intensywność chłodzenia przestrzeni (Feyisa i in., 2014; Vaz Monteiro i in., 2016).

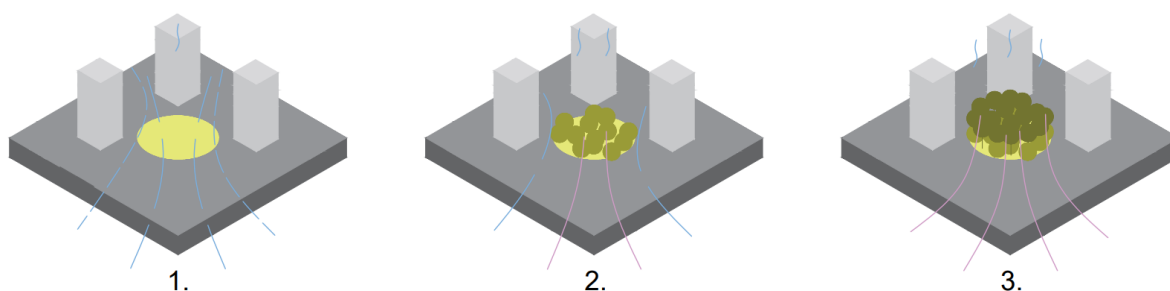
Wydłużenie kształtu, zwiększenie nieregularności i rozproszenia tych obiektów pogarsza ich odpowiedź termiczną ze względu na ich wewnętrzną destabilizację, wywołaną synergistycznym oddziaływaniem poszczególnych roślin na siebie oraz czynnikami zewnętrznymi (Feyisa i in., 2014; Lu, Li, Yang, i in., 2012). Z drugiej strony – zwiększając rozproszenie terenu zieleni przy zachowaniu regularności rozłożenia drzew, możliwa jest intensyfikacja wymiany energii pomiędzy terenami zieleni a obszarem zabudowanym oraz uzyskanie dużego udziału zacienionych powierzchni w strukturze jednostki sąsiedzkiej (Ronchi i in., 2020; W. Zhou i in., 2011). Zwarte i połączone ze sobą tereny zieleni charakteryzują się większą ilością nawierzchni przepuszczalnej dla wody, a także wyższą intensywnością zacienienia dna jednostki sąsiedzkiej. Dzięki temu takie tereny intensywniej oddziałują na mikroklimat (Cohen i in., 2012; Kim i in., 2016; Potchter i in., 2006; Ronchi i in., 2020; Y. Wang i in., 2015).





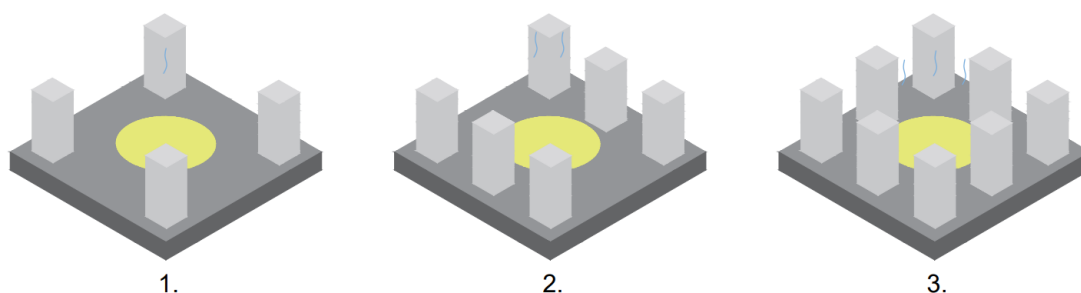
**Ryc. 35.** Reprezentacja przestrzenna zmian parametrów terenów zieleni związanych z: 1a,b,c) wielkością pokrycia przy wysokim stopniu zwartości; 2a,b,c) linearyzacją rozkładu 3a,b,c) amorfizacją rozkładu; 4a,b,c) randomizacją rozproszenia; 5a,b,c) regulacją rozproszenia (źródło: opracowanie własne)

Gęstość terenu zieleni warunkowana jest złożonością zbiorowiska roślinnego i liczbą jego pięter (ryc. 36) (Z. Zhang i in., 2013). Wpływ tego parametru na modyfikację temperatury jest wysoce zależny od długości okresu wegetacyjnego w danej szerokości geograficznej. Obecność liści, zmieniając gęstość terenu zieleni, wpływa na powstawanie różnic we wzorcach cieni i wiatrów (X. He i in., 2021; Scarano & Sobrino, 2015; J. Zhang i in., 2019). W tym aspekcie obecność drzew jest czynnikiem kluczowym, warunkującym ilość cienia i intensywność chłodzenia konwekcyjnego. Rozbudowanie pionowej struktury terenu zieleni obniża temperaturę powietrza, ale może też powodować zmniejszenie prędkości wiatru (Cheung & Jim, 2019; J. Li i in., 2011; J. Yang i in., 2020; J. Zhang i in., 2019; W. Zhou & Cao, 2020). Natomiast tereny zieleni pokryte samymi drzewami mają wyższą skuteczność łagodzenia podwyższonych temperatur w mieście niż tereny pokryte krzewami i roślinnością niską (Duncan i in., 2019; H. Lee i in., 2016).



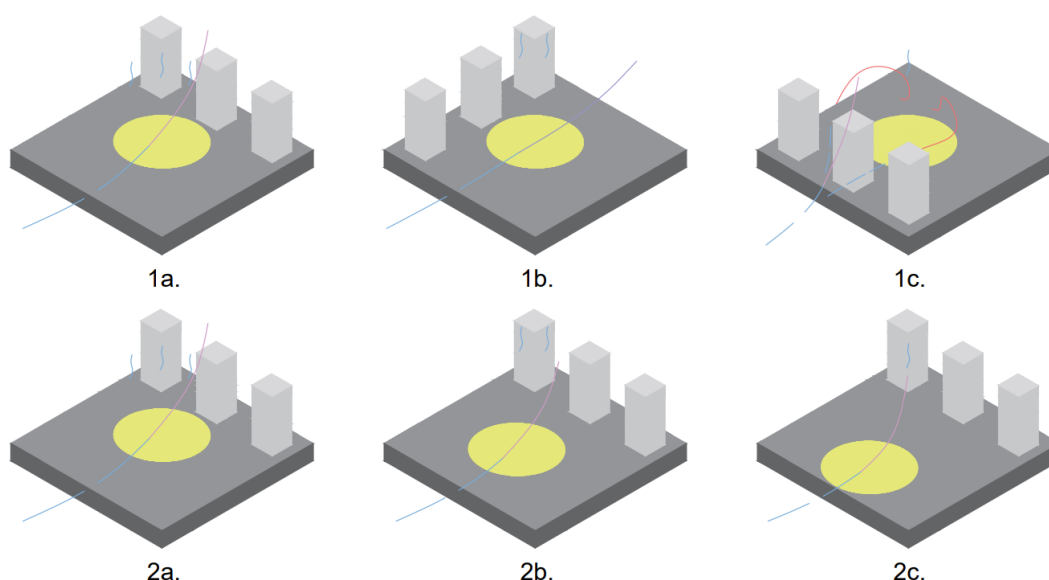
**Ryc. 36.** Zmiana intensywności oddziaływania na siłę ewapotranspiracji i prędkość powietrza w zależności od modyfikacji parametru gęstości terenu zieleni: 1) układ jednowarstwowy; 2) układ dwuwarstwowy; 3) układ trójwarstwowy (źródło: opracowanie własne)

Na intensywność chłodzenia przez tereny zieleni wpływ ma wiele czynników zewnętrznych zależnych od parametrów środowiska, w jakim się one znajdują. Intensywność chłodzenia zależy między innymi od charakteru przestrzennego zabudowy otaczającej tereny zieleni (ryc. 37). Im gęstsza zabudowa, w której znajduje się teren zieleni, tym silniejsze jego chłodzenie wyparne ze względu na ogólny wzrost temperatury powodowany zagęszczeniem przestrzeni zurbanizowanej (Giridharan i in., 2008; Jamei & Tapper, 2019; Y. Sun i in., 2019; Žuvela-Aloise i in., 2016). Jednak przy tak wysokim wzroście temperatury wokół terenu zieleni istotne może być użycie systemów nawadniających w celu minimalizacji ryzyka przegrzania roślin i zapewnienia optymalnego poziomu ewapotranspiracji (Broadbent i in., 2018; Coutts i in., 2007; Giles-Corti i in., 2005; Jamei & Tapper, 2019).



**Ryc. 37.** Zmiana intensywności oddziaływania na ewapotranspirację w zależności od modyfikacji parametru gęstości zabudowy otoczenia terenu zieleni: 1) otoczenie o rozproszonej zabudowie; 2) otoczenie o zwartej zabudowie; 3) otoczenie o gęstej zabudowie (źródło: opracowanie własne)

Transfer zimnego powietrza z terenu zieleni do terenu zurbanizowanego jest uzależniony od siły i kierunku wiatrów w jednostce sąsiedzkiej (ryc. 38). Tereny zieleni, zlokalizowane od strony nawietrznej w stosunku do obszaru o podwyższonej temperaturze, wykazują większą skuteczność w obniżaniu AT niż tereny zlokalizowane od strony zawietrznej (Dimoudi & Nikolopoulou, 2003; Heusinkveld i in., 2014; Klemm i in., 2015; Lehmann, 2014). Siłę chłodzenia w tym wypadku warunkuje również odległość terenu zurbanizowanego od terenu zieleni. W porównaniu do terenów zieleni znajdujących się dalej, tereny w bliższej relacji do zabudowy zyskują większą siłę ewapotranspiracji, a co za tym idzie, zwiększa się ich skuteczność chłodzenia (Chang & Li, 2014; H.-A. Choi i in., 2012; X. Feng & Shi, 2012; Takebayashi, 2017).

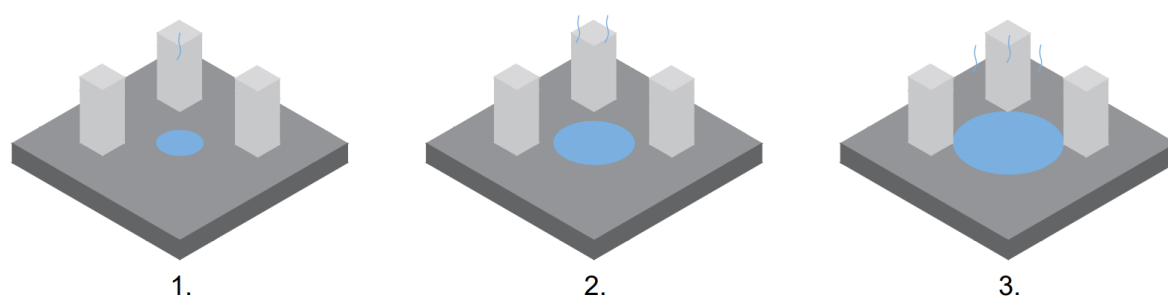


**Ryc. 38.** Wpływ parametrów dotyczących różnych relacji przestrzennych między terenami zieleni a otaczającą zabudową na mikroklimat jednostki urbanistycznej: 1) wpływ lokalizacji terenów zieleni w linii dominujących wiatrów; 2) wpływ odległości terenów zieleni od zabudowy w linii dominujących wiatrów (źródło: opracowanie własne)

## Obiekty wodne

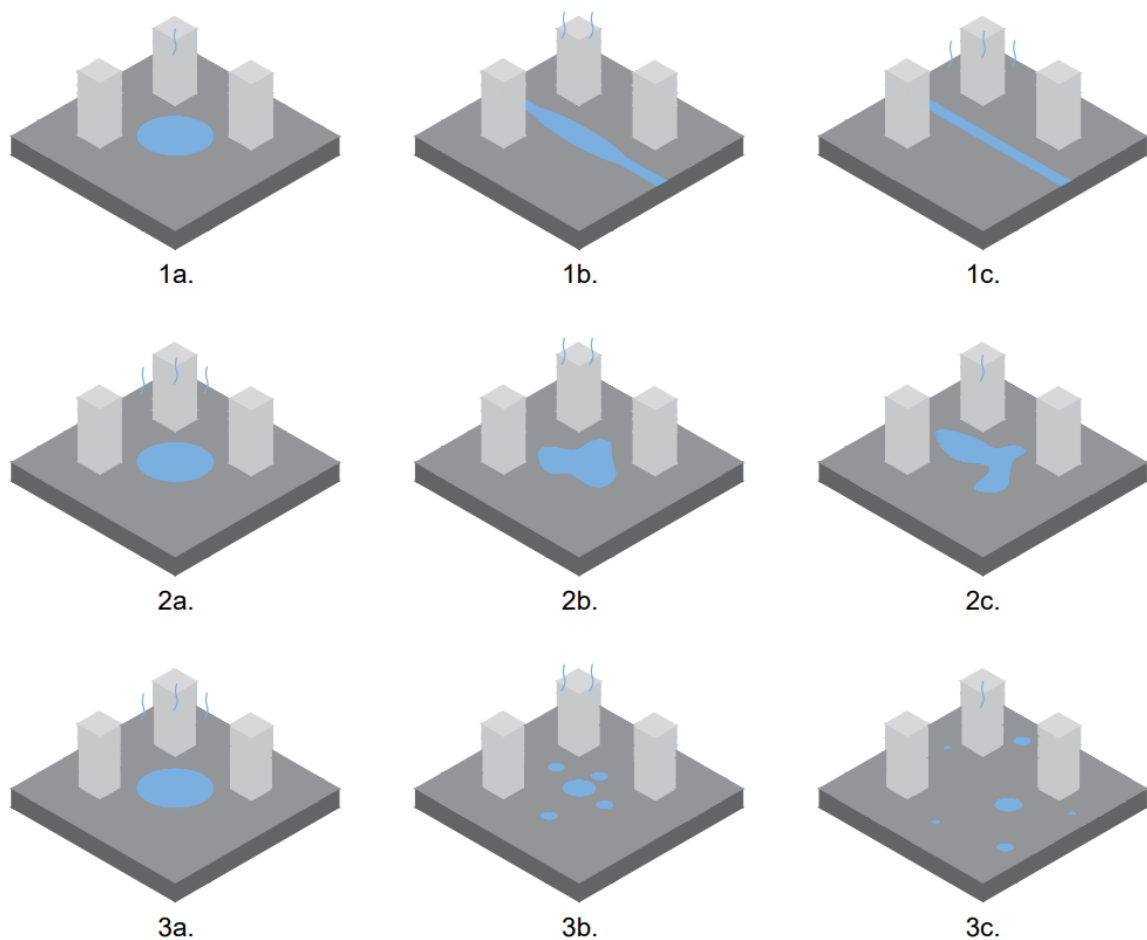
Do grupy miejskich obiektów wodnych zaliczyć można wszystkie sztuczne i naturalne zbiorniki wodne oraz otwarte ciekły (Jamei & Tapper, 2019; Völker i in., 2013). Obiekty te stanowią, obok terenów zieleni, drugi najistotniejszy element tworzący UCI (Han i in., 2008; Jin i in., 2005; Völker i in., 2013). Za sprawą wysokiej przewodności i pojemności cieplnej, obiekty wodne modyfikują dzienną temperaturę powietrza i powodują przesunięcie fazy emisji promieniowania długofalowego na godziny nocne. Emisja ta jest jednak niższa niż w przypadku nawierzchni wykonanych z innych materiałów, ponieważ pochłonięte przez obiekty wodne ciepło jest przekształcane w procesie parowania na ciepło utajone. Samo parowanie z powierzchni wody zapewnia natomiast efekt chłodzenia adiabaticznego i wywołuje konwekcyjne ruchy powietrza nad obiektami wodnymi zlokalizowanymi w jednostce sąsiedzkiej. Wpływa to znacząco na obniżenie temperatury powietrza (Gunawardena i in., 2017; Steeneveld i in., 2014; Theeuwes i in., 2013; Tominaga i in., 2015). Intensywność zjawisk związanych z obiektami wodnymi, tak samo jak ich wpływ na temperaturę, zależy jednak od pory roku, a opisane zależności są właściwe dla okresu ciepłego (Suomi & Käyhkö, 2012).

Podstawowym parametrem geometrycznym związanym z obiektami wodnymi jest ich powierzchnia w jednostce sąsiedzkiej (ryc. 39). Parametr ten jest ujemnie skorelowany z intensywnością efektu UHI (Cai i in., 2018; Chun & Guldmann, 2014; Erdem i in., 2021; W. Liu i in., 2017; Theeuwes i in., 2013; Wu i in., 2019; Xu i in., 2019). Wzrost powierzchni zbiornika wodnego przy zachowaniu jego integralności wpływa na spadek temperatury, co wiąże się ze zwiększeniem stabilności termicznej układu (Imam Syafii i in., 2017; Steeneveld i in., 2014; Zhu i in., 2011).



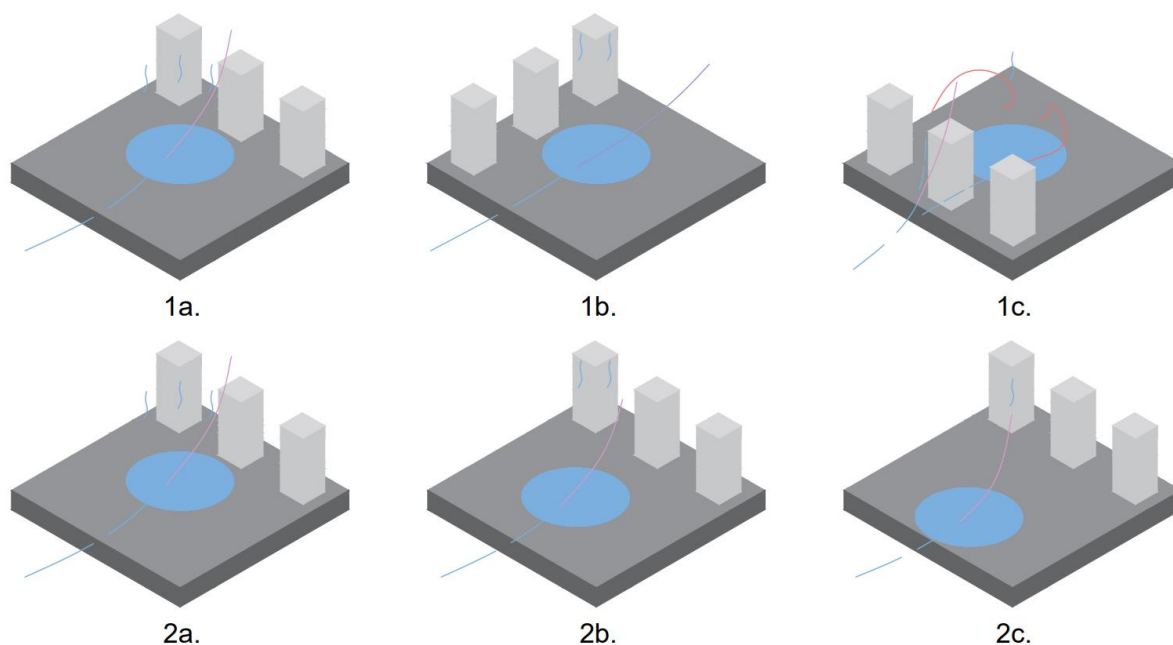
**Ryc. 39.** Wpływ wielkości powierzchni obiektu wodnego na intensywność ewaporacji z powierzchni obiektu wodnego: 1) mała powierzchnia; 2) średnia powierzchnia; 3) duża powierzchnia (źródło: opracowanie własne)

Zmniejszenie integralności obiektów wodnych przy tej samej objętości i powierzchni zmniejsza ich wpływ na siłę obniżania temperatury powietrza, ale pozwala na zwiększenie jej zakresu przestrzennego w jednostce sąsiedzkiej (ryc. 40) (Theeuwes i in., 2013; G. Yang i in., 2020). Kształty foremne charakteryzują się lepszą odpowiedzią termiczną niż złożone (Wu i in., 2019; G. Yang i in., 2020). Wzrost głębokości obiektu wodnego wywołuje zwiększenie jego pojemności termicznej, a tym samym spadek temperatury powietrza w jego otoczeniu (Abis & Mara, 2006; Newman & Herbert, 2009). Chłodzenie przestrzeni jest możliwe również przy użyciu płytkich obiektów wodnych. W takim wypadku ważne jest zapewnienie pionowego mieszania się wody w obiekcie i jej odpowiedniej ilości – stąd cieki wodne i zbiorniki przepływowe oddziałują bardziej intensywnie niż zbiorniki bezodpływowe i bezdopływowe (Abis & Mara, 2006; Newman & Herbert, 2009; Theeuwes i in., 2013).



**Ryc. 40.** Wpływ wartości różnych parametrów obiektów wodnych na mikroklimat jednostki urbanistycznej: 1a,b,c) wpływ rodzaju obiektu wodnego; 2a,b,c) wpływ nieregularności kształtu; 3a,b,c) wpływ dezintegracji  
(źródło: opracowanie własne)

Otoczenie obiektu wodnego wpływa na efektywność obniżania temperatury powietrza. Ponieważ rośliny zwiększają intensywność parowania z obiektów wodnych, ich lokalizacja w linii brzegowej jest niezbędna dla uzyskania wysokiej jakości środowiska termicznego. Nasiąknięta wodą gleba, która zapewnia możliwość wegetacji roślinom przybrzeżnym, odpowiada również za zwiększenie pojemności termicznej w otoczeniu obiektów wodnych. Zmniejszenie przepuszczalności nawierzchni w najbliższym otoczeniu cieków i zbiorników wodnych powoduje wzrost temperatury (Du i in., 2016; Hathway & Sharples, 2012). Ekspozycja na wiatr stanowi kolejny parametr określający jakość chłodzenia elementów ekosystemu miejskiego związanych z wodą. Należy go uwzględnić nawet w sytuacji, kiedy obiekt wodny zlokalizowany jest w otoczeniu zieleni. Elementy wodne o wysokiej ekspozycji mają większy wpływ na chłodzenie przestrzeni zlokalizowanej dalej w linii przepływu powietrza (ryc. 41). Podobnie niższą temperaturę wnętrza osiedla generują obiekty zlokalizowane równoległe do kierunku przepływu głównych wiatrów (Cai i in., 2018; Imam Syafii i in., 2017; Tominaga i in., 2015). Siła oddziaływania obiektu wodnego na mikroklimat osiedla spada wraz z odległością. Oznacza to, że zabudowa zlokalizowana w bezpośrednim sąsiedztwie obiektu wodnego osiągnie niższe temperatury powietrza w ciągu dnia niż zabudowa znacznie od niego oddalona (Theeuwes i in., 2013).



**Ryc. 41.** Wpływ na mikroklimat jednostki urbanistycznej parametrów dotyczących różnych relacji przestrzennych pomiędzy obiektami wodnymi a otaczającą zabudową: 1) wpływ lokalizacji obiektów wodnych w linii dominujących wiatrów; 2) wpływ odległości obiektów wodnych od zabudowy w linii dominujących wiatrów (źródło: opracowanie własne)

## **Część II**

Parametryzacja

## 4. Analiza danych parametrycznych

Wyniki analizy dostępności danych parametrycznych przedstawiono w załączniku (zał. 1). Charakter dostępności danych jest definiowany przez liczbę publikacji naukowych, w których dany parametr lub ich grupa, dotyczący obiektów BGI i BE, został wymieniony jako modyfikujący środowisko termiczne miasta.

### 4.1. Analiza ilościowa danych

W tabeli przedstawiono udział parametrów dominujących pod względem cytowań w grupie badawczej (tab. 1). Ilość danych dla obiektu określa jego dominację w klasie obiektów. Podobny zabieg zastosowano hierarchicznie w stosunku do: obiektu, rodziny parametrów oraz dominującego parametru. Wyszczególniono tutaj również grupy parametrów: 1) geometrycznych (geom) – określających wielkości przestrzenne obiektów; 2) morfologicznych (morfo) – przedstawiających strukturę wewnętrzną obiektu i jego właściwości; oraz 3) topograficznych (topo) – odpowiadających na pytania „gdzie?” i „jak?” usytuowany jest obiekt w tkance miasta. Parametr współczynnika widoczności nieba (SVF) został w tym etapie potraktowany jako zbyt złożony, a przez to – nieprecyzyjny. Mimo wysokiego udziału w badaniach związanych z BE został usunięty z klasyfikacji.

**Tabela 1.** Klasyfikacja dominacji badanych danych parametrycznych  
(źródło: opracowanie własne)

<i>Klasa</i>	<i>Obiekt miejskiego ekosystemu</i>	<i>Rodzina param.</i>	<i>Dominujący parametr</i>	<i>Liczba wystąpień w artykułach naukowych</i>	<i>Udział w klasie [%]</i>	<i>Udział w obiekcie [%]</i>	<i>Udział w rodzinie [%]</i>
BGI	-	-	-	568	100	-	-
	Obiekty wodne (WO)	-	-	47	8.27	100	-
		Geom	-	15	2.64	31.92	100
			Obszar	9	1.58	-	60
		Morfo	-	4	0.70	8.51	100
			Procent pokrycia roślinnością brzegów	2	0.35	-	50
		Topo	-	28	4.92	59.57	100
			Ekspozycja na wiatr (trend transferu zimna)	6	1.05	-	21.43
	Tereny zieleni powierzchniowej (GA)	-	-	231	40.67	100	-
		Geom	-	51	8.98	22.08	100



<i>Klasa</i>	<i>Obiekt miejskiego ekosystemu</i>	<i>Rodzina param.</i>	<i>Dominujący parametr</i>	<i>Liczba wystąpień w artykułach naukowych</i>	<i>Udział w klasie [%]</i>	<i>Udział w obiekcie [%]</i>	<i>Udział w rodzinie [%]</i>
			Powierzchnia	32	5.63	-	62.74
		Morfo	-	125	22.01	54.11	100
			Powierzchnia pokrycia drzewami	14	2.46	-	11.20
		Topo	-	55	9.68	23.81	100
			Ekspozycja na promieniowanie słoneczne/stopień zacielenia przez otaczające struktury	6	1.05	-	10.91
	Zieleń przyuliczna (SG)	-	-	110	19.37	100	-
		Geom	-	26	4.58	23.48	100
			Szerokość korony/promień korony	8	1.41	-	30.77
		Morfo	-	39	6.87	35.65	100
			Wielkość liści/indeks pokrycia liśćmi	11	1.94	-	28.21
		Topo	-	45	7.92	40.87	100
			Geometria kanionu miejskiego/ Wysokość kanionu miejskiego/ Szerokość kanionu miejskiego	5	0.88	-	11.11
				5	0.88	-	11.11
				5	0.88	-	11.11
	Dachy zielone (GR)	-	-	121	21.30	100	-
		Geom	-	20	3.52	16.80	100
			Grubość substratu	10	1.76	-	50
		Morfo	-	92	16.20	76.80	100
			Stopień nawodnienia/wilgotność substratu	24	4.22	-	26.09
		Topo	-	8	1.41	6.40	100
			Wysokość nad poziomem pieszego/	2	0.35	-	25
			Odległość od najbliższego obiektu BGI (synergia)	2	0.35	-	25
	Ściany zielone (GW)	-	-	59	10.38	100	-
		Geom	-	15	2.64	25.42	100
			Stopień pokrycia budynku przez roślinność /	8	1.41	-	53.33

<i>Klasa</i>	<i>Obiekt miejskiego ekosystemu</i>	<i>Rodzina param.</i>	<i>Dominujący parametr</i>	<i>Liczba wystąpień w artykułach naukowych</i>	<i>Udział w klasie [%]</i>	<i>Udział w obiekcie [%]</i>	<i>Udział w rodzinie [%]</i>
BE	-	Morfo	powierzchnia zielonej ściany	33	5.81	55.93	100
			-				
		Topo	Szerokość liści, powierzchnia liści, gęstość ulistnienia/ Indeks pokrycia liśćmi	8	1.41	-	24.24
			-				
		Geom	Lokalizacja względem kierunków świata	9	1.58	-	81.82
			-				
		Geom	-	277	27.26	72.3	100
			Gęstość zabudowy				
		Morfo	-	82	8.07	21.4	100
			Albedo powierzchni miejskiej				
	Topo	-	24	2.36	6.3	100	
		Odległość od centrum miasta					
	Geom	Kaniony uliczne (SC)	-	403	39.66	100	-
			-				
	Budynki (BU)	Geom	-	234	23.03	58.1	100
			Współczynnik proporcji				
		Morfo	-	111	10.92	27.5	100
			Albedo powierzchni ziemi				
		Topo	-	58	5.71	14.4	100
			Orientacja ulicy				
Geom		-	230	22.64	100	-	
		-					
Morfo		-	80	7.87	34.8	100	
		Wysokość budynku					
Topo	-	128	12.60	55.7	100		
	Albedo materiału						
Topo	-	40	3.93	-	31.25		
	Orientacja budynku						
Topo	-	22	2.17	9.5	100		
	Orientacja budynku						
Topo	-	12	1.18	-	54.55		
	Orientacja budynku						

W kategorii obiektów WO odnotowano dominację rodziny parametrów topograficznych. W tej grupie na tle innych wyróżnia się udział parametru ekspozycji obiektów wodnych na wiatr. W grupie parametrów geometrycznych odnotowuje się dominację parametru obszaru zajmowanego przez obiekt wodny. W grupie parametrów morfologicznych, mających najmniejsze znaczenie w tej kategorii obiektów, największą

liczbą cytowań charakteryzował się parametr stopnia pokrycia brzegów obiektów wodnych roślinnością.

W kategorii obiektów GA widoczna jest dominacja grupy parametrów morfologicznych. Dla tej grupy najistotniejszym parametrem jest procent pokrycia terenów zieleni powierzchniowej drzewami. W grupie parametrów geometrycznych najczęściej cytowany był parametr powierzchni terenów zieleni powierzchniowej, a w topograficznych – ich ekspozycja na promieniowanie słoneczne.

W kategorii obiektów SG największym udziałem procentowym charakteryzuje się grupa parametrów topograficznych, w których dominuje ilość danych dotyczących parametrów związanych z geometrią kanionu ulicznego otaczającego zielen przyuliczną. W grupie parametrów morfologicznych wysokie znaczenie ma parametr indeksu pokrycia drzew przyulicznych liśćmi. Szerokość korony drzew przyulicznych była natomiast dominantą grupy parametrów geometrycznych.

W kategorii obiektów GR największą grupą są parametry morfologiczne. Najistotniejszym parametrem z tej grupy jest stopień uwodnienia warstwy wegetacyjnej zielonego dachu. Na kolejnym miejscu zakwalifikowano grupę parametrów geometrycznych, w której dominującą rolę przejął parametr grubości substratu, w którym rosną rośliny na dachu zielonym. W grupie parametrów topograficznych – o najmniejszym udziale, największy wpływ miały łącznie parametry związane z wysokością dachu zielonego nad powierzchnią ziemi oraz odległości zielonego dachu od najbliższego obiektu BGI.

W kategorii obiektów GW dominująca okazała się grupa parametrów morfologicznych, w której największą liczbą cytowań charakteryzował się parametr indeksu pokrycia zielonej ściany liśćmi. Dla grupy parametrów geometrycznych wysokim odsetkiem odznaczał się procent pokrycia budynku ścianą zieloną. Z kolei w grupie parametrów morfologicznych największy udział miał parametr orientacji ściany zielonej względem ścieżki słonecznej.

W przypadku obiektów BGI związanych z budynkami, ze względu na podobieństwo w konstrukcjach tych obiektów, zauważalna jest zbliżona struktura rozkładu ciężkości grup parametrów.

W kategorii obiektów NH największy udział procentowy zajęła grupa parametrów geometrycznych, w której wyraźnie zaznaczyła się dominacja parametru gęstości zabudowy jednostki sąsiedzkiej. Albedo powierzchni jednostki sąsiedzkiej stanowi najistotniejszy parametr grupy związanej z morfologią. W grupie parametrów topograficznych dominację objął natomiast parametr odległości jednostki sąsiedzkiej od centrum miasta.

W kategorii obiektów SC największe znaczenie miała grupa parametrów geometrycznych. W grupie tej zdecydowanie najwięcej cytowań miał parametr współczynnika proporcji kanionu ulicznego. Drugą co do wielkości grupą parametrów była w tym wypadku również grupa morfologiczna, gdzie dominację objął parametr albedo powierzchni gruntu. Najmniej znaczącą grupą były parametry topograficzne. Wysoką cytowalnością odznaczył się parametr orientacji kanionu względem ścieżki słonecznej.

W kategorii obiektów BU rozkład ciężkości grup parametrów geometrycznych i morfologicznych był wyrównany. W pierwszej grupie największą liczbę cytowań uzyskał parametr wysokości budynku. W drugiej natomiast parametr albedo materiałów budowlanych użytych do jego budowy. W najmniej znaczącej grupie parametrów topograficznych wyróżniał się parametr orientacji budynku względem ścieżki słonecznej.

W rozkładach dominacji większości grup parametrów obiektów BE zauważalna jest pewna powtarzalność dominujących parametrów. Potwierdza ona hierarchiczność i komplementarność skal zastosowanych dla obiektów.

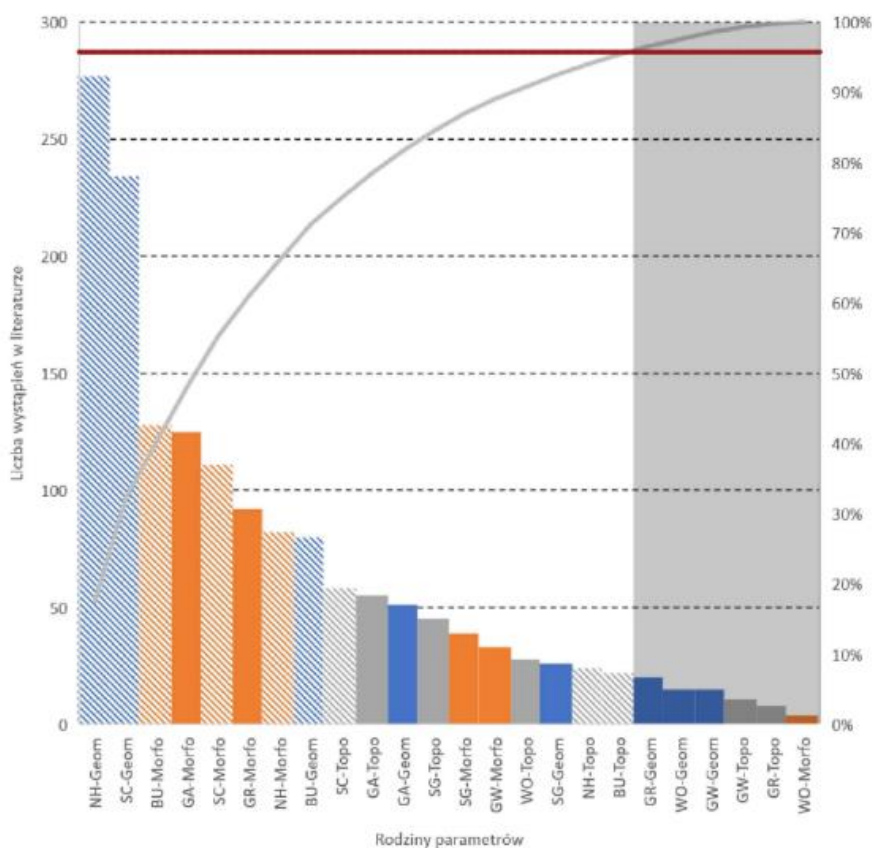
Analiza ilościowa została przedstawiona w diagramie Pareto. Pokazała ona ilościowy rozkład danych w poszczególnych grupach parametrów (rodzinach) (ryc. 42). Charakter rozkładu jest bardzo mocno zróżnicowany, co wskazuje na duże rozpiętości w pozyskanych danych. W analizie uwzględniono 24 badane grupy parametrów BGI (pełny kolor) i BE (szrafura). 50% wszystkich danych zamyka się w 4 grupach najlepiej przebadanych w literaturze.

Do najlepiej przebadanych grup parametrów należy większość grup w klasie BE oraz parametry morfologiczne (kolor pomarańczowy) dla terenów zieleni powierzchniowej i zielonych dachów (8 najlepiej przebadanych grup odpowiedzialnych jest za 75% danych). W badaniach nad wpływem obiektów BE na mikroklimat miasta widoczna jest dominacja grup parametrów geometrycznych (kolor niebieski) związanych z NH i SC. Wywołane jest to znaczącą liczbą możliwych do przebadania konfiguracji przestrzennych związanych z tymi obiektami. Najmniejszą liczbą cytowań charakteryzują się grupy parametrów topograficznych (kolor szary) ogółem. Ze względu na teoretycznie małe znaczenie tej grupy parametrów w modyfikacji miejskiego mikroklimatu, synergistyczny wpływ tej grupy na odpowiedź termiczną BU, SC i NH jest rzadko badany.

Najczęściej notowanymi obiektami BGI w literaturze są GA. Ten typ obiektów ekosystemu miejskiego charakteryzuje się również największym zbiorem parametrów w porównaniu do innych obiektów BGI. Najrzadziej spotykane były parametry związane z WO, co można tłumaczyć wczesną fazą zainteresowania tym kierunkiem badań. Najczęściej

cytowaną grupą parametrów w obszarze BGI były parametry morfologiczne, które zakwalifikowano jako istotne dla obiektów: GA, GR, GW. Sugeruje to silny trend badań nad właściwościami tych obiektów. Udział parametrów topograficznych na modyfikacje środowiska termicznego zauważalny jest w SG. Wynika to ze specyficznej konfiguracji przestrzennej kanionów ulicznych, które potrafią katalizować wpływ SG na mikroklimat.

Ustając próg danych na poziomie 95% (linia koloru czerwonego) można wyznaczyć 18 grup (rodzin) parametrów o dostatecznej ilości danych. Istnieje potrzeba uzupełnienia danych w grupach o najmniejszym udziale procentowym (na wykresie oznaczonych polem w kolorze szarym), co pozwoli na zoptymalizowanie modelu w późniejszej fazie jego rozwoju.



**Ryc. 42.** Częstotliwość cytowań rodzin parametrów w artykułach naukowych opisujących wpływ obiektów BE i BGI na środowisko termiczne ekosystemu miejskiego: NH-Geom – parametry geometryczne jednostki sąsiedzkiej; NH-Morfo – parametry morfologiczne jednostki sąsiedzkiej; SC-Geom – parametry geometryczne kanionu ulicznego; SC-Morfo – parametry morfologiczne kanionu ulicznego; SC-Topo – parametry topograficzne kanionu ulicznego; BU-Geom – parametry geometryczne budynku; BU-Morfo – parametry morfologiczne budynku; BU-Topo – parametry topograficzne budynku; GW-Morfo – parametry morfologiczne ścian zielonych; SG-Topo – parametry topograficzne zieleni przyulicznej; GA-Morfo – parametry morfologiczne terenów zieleni powierzchniowej; GA-Geom – parametry geometryczne terenów zieleni powierzchniowej. GR-Morfo – parametry morfologiczne zielonych dachów; WO-Topo – parametry topograficzne obiektów wodnych; SG-Morfo – parametry morfologiczne zieleni przyulicznej; GA-Topo – parametry topograficzne terenów zieleni powierzchniowej; GW-Geom – parametry geometryczne zielonych ścian; GR-Geom – parametry geometryczne zielonych dachów; SG-Geom – parametry geometryczne zieleni przyulicznej  
(źródło: opracowanie własne)

## 4.2. Analiza jakościowa danych

Wyniki analiz CCA przeprowadzonych osobno dla klas obiektów BE i BGI zostały przedstawione poniżej. W klasie BE obiekty NH i SC są najistotniejsze statystycznie dla modelu, co można wywnioskować z sumy wartości  $F$  tych obiektów (tab. 2). Dla obiektów NH i SC najbardziej istotną grupą parametrów były parametry geometryczne. W kategorii obiektów BU odnotowano największą istotność parametrów morfologicznych. Najmniejszą wartością  $F$  charakteryzowała się natomiast grupa parametrów topograficznych, związana z obiektami BU.

**Tabela 2.** Parametry statystyczne dla analizy CCA w klasie obiektów BE (źródło: (Antoszewski i in., 2022) ze zmianami)

Liczba zmiennych	9
Liczba odrzuconych zmiennych	1
Liczba permutacji	9999

Rodzina parametrów <sup>1</sup>	Wartość $p$	Wartość $F$	% Eksp.
NH-Geom	0.001	25.69	12.63
SC-Geom	0.001	21.08	10.22
BU-Morfo	0.001	19.36	10.79
SC-Morfo	0.002	15.23	8.66
SC-Topo	0.003	13.56	7.66
NH-Morfo	0.005	10.49	6.15
BU-Geom	0.012	7.36	5.33
BU-Topo	0.028	5.88	5.07

<sup>1</sup> NH-Geom – parametry geometryczne jednostki sąsiedzkiej; NH-Morfo – parametry morfologiczne jednostki sąsiedzkiej; SC-Geom – parametry geometryczne kanionu ulicznego; SC-Morfo – parametry morfologiczne kanionu ulicznego; SC-Topo – parametry topograficzne kanionu ulicznego; BU-Geom – parametry geometryczne budynku; BU-Morfo – parametry morfologiczne budynku; BU-Topo – parametry topograficzne budynku

W klasie obiektów BGI najistotniejszymi obiektami były GA, SG i GW (tab. 3). Sumaryczna wartość  $F$  tych obiektów jest na wysokim poziomie w porównaniu do innych obiektów. Dla GA, GR i GW istotną grupą parametrów są parametry morfologiczne. Ponadto w kategorii obiektów GA i WO istotną była grupa parametrów topograficznych. Najniższą wartością  $F$  reprezentowała grupa SG-Geom, co oznacza, że parametry te charakteryzują się najistotniejszym poziomem istotności dla modelu.

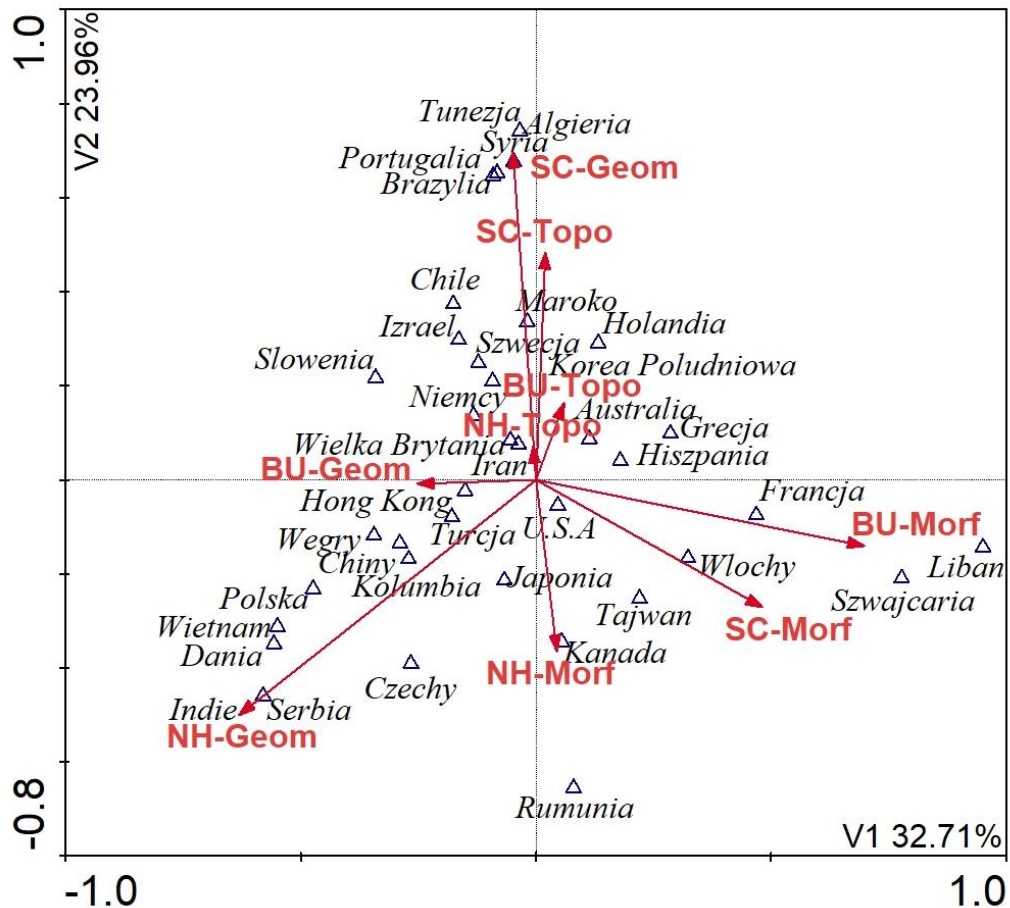
**Tabela 3.** Parametry statystyczne dla analizy CCA w klasie obiektów BGI  
(źródło: (Antoszewski i in., 2020) ze zmianami)

Liczba zmiennych	15		
Liczba odrzuconych zmienny	4		
Liczba permutacji	9999		
Rodzina parametrów <sup>1</sup>	Wartość <i>p</i>	Wartość <i>F</i>	% Eksp.
GW-Morfo	0,001	16.265	14.25
SG-Topo	0,001	14.632	11.14
GA-Morfo	0,001	14.023	10.53
GA-Geom	0,001	13.269	9.21
GR-Morfo	0,001	10.961	8.36
WO-Topo	0,001	9.863	7.77
SG-Morfo	0,002	9.569	7.54
GA-Topo	0,003	6.991	6,87
GW-Geom	0,007	6.657	6.42
GR-Geom	0,018	4.269	5.26
SG-Geom	0,036	2.539	4,98

<sup>1</sup> GW-Morfo – parametry morfologiczne ścian zielonych; SG-Topo – parametry topograficzne zieleni przyulicznej; GA-Morfo – parametry morfologiczne terenów zieleni powierzchniowej; GA-Geom – parametry geometryczne terenów zieleni powierzchniowej. GR-Morfo – parametry morfologiczne zielonych dachów; WO-Topo – parametry topograficzne obiektów wodnych; SG-Morfo – parametry morfologiczne zieleni przyulicznej; GA-Topo – parametry topograficzne terenów zieleni powierzchniowej; GW-Geom – parametry geometryczne zielonych ścian; GR-Geom – parametry geometryczne zielonych dachów; SG-Geom – parametry geometryczne zieleni przyulicznej

Ze względu na brak statystycznej istotności w przeprowadzonych analizach grup parametrów: NH-Topo; WO-Morfo; WO-Geom; GW-Topo; GR-Topo można traktować je jako przebadane w niedostatecznym stopniu oraz o małym wpływie na model. Powyższe grupy poleca się poddać dalszym badaniom w celu uzyskania większej ilości danych dla parametrów z nimi związanych i zwiększenia istotności tych grup w modelu.

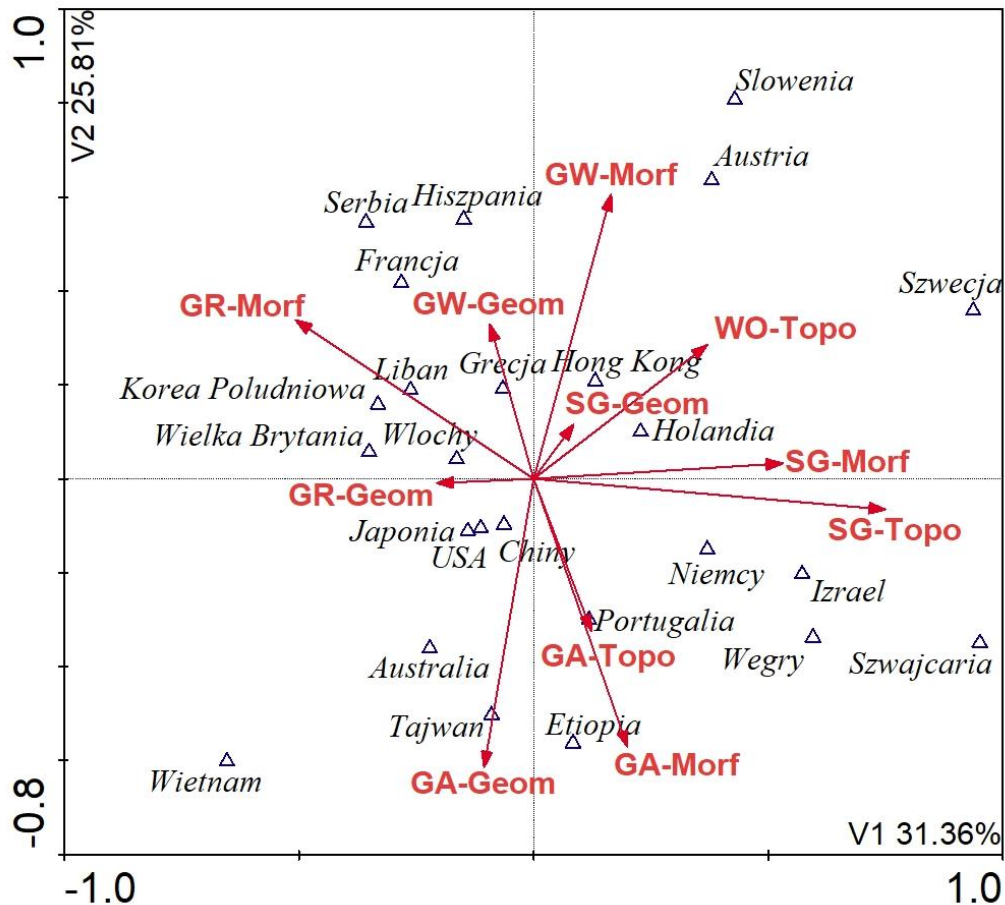
W klasie obiektów BE najczęściej pojawiały się parametry przebadane w Chinach, Hong Kongu, Włoszech, USA, Grecji, Niemczech i Francji (ryc. 43). Najwięcej przykładów badań nad grupami parametrów topograficznych i geometrycznych kanionów ulicznych można odnaleźć w publikacjach brazylijskich, syryjskich, portugalskich, tunezyjskich i algierskich. Grupa parametrów geometrycznych jednostki sąsiedzkiej miała wysoki udział w badaniach przeprowadzonych w Serbii, Indiach, Danii, Polsce, Wietnamie i Czechach. Dane pochodzące ze Szwajcarii, Włoch, Libanu i Francji najczęściej opisują parametry związane z budynkami.



**Ryc. 43.** Analiza kanonicznej analizy zgodności (CCA) ( $n = 948$ ). Rozkład częstotliwości badań nad rodzinami parametrów obiektów z klasy BE na tle krajów, w których były prowadzone (na podstawie prac włączonych do analiz). N publikacji według kraju pochodzenia (Chiny 184; Włochy 103; Hong Kong 91, Grecja 88; USA 70; Niemcy 62; Francja 52; Hiszpania 43; Wielka Brytania 41; Australia 35; Korea Południowa 33; Węgry 31; Turcja 22; inne <20) (źródło: (Antoszewski i in., 2022) ze zmianami)

W klasie obiektów BGI najwięcej wystąpień danych parametrycznych odnotowuje się w badaniach opisujących przypadki z Hong Kongu, Wielkiej Brytanii i Chin (ryc. 44). Najbardziej zróżnicowane pod względem badanych parametrów są z kolei dane pochodzące z Chin, Hongkongu i USA. Parametry terenów zieleni powierzchniowej i zieleni przyulicznej najczęściej badano w Niemczech, Izraelu, Szwajcarii, Portugalii i na Węgrzech. Z kolei zielone dachy i ściany były dominującym obiektem badań w Hiszpanii, Grecji, Francji i Serbii.





**Ryc. 44.** Kanoniczna analiza zgodności (CCA) (n = 167). Rozkład częstotliwości badań nad rodzinami parametrów obiektów z klasy BGI na tle krajów, w których były prowadzone (na podstawie prac włączonych do analiz). N publikacji według kraju pochodzenia (Hongkong 27; Chiny 25; Wielka Brytania 13; Japonia 12; Australia 11; Niemcy 11; USA 9; Włochy 8; Izrael 8; Holandia 7; Grecja 6; inne <5)  
(źródło: (Antoszewski i in., 2020) ze zmianami)

Rozkład geograficzny badań nad istotnymi grupami parametrów jest silnie rozproszony. Jest to pozytywne zjawisko, ponieważ pozyskane dane są bardziej reprezentatywne dla całego obszaru występowania klimatu umiarkowanego. Użycie w modelu danych pochodzących z różnych szerokości geograficznych zwiększy normalizację parametrów. W rozkładzie przestrzennym grup parametrów można dostrzec jednak pewne zależności. W przypadku grup parametrów topograficznych i geometrycznych związanych z kanionami ulicznymi, państwa na terytorium których przeprowadzono badania położone są głównie w zasięgu cieplejszych odmian klimatu umiarkowanego o gorącym lecie. Z tego też względu, w celu zwiększenia reprezentatywności danych parametrycznych, dobrym rozwiązaniem będzie przebadanie tych grup parametrów w lokalizacjach o innych odmianach klimatu w późniejszej fazie rozwoju modelu.

## 5. Model parametryczny

### 5.1. Dane parametryczne włączone do modelu

Na podstawie analizy dostępności już opracowanych danych parametrycznych wytypowano parametry możliwe do użycia w budowie modelu logicznego środowiska termicznego (tab. 4). Liczba powtórzeń próby badawczej (liczba doniesień o badaniu parametru w literaturze przedmiotu) została określona na 5. W ten sposób może zostać zapewniony minimalny poziom normalizacji próby. Wszystkie parametry o pięciu lub więcej cytowaniach zostały wytypowane jako parametry umożliwiające budowę modelu. Parametry wybrane do dalszych badań pilotażowych na etapie prototypowania zaznaczono pogrubieniem.

**Tabela 4.** Parametry predestynowane do budowy modelu i wybrane do dalszych badań (pogrubienie) (źródło: opracowanie własne na podstawie (Antoszewski i in., 2020, 2022))

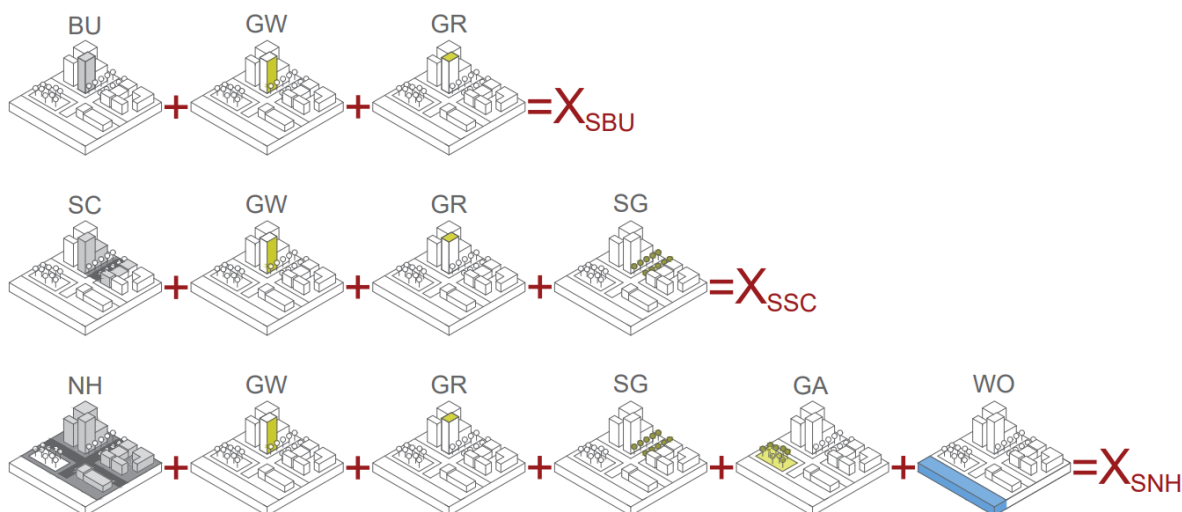
<i>Rodzaj obiektu</i>	<i>Rodzina parametrów</i>	<i>Parametr</i>	
Obiekty wodne	-	-	
	Geom	- <b>Obszar</b> Kształt	
	Topo	- <b>Ekspozycja na wiatr</b>	
Tereny zieleni powierzchniowej	-	-	
	Geom	- <b>Powierzchnia</b> Kształt	
	Morfo	-	Procent pokrycia roślinnością Typ dominującej zieleni
		-	<b>Procent pokrycia drzewami</b> Procent pokrycia krzewami Procent pokrycia trawnikiem
		-	Występowanie obiektów wodnych Procent pokrycia obiektami wodnymi Procent pokrycia infrastrukturą techniczną
-		Obecność systemu nawadniania Stopień nasycenia gleby wodą	
Topo	- Gęstość zabudowy w jednostce sąsiedzkiej <b>Stopień zacienienia przez otaczającą zabudowę</b>		
Zieleń przyuliczna	-	-	
	Geom	- Wysokość drzewa <b>Szerokość korony</b>	

<i>Rodzaj obiektu</i>	<i>Rodzina parametrów</i>	<i>Parametr</i>
		Wysokość i szerokość pnia
	Morfo	-
		Gatunek drzew
		<b>Indeks pokrycia liśćmi</b>
	Topo	-
		<b>Geometria kanionu ulicznego</b>
		<b>Wysokość kanionu ulicznego</b>
		<b>Szerokość kanionu ulicznego</b>
Zielone dachy	-	-
	Geom	-
		<b>Grubość warstwy wegetacyjnej</b>
		Wysokość roślin
	Morfo	-
		Typ roślinności
		Gatunek roślin
		Indeks pokrycia liśćmi
		<b>Stopień nawodnienia warstwy wegetacyjnej</b>
Zielone ściany	-	-
	Geom	-
		<b>Procent pokrycia budynku</b>
	Morfo	-
		<b>Indeks pokrycia liśćmi</b>
		Obecność szczeliny wentylacyjnej
	Topo	-
		<b>Orientacja względem ścieżki słonecznej</b>
Jednostki sąsiedzkie	-	-
	Geom	-
		Stopień urbanizacji
		Intensywność zabudowy
		<b>Gęstość zabudowy</b>
		Długość bloku
		Średnia wysokość zabudowy
		Gęstość pokrycia drogami
		Powierzchnia nieprzepuszczalnych nawierzchni
		Stosunek pokrycia obiektami wodnymi
		Współczynnik pokrycia zielenią
	Morfo	-
		Znormalizowany różnicowy wskaźnik wegetacji
		Globalne albedo jednostki sąsiedzkiej
		<b>Albedo powierzchni jednostki sąsiedzkiej</b>
		Antropogeniczna moc cieplna
		Zagęszczenie populacji
	Topo	-
		<b>Odległość od centrum miasta</b>
Kaniony uliczne	-	-
	Geom	-
		Szerokość
		<b>Współczynnik proporcji</b>
	Morfo	-
		Emisyjność powierzchni
		Pojemność cieplna materiału
		Przewodność cieplna materiału
		Albedo kanionu ulicznego
		<b>Albedo powierzchni gruntu</b>

Rodzaj obiektu	Rodzina parametrów	Parametr
Budynki	Topo	Rodzaj materiału nawierzchni
		-
	Geom	<b>Orientacja ulicy względem ścieżki słonecznej</b>
		Współczynnik zacienienia
		-
	Morfo	<b>Wysokość</b>
		Współczynnik kształtu
Topo	-	
	Emisyjność materiałów budowlanych	
	Przewodność cieplna materiałów budowlanych	
	Objętościowa pojemność cieplna materiałów budowlanych	
		<b>Albedo materiałów budowlanych</b>
		Typ materiału elewacyjnego
		-
		<b>Orientacja budynku względem ścieżki słonecznej</b>

## 5.2. Architektura modelu parametrycznego

Logiczna reprezentacja parametrycznego modelu środowiska termicznego miasta została przedstawiona w załączniku (zał. 2). Na podstawie hierarchii skal i informacji o przynależności obiektów możliwe jest skonstruowanie na tym etapie ogólnych wzorów logicznych opisujących środowisko termiczne ekosystemu miejskiego w różnych skalach (ryc. 45).



**Ryc. 45.** Składowe ekosystemu miejskiego tworzące środowisko termiczne w danych skalach: BU – budynek; GW – zielona ściana; GR – zielony dach; SC – kanion uliczny; SG – zielen uliczna; NH – jednostka sąsiedzka; GA – teren zieleni powierzchniowej; WO – obiekt wodny. Skale:  $X_{SBU}$  – skala budynku;  $X_{SSC}$  – skala kanionu ulicznego;  $X_{SNH}$  – skala jednostki sąsiedzkiej (źródło: opracowanie własne)

W rzeczywistości istnieje jednak wysokie prawdopodobieństwo niewystąpienia w modelu któregoś z obiektów BGI. Z tego względu należy uszczegółowić wzory ogólne, sprowadzając je do postaci właściwych dla danej skali:

$$X_{SBU} = \frac{\sum O_{SBU}}{n}$$

$$X_{SSC} = \frac{\sum O_{SSC}}{n}$$

$$X_{SNH} = \frac{\sum O_{SNH}}{n}$$

gdzie:

$X_{SBU}$  – środowisko termiczne budynku,

$X_{SSC}$  – środowisko termiczne kanionu ulicznego,

$X_{SNH}$  – środowisko termiczne jednostki sąsiedzkiej,

$O_{SBU}$  – obiekty ekosystemu miejskiego w skali budynku,

$O_{SSC}$  – obiekty ekosystemu miejskiego w skali kanionu ulicznego,

$O_{SNH}$  – obiekty ekosystemu miejskiego w skali jednostki sąsiedzkiej,

$n$  – liczba obiektów w zależności od wystąpienia.

## **6. Możliwości optymalizacji środowiska termicznego miejskich ekosystemów w Polsce**

W obecnym paradygmacie urbanizacji wyeliminowanie efektu UHI wydaje się niewykonalnym zadaniem. Możliwa jest natomiast optymalizacja tego efektu z użyciem celowanych interwencji w strukturze istniejących miast oraz tworzenie nowych jednostek z zastosowaniem wytycznych optymalizacyjnych.

Budowanie odporności ekosystemów na symulowane zmiany klimatu może zostać zrealizowane poprzez holistyczne planowanie rozwoju BGI w miastach. Na tym polu odnotowuje się powolne postępy w polskim prawie, które jednak w zbyt małym stopniu przekładają się na praktyki planistyczne. Liczba aspektów prawnych, koniecznych do uwzględnienia w procesie projektowym, opóźnia przełożenie branżowej wiedzy naukowej na działania umożliwiające ochronę jakości ekosystemów miejskich i przejście miast na gospodarkę regeneratywną.

Pojęcia „BGI” oraz „usług ekosystemów” wymagają dokładnego zdefiniowania w polskich aktach legislacyjnych dotyczących planowania przestrzennego. Brak takich definicji stanowi barierę dla transferu opracowanych rozwiązań na pole planowania miast ze względu na brak instrumentów prawnych określających wymogi stawiane inwestorom i samorządom w zakresie sterowania mikroklimatem. Powoduje to, że polski system planistyczny nie przystaje do światowych trendów. Poprawy tego stanu można obecnie dopatrywać się wyłącznie w prognozowanych unijnych regulacjach prawnych dotyczących kompensacji bioróżnorodności (Internet 6).

### **6.1. Wytyczne do optymalizacji środowiska termicznego ekosystemu miejskiego**

W załącznikach (zał. 3-5) przedstawiono matryce parametrów dla modelu środowiska termicznego ekosystemu miejskiego oraz wytyczne i warunki do ich optymalizacji. Optymalizacja środowiska termicznego miejskich ekosystemów musi opierać się na założeniach minimalizacji zagęszczenia miast oraz, popartej analizami, modyfikacji relacji przestrzennych pomiędzy zabudową, terenami zieleni i lokalnymi wzorcami pogodowymi. Głównym założeniem optymalizacyjnym jest dostosowanie ilości promieniowania przychodzącego do potrzeb termicznych budownictwa, właściwych dla typu klimatu, w

którym znajduje się miasto. Bilansując ilość promieniowania w strukturze miasta konieczne jest ponadto uwzględnienie komfortu termicznego pieszych, długości wegetacji w danej szerokości geograficznej oraz szerokiej gamy modyfikatorów *in-situ* i *ex-situ*.

Ponadto:

- należy unikać miast zwartych, o wysokiej złożoności przestrzennej;
- modyfikacje gęstości zabudowy powinny być uwarunkowane możliwością wprowadzenia terenów zieleni wysokiej i uzależnione od amplitudy temperatur panujących w danej przestrzeni;
- wyższe wskaźniki komfortu termicznego pieszych można uzyskać w cieplejszych wariantach klimatu umiarkowanego, zwiększając gęstość zabudowy;
- zwiększenie gęstości dróg zbiorczych o przyspieszonym ruchu jest możliwe, jednak należy je cieniować drzewami;
- wysokość budynków powinna być ograniczona i zróżnicowana, zapewniając jak najmniejszą powierzchnię ścian o wysokiej ekspozycji słonecznej;
- należy tworzyć korytarze wiatrowe, obniżając zabudowę w celu kierowania przepływu powietrza – zwłaszcza na obrzeżu osiedli. Podobna zasada ma zastosowanie w odniesieniu do transferu chłodnych mas powietrza z terenów zieleni i obiektów wodnych zlokalizowanych wewnątrz jednostek;
- nieznaczny wzrost wysokości budynków może postępować w miarę zbliżania się do centrum jednostki, jednak najwyższe budynki nie mogą przewyższać drzew znajdujących się w ich otoczeniu;
- konfiguracje bloków powinny być niejednorodne, uwzględniając układy zamknięte o umiarkowanej wysokości oraz bloki wolnostojące;
- stosując równoległe układy zabudowy należy osiągnąć rozsądny kompromis między orientacją w stosunku do dominujących kierunków wiatrów a ekspozycją słoneczną;
- jednostki sąsiedzkie powinny tworzyć zdecentralizowane układy, wplatające w swoją strukturę lasy, parki, jeziora i rzeki;
- wymagane jest zmniejszenie powierzchni terenów komercyjnych i przemysłowych oraz ograniczenie złożoności infrastruktury drogowej na korzyść nieintensywnej zabudowy mieszkaniowej o mozaikowym układzie;
- powierzchnia terenów biologicznie czynnych powinna być maksymalizowana poprzez zagnieżdżanie budynków w terenach zieleni;

- poza tworzeniem nowych terenów zieleni i obiektów wodnych sugeruje się rozbudowę istniejących założeń i dekanalizację cieków wodnych ukrytych pod powierzchnią miasta;
- tereny zieleni i obiekty wodne powinny łączyć się w megastruktury, zachowując wewnętrzną zwartość formy, a w przypadku zieleni – pełen układ warstwowy. W miastach o wysokiej gęstości, przy braku innych możliwości, mogą one zyskać formy nieregularne, lecz powinny wypełniać każdą przestrzeń wolną od zabudowy;
- wszystkie przestrzenie o wysokiej ekspozycji powinny być zazielenione – preferowane jest stosowanie w tym wypadku drzew. Kiedy nie jest to możliwe można zastępczo zastosować zielenią związaną z budynkami – zlokalizowaną na ich fasadach i dachach.

## **6.2. Ograniczenia w optymalizacji środowiska termicznego ekosystemu miejskiego**

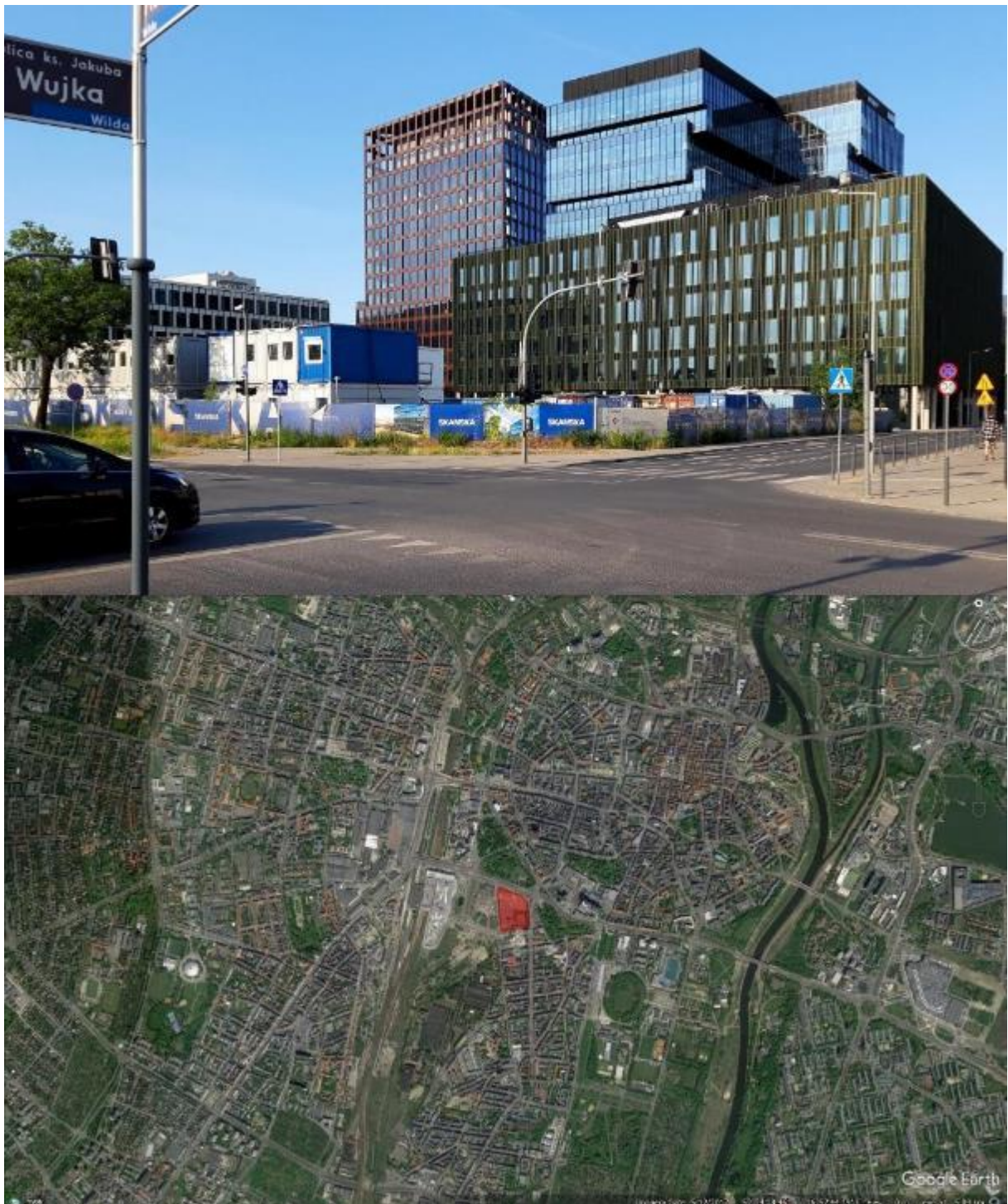
W załączniku (zał. 6) przedstawiono ograniczenia optymalizacyjne wynikające ze studiów nad polskimi aktami prawnymi. W polskiej legislacji brakuje zbioru precyzyjnych wytycznych co do ograniczeń, z jakimi należy się liczyć w tworzeniu błękitno-zielonej infrastruktury. Szczątkowe informacje zawarte są w wielu aktach prawnych związanych z ochroną środowiska, planowaniem przestrzennym, budownictwem lub ochroną zabytków. Głównym powodem tych utrudnień jest brak polskich regulacji prawnych dotyczących BGI, jej komponentów oraz usług, jakie ma zapewniać. Nieprecyzyjną definicję BGI można znaleźć w Uchwale nr 213 Rady Ministrów z 6 listopada 2015 w sprawie zatwierdzenia „Programu ochrony i zrównoważonego użytkowania różnorodności biologicznej wraz z Planem działań na lata 2015-2020” (Uchwała 1, 2015), gdzie BGI sprowadza się do pełnienia roli korytarzy ekologicznych w terenach pozamiejskich.

W obecnym stanie prawnym miejscowy plan zagospodarowania przestrzennego (MPZP) stanowi jedyne narzędzie ochrony i kreowania błękitno-zielonej infrastruktury w Polsce. W dalszym ciągu rzadkością w skali kraju jest objęcie całego miasta planem przestrzennym (dane NIK za 2020). Dla przykładu – pokrycie Poznania miejscowym planem w roku 2020 wynosiło 48,1% (dane NIK za 2020). Wynika to z nieobligatoryjnego stosowania tego dokumentu w stosunku do całkowitej powierzchni gminy. Wyłączając z wyliczenia przypadki ustalenia planu, znakomita część obszarów mogących stanowić strategiczną



infrastrukturę miasta zostaje wyłączona z ochrony w planowaniu przestrzennym (Ustawa 1, 2003).

Z powodu braku ustalonego MPZP dla danego obszaru wydaje się decyzje administracyjne o warunkach zabudowy (WZ). W przypadku dużej presji inwestycyjnej decyzje te mogą stanowić główną przyczynę ograniczenia przestrzeni pod BGI. Powodem jest częste pomijanie aspektów środowiskowych w WZ. W wielu przypadkach ta luka prawna może powodować zabudowę obszarów krytycznych pod względem usług ekosystemów, nie ustalając nawet podstawowego wskaźnika urbanistycznego – zachowania minimalnej powierzchni biologicznie czynnej. Takie sytuacje mają miejsce w Poznaniu od wielu lat, powodując zaburzenia mikroklimatyczne w strukturze miasta (ryc. 46). Przywołany wcześniej przykład wskazuje, jak istotne jest holistyczne planowanie BGI w miastach, które powinno bazować na prawodawstwie ogólnopolskim.



**Ryc. 46.** Kontrowersyjny pod względem wpływu na mikroklimat centrum miasta projekt parku biurowo-mieszkaniowego „Nowy Rynek”. Nieujęty w MPZP teren po zlikwidowanym dworcu PKS (kolor czerwony na mapie) został zagospodarowany intensywną zabudową na podstawie decyzji WZ z roku 2013. Obszar ten ma kluczowe znaczenie dla błękitno-zielonej infrastruktury miasta, znajdując się w pierścieniu parków otaczających jego centrum (źródło: a. Patryk Antoszewski, b. (Internet 7))

## **Część III**

Optymalizacja

Fragment rozprawy zastrzeżony

## 10. Podsumowanie

Przeprowadzenie badań nad obiektami ekosystemu miejskiego (UE), które mogą modyfikować intensywność efektu UHI, pozwoliło udowodnić hipotezę badawczą nr 1. Na podstawie przeglądu literatury i analiz statystycznych potwierdzono, że – poprzez zmiany wartości parametrów geometrycznych, morfologicznych i topograficznych obiektów zlokalizowanych w mieście – możliwa jest modyfikacja jego środowiska termicznego.

Analizując parametry obiektów UE oraz zapisy polskiego prawa udało się udowodnić hipotezę badawczą nr 2. Zgodnie z jej założeniami możliwe jest zbudowanie precyzyjnego cyfrowego modelu środowiska termicznego miasta, bazującego na danych parametrycznych obiektów. Na podstawie badań wstępnych i analiz stworzono architekturę logiczną modelu oraz przedstawiono uproszczone wzory matematyczne. Ponadto wyznaczono wytyczne do optymalizacji termicznej ekosystemu miejskiego oraz określono bariery i ograniczenia dotyczące procesu optymalizacji w Polsce.

Potwierdzenie hipotez nr 1 i 2 umożliwiło stworzenie koncepcji systemu informatycznego, bazującego na potwierdzonej teorii – a przez to osiągnięcie głównego celu pracy. Hipotezę nr 3 udowodniono przedstawiając w pracy schemat blokowy algorytmu „PHYSIS” oraz projekt, opartego na nim, systemu informatycznego. Dokumentacja projektowa wskazuje na możliwość stworzenia oprogramowania o wysokim stopniu automatyzacji i odwzorowania rzeczywistości, które będzie optymalizować środowisko termiczne obszarów zurbanizowanych, wykorzystując układy złożone z obiektów BGI.

Na podstawie przeprowadzonych badań można wyciągnąć następujące wnioski:

- a) niwelacja efektu UHI jest możliwa z poziomu planowania przestrzennego, co sugeruje konieczność zmiany podejścia do planowania ekosystemów miejskich;
- b) BGI – jako najlepszy sposób mitygacji efektu UHI – powinna zostać włączona do planowania przestrzennego w Polsce i na świecie;
- c) zwiększenie powierzchni BS i GS w ekosystemach miejskich jest wymagane, aby poprawić komfort termiczny mieszkańców miast;
- d) dostosowanie układów urbanistycznych do lokalnej odmiany klimatu powinno stanowić jeden z podstawowych wyznaczników dla planowania przestrzennego;
- e) prawidłowe zbilansowanie ilości promieniowania przychodzącego i wychodzącego jest możliwe poprzez modyfikację parametrów geometrycznych, morfologicznych i topograficznych obiektów znajdujących się w lokalnym ekosystemie;

- f) wszystkie działania optymalizacyjne w tkance miejskiej należy oprzeć o precyzyjny dobór wartości poszczególnych parametrów dla BE i BGI;
- g) możliwe jest stworzenie systemu informatycznego, automatycznie optymalizującego środowisko termiczne ekosystemów miejskich;
- h) wykorzystanie możliwości systemu „PHYSIS” pozwoli na przeniesienie wytycznych dotyczących optymalizacji środowiska termicznego miasta na pole planowania przestrzennego;
- i) automatyzacja procesu optymalizacji termicznej przy użyciu „PHYSIS” pozwoli na wykluczenie obiektywnej roli projektanta oraz stworzy najlepiej dopasowany projekt mitygacji efektu UHI opartego na wielu możliwych rozwiązaniach;
- j) zwiększenie dostępu do „PHYSIS” dla grup docelowych, nieposiadających specjalistycznej wiedzy, może wpłynąć na wielotorową poprawę komfortu termicznego mieszkańców miast;
- k) wysoki potencjał wdrożeniowy systemu informatycznego „PHYSIS” powoduje, że może on stać się pierwszym na świecie systemem sterowania mikroklimatem miasta.

## Bibliografia

- Abis, K. L., & Mara, D. (2006). Temperature measurement and stratification in facultative waste stabilisation ponds in the UK climate. *Environmental Monitoring and Assessment*, *114*(1–3), 35–47. <https://doi.org/10.1007/s10661-006-1076-7>
- Abreu-Harbich, L. V., Labaki, L. C., & Matzarakis, A. (2014). Thermal bioclimate in idealized urban street canyons in Campinas, Brazil. *Theoretical and Applied Climatology*, *115*(1), 333–340. <https://doi.org/10.1007/s00704-013-0886-0>
- Achour-Younsi, S., & Kharrat, F. (2016). Outdoor Thermal Comfort: Impact of the Geometry of an Urban Street Canyon in a Mediterranean Subtropical Climate – Case Study Tunis, Tunisia. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, *216*, 689–700. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2015.12.062>
- Agarwal, M., & Tandon, A. (2010). Modeling of the urban heat island in the form of mesoscale wind and of its effect on air pollution dispersal. *Applied Mathematical Modelling*, *34*(9), 2520–2530. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2009.11.016>
- Akbari, H., & Taha, H. (1992). The impact of trees and white surfaces on residential heating and cooling energy use in four Canadian cities. *Energy*, *17*(2), 141–149. [https://doi.org/10.1016/0360-5442\(92\)90063-6](https://doi.org/10.1016/0360-5442(92)90063-6)
- Akbari, H., Cartalis, C., Kolokotsa, D., Muscio, A., Pisello, A. L., Rossi, F., Santamouris, M., Synnefa, A., Wong, N. H., & Zinzi, M. (2016). Local climate change and urban heat island mitigation techniques—The state of the art. *Journal of Civil Engineering and Management*, *22*(1), 1–16. Scopus. <https://doi.org/10.3846/13923730.2015.1111934>
- Alexander, C. (2021). Influence of the proportion, height and proximity of vegetation and buildings on urban land surface temperature. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, *95*, 102265. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2020.102265>

- Ali-Toudert, F. (2021). Exploration of the thermal behaviour and energy balance of urban canyons in relation to their geometrical and constructive properties. *Building and Environment*, 188, 107466. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107466>
- An, N., Hemmati, S., & Cui, Y. (2017). Assessment of the methods for determining net radiation on different time-scales of meteorological variables. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 9. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2016.10.004>
- Andreou, E. (2013). Thermal comfort in outdoor spaces and urban canyon microclimate. *Renewable Energy*, 55, 182–188. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2012.12.040>
- Andreou, E. (2014). The effect of urban layout, street geometry and orientation on shading conditions in urban canyons in the Mediterranean. *Renewable Energy*, 63, 587–596. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2013.09.051>
- Andreou, E., & Axarli, K. (2012). Investigation of urban canyon microclimate in traditional and contemporary environment. Experimental investigation and parametric analysis. *Renewable Energy*, 43, 354–363. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.11.038>
- Antoszewski, P., Krzyżaniak, M., & Świerk, D. (2022). The Future of Climate-Resilient and Climate-Neutral City in the Temperate Climate Zone. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(7), Article 7. <https://doi.org/10.3390/ijerph19074365>
- Antoszewski, P., Świerk, D., & Krzyżaniak, M. (2020). Statistical Review of Quality Parameters of Blue-Green Infrastructure Elements Important in Mitigating the Effect of the Urban Heat Island in the Temperate Climate (C) Zone. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(19), Article 19. <https://doi.org/10.3390/ijerph17197093>
- Arnfield, A. J. (2003). Two decades of urban climate research: A review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island. *International Journal of Climatology*, 23(1), 1–26. <https://doi.org/10.1002/joc.859>



- Asmaa Barakat, Hany Ayad, & Zeyad El-Sayed. (2017). Urban design in favor of human thermal comfort for hot arid climate using advanced simulation methods. *Alexandria Engineering Journal*, 56(4), 533–543. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2017.04.008>
- Azeñas, V., Cuxart, J., Picos, R., Medrano, H., Simó, G., López-Grifol, A., & Gulías, J. (2018). Thermal regulation capacity of a green roof system in the mediterranean region: The effects of vegetation and irrigation level. *Energy and Buildings*, 164, 226–238. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.01.010>
- Azhdari, A., Soltani, A., & Alidadi, M. (2018). Urban morphology and landscape structure effect on land surface temperature: Evidence from Shiraz, a semi-arid city. *Sustainable Cities and Society*, 41, 853–864. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.06.034>
- Balamurugan, R., Natarajan, A. M., & Premalatha, K. (2015). Stellar-Mass Black Hole Optimization for Biclustering Microarray Gene Expression Data. *Applied Artificial Intelligence*, 29(4), 353–381. <https://doi.org/10.1080/08839514.2015.1016391>
- Barakat, A., Ayad, H., & El-Sayed, Z. (2017). Urban design in favor of human thermal comfort for hot arid climate using advanced simulation methods. *Alexandria Engineering Journal*, 56(4), 533–543. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2017.04.008>
- Battista, G., de Lieto Vollaro, E., Grignaffini, S., Ocloń, P., & Vallati, A. (2021). Experimental investigation about the adoption of high reflectance materials on the envelope cladding on a scaled street canyon. *Energy*, 230, 120801. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120801>
- Bechtel, B., Alexander, P. J., Böhner, J., Ching, J., Conrad, O., Feddema, J., Mills, G., See, L., & Stewart, I. (2015). Mapping local climate zones for a worldwide database of the form and function of cities. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 4(1), Article 1.
- Beheshti, Z., Shamsuddin, S. M., & Yuhaniz, S. S. (2013). Binary accelerated particle swarm algorithm (BAPSA) for discrete optimization problems. *Journal of Global optimization*, 57, 549–573.

- Bennet, M., & Ewenz, C. (2013). Increased Urban Heat Island Effect due to Building Height Increase. *20th International Congress on Modelling and Simulation, Adelaide, Australia, 1–6 December 2013*.
- Bentley, C. (2012). *Prince2: A practical handbook*. Routledge.
- Berger, C., Rosentreter, J., Voltersen, M., Baumgart, C., Schullius, C., & Hese, S. (2017). Spatio-temporal analysis of the relationship between 2D/3D urban site characteristics and land surface temperature. *Remote Sensing of Environment, 193*, 225–243. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.02.020>
- Bianchi, L., Dorigo, M., Gambardella, L. M., & Gutjahr, W. J. (2009). A survey on metaheuristics for stochastic combinatorial optimization. *Natural Computing, 8*(2), 239–287. <https://doi.org/10.1007/s11047-008-9098-4>
- Blanusa, T., Vaz Monteiro, M. M., Fantozzi, F., Vysini, E., Li, Y., & Cameron, R. W. F. (2013). Alternatives to Sedum on green roofs: Can broad leaf perennial plants offer better ‘cooling service’? *Building and Environment, 59*, 99–106. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.08.011>
- Blum, C., & Roli, A. (2003). Metaheuristics in combinatorial optimization: Overview and conceptual comparison. *ACM Computing Surveys, 35*(3), 268–308. <https://doi.org/10.1145/937503.937505>
- Błażejczyk, A., & Baranowski, J. (2022). Wpływ zmian klimatu na zmiany zachorowań i zgonów na choroby klimatozależne w Polsce w XXI wieku. *Kosmos, 70*(4), Article 4. [https://doi.org/10.36921/kos.2022\\_2839](https://doi.org/10.36921/kos.2022_2839)
- Boccalatte, A., Fossa, M., Gaillard, L., & Menezo, C. (2020). Microclimate and urban morphology effects on building energy demand in different European cities. *Energy and Buildings, 224*, 110129. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110129>
- Bokaie, M., Zarkesh, M. K., Arasteh, P. D., & Hosseini, A. (2016). Assessment of Urban Heat Island based on the relationship between land surface temperature and Land Use/ Land Cover in Tehran. *Sustainable Cities and Society, 23*, 94–104. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2016.03.009>

- Bonafoni, S., Baldinelli, G., Rotili, A., & Verducci, P. (2017). Albedo and surface temperature relation in urban areas: Analysis with different sensors. *2017 Joint Urban Remote Sensing Event (JURSE)*, 1–4. <https://doi.org/10.1109/JURSE.2017.7924612>
- Bonan, G. B. (1997). Effects of land use on the climate of the United States. *Climatic Change*, *37*(3), 449–486. Scopus. <https://doi.org/10.1023/A:1005305708775>
- Bourbia, F., Boucheriba, F., & Tebbani, H. (2005). *Street design and outdoor comfort for semi arid climate*.
- Bowler, D. E., Buyung-Ali, L., Knight, T. M., & Pullin, A. S. (2010). Urban greening to cool towns and cities: A systematic review of the empirical evidence. *Landscape and Urban Planning*, *97*(3), 147–155. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2010.05.006>
- Boyko, C. T., & Cooper, R. (2011). Clarifying and re-conceptualising density. *Progress in Planning*, *76*(1), 1–61. <https://doi.org/10.1016/j.progress.2011.07.001>
- Broadbent, A. M., Coutts, A. M., Tapper, N. J., & Demuzere, M. (2018). The cooling effect of irrigation on urban microclimate during heatwave conditions. *Urban Climate*, *23*, 309–329. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2017.05.002>
- Bruse, M. (2004). ENVI-met 3.0: Updated model overview. *University of Bochum*. Retrieved from: [www.envi-met.com](http://www.envi-met.com).
- Cai, Z., Han, G., & Chen, M. (2018). Do water bodies play an important role in the relationship between urban form and land surface temperature? *Sustainable Cities and Society*, *39*, 487–498. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.02.033>
- Carrasco, C., & Palme, M. (2020). Urban Form and Urban Materials as Controller of Urban Climate in Valparaiso, Chile. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, *503*, 012049. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/503/1/012049>
- Cartwright, J. (2019). Ecological islands: Conserving biodiversity hotspots in a changing climate. *Frontiers in Ecology and the Environment*, *17*(6), 331–340. <https://doi.org/10.1002/fee.2058>
- Chang, C.-R., & Li, M.-H. (2014). Effects of urban parks on the local urban thermal environment. *Urban Forestry & Urban Greening*, *13*(4), 672–681. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2014.08.001>

- Chatzidimitriou, A., & Axarli, K. (2017). Street Canyon Geometry Effects on Microclimate and Comfort; A Case Study in Thessaloniki. *Procedia Environmental Sciences*, 38, 643–650. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2017.03.144>
- Chatzidimitriou, A., & Yannas, S. (2016). Microclimate design for open spaces: Ranking urban design effects on pedestrian thermal comfort in summer. *Sustainable Cities and Society*, 26, 27–47. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2016.05.004>
- Chatzipoulka, C., Compagnon, R., & Nikolopoulou, M. (2016). Urban geometry and solar availability on façades and ground of real urban forms: Using London as a case study. *Solar Energy*, 138, 53–66. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.09.005>
- Chatzipoulka, C., Nikolopoulou, M., & Watkins, R. (2015). The impact of urban geometry on the radiant environment in outdoor spaces. *9th International Conference on Urban Climate*. ICUC9 9th International Conference on Urban Climate, Toulouse. <http://www.meteo.fr/icuc9/>
- Chen, G., Charlie Lam, C. K., Wang, K., Wang, B., Hang, J., Wang, Q., & Wang, X. (2021). Effects of urban geometry on thermal environment in 2D street canyons: A scaled experimental study. *Building and Environment*, 198, 107916. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.107916>
- Chen, G., Wang, D., Wang, Q., Li, Y., Wang, X., Hang, J., Gao, P., Ou, C., & Wang, K. (2020). Scaled outdoor experimental studies of urban thermal environment in street canyon models with various aspect ratios and thermal storage. *Science of The Total Environment*, 726, 138147. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138147>
- Chen, L., & Mak, C. M. (2021). Integrated impacts of building height and upstream building on pedestrian comfort around ideal lift-up buildings in a weak wind environment. *Building and Environment*, 200, 107963. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.107963>
- Chen, L., Ng, E., An, X., Ren, C., Lee, M., Wang, U., & He, Z. (2012). Sky view factor analysis of street canyons and its implications for daytime intra-urban air temperature differentials in high-rise, high-density urban areas of Hong Kong: A GIS-based

simulation approach. *International Journal of Climatology*, 32(1), 121–136.  
<https://doi.org/10.1002/joc.2243>

Chen, S., Lang, W., Li, X., Shen, C., & Fan, Q. (2018). Determining the Influence of Building Density on Heat Island Effect Using Baidu Map and Remote Sensing. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 84(9), 549–558. <https://doi.org/10.14358/PERS.84.9.549>

Chen, T., Yang, H., Chen, G., Lam, C. K. C., Hang, J., Wang, X., Liu, Y., & Ling, H. (2021). Integrated impacts of tree planting and aspect ratios on thermal environment in street canyons by scaled outdoor experiments. *Science of The Total Environment*, 764, 142920. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142920>

Chen, X., Li, L., & Wang, J. (2015). Heat island effect mitigation by urban green space system: A case study of Taizhou city. *Ecology and Environmental Sciences*, 24(4), 643–649. Scopus.

Cheng, C. Y., Cheung, K. K. S., & Chu, L. M. (2010). Thermal performance of a vegetated cladding system on facade walls. *Building and Environment*, 45(8), 1779–1787. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.02.005>

Cheung, P. K., & Jim, C. Y. (2019). Effects of urban and landscape elements on air temperature in a high-density subtropical city. *Building and Environment*, 164, 106362. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106362>

Choi, H.-A., Lee, W.-K., & Byun, W.-H. (2012). Determining the effect of green spaces on Urban heat distribution using satellite imagery. *Asian Journal of Atmospheric Environment*, 6(2), 127–135. Scopus. <https://doi.org/10.5572/ajae.2012.6.2.127>

Choi, Y., Lee, S., & Moon, H. (2018). Urban Physical Environments and the Duration of High Air Temperature: Focusing on Solar Radiation Trapping Effects. *Sustainability*, 10(12), Article 12. <https://doi.org/10.3390/su10124837>

Chokhachian, A., Perini, K., Giulini, S., & Auer, T. (2020). Urban performance and density: Generative study on interdependencies of urban form and environmental measures. *Sustainable Cities and Society*, 53, 101952. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101952>

- Chudnovsky, A., Ben-Dor, E., & Saaroni, H. (2004). Diurnal thermal behavior of selected urban objects using remote sensing measurements. *Energy and Buildings*, *36*(11), 1063–1074. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2004.01.052>
- Chun, B., & Guldmann, J.-M. (2014). Spatial statistical analysis and simulation of the urban heat island in high-density central cities. *Landscape and Urban Planning*, *125*, 76–88. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2014.01.016>
- Cibangu, S. K. (2010). Paradigms, methodologies, and methods. *Library & Information Science Research*, *32*(3), 177–178. <https://doi.org/10.1016/j.lisr.2010.03.006>
- Cohen, P., Potchter, O., & Matzarakis, A. (2012). Daily and seasonal climatic conditions of green urban open spaces in the Mediterranean climate and their impact on human comfort. *Building and Environment*, *51*, 285–295. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.11.020>
- Cole, R. J. (2012). Regenerative design and development: Current theory and practice. *Building Research & Information*, *40*(1), 1–6. <https://doi.org/10.1080/09613218.2012.617516>
- Coseo, P., & Larsen, L. (2014). How factors of land use/land cover, building configuration, and adjacent heat sources and sinks explain Urban Heat Islands in Chicago. *Landscape Planning*, *125*, 117–129. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2014.02.019>
- Coutts, A. M., Beringer, J., & Tapper, N. J. (2007). Impact of increasing urban density on local climate: Spatial and temporal variations in the surface energy balance in Melbourne, Australia. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, *46*(4), 477–493. Scopus. <https://doi.org/10.1175/JAM2462.1>
- Coutts, A. M., White, E. C., Tapper, N. J., Beringer, J., & Livesley, S. J. (2016). Temperature and human thermal comfort effects of street trees across three contrasting street canyon environments. *Theoretical and Applied Climatology*, *124*(1), 55–68. <https://doi.org/10.1007/s00704-015-1409-y>
- Creswell, J. W. (2012). *Educational research: Planning, conducting, and evaluating quantitative and qualitative research*. Pearson Education, Inc.

- Cuce, E. (2017). Thermal regulation impact of green walls: An experimental and numerical investigation. *Applied Energy*, *194*, 247–254. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.09.079>
- D’Orazio, M., Di Perna, C., & Di Giuseppe, E. (2012). Green roof yearly performance: A case study in a highly insulated building under temperate climate. *Energy and Buildings*, *55*, 439–451. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.09.009>
- Dahanayake, K. C., Chow, C. L., & Long Hou, G. (2017). Selection of suitable plant species for energy efficient Vertical Greenery Systems (VGS). *Energy Procedia*, *142*, 2473–2478. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.12.185>
- Dan, D., Tanasa, C., Stoian, V., Brata, S., Stoian, D., Gyorgy, T. N., & Florut, S. (2016). Passive house design—An efficient solution for residential buildings in Romania. *Energy for Sustainable Development*, *32*, 99–109.
- Dang, T. N., Van, D. Q., Kusaka, H., Seposo, X. T., & Honda, Y. (2018). Green space and deaths attributable to the urban heat island effect in Ho Chi Minh City. *American journal of public health*, *108*(S2), S137–S143.
- Delpak, N., Sajadzadeh, H., Hasanpourfard, S., & Aram, F. (2021). *The Effect of Street Orientation on Outdoor Thermal Comfort in a Cold Mountainous Climate*. <https://doi.org/10.20944/preprints202105.0654.v1>
- Dimoudi, A., & Nikolopoulou, M. (2003). Vegetation in the urban environment: Microclimatic analysis and benefits. *Energy and Buildings*, *35*(1), 69–76. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(02\)00081-6](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(02)00081-6)
- Dimoudi, A., Kantzioura, A., Zoras, S., Pallas, C., & Kosmopoulos, P. (2013). Investigation of urban microclimate parameters in an urban center. *Energy and Buildings*, *64*, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.04.014>
- Ding, L., Petersen, H., & Craft, W. (2019). *Microclimate and urban heat island mitigation decision-support tool (project short report)*.
- Dirksen, M., Ronda, R. J., Theeuwes, N. E., & Pagani, G. A. (2019). Sky view factor calculations and its application in urban heat island studies. *Urban Climate*, *30*, 100498. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2019.100498>

- Dixon, P. G., & Mote, T. (2003). Patterns And Causes Of Atlanta's Urban Heat Island Initiated Precipitation. *Journal of Applied Meteorology - J Appl Meteorol*, 42, 1273–1284. <https://doi.org/10.1175/1520-0450>
- Dobrovolný, P., & Krahula, L. (2015). The spatial variability of air temperature and nocturnal urban heat island intensity in the city of Brno, Czech Republic. *Moravian Geographical Reports*, 23(3), 8–16. <https://doi.org/10.1515/mgr-2015-0013>
- Dong, J., Lin, M., Zuo, J., Lin, T., Liu, J., Sun, C., & Luo, J. (2020). Quantitative study on the cooling effect of green roofs in a high-density urban Area—A case study of Xiamen, China. *Journal of Cleaner Production*, 255, 120152. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120152>
- Du, H., Song, X., Jiang, H., Kan, Z., Wang, Z., & Cai, Y. (2016). Research on the cooling island effects of water body: A case study of Shanghai, China. *Ecological Indicators*, 67, 31–38. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.02.040>
- Duan, S., Luo, Z., Yang, X., & Li, Y. (2019). The impact of building operations on urban heat/cool islands under urban densification: A comparison between naturally-ventilated and air-conditioned buildings. *Applied Energy*, 235, 129–138. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.10.108>
- Duarte, D. H. S., Shinzato, P., Gusson, C. dos S., & Alves, C. A. (2015). The impact of vegetation on urban microclimate to counterbalance built density in a subtropical changing climate. *Urban Climate*, 14, 224–239. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2015.09.006>
- Duncan, J. M. A., Boruff, B., Saunders, A., Sun, Q., Hurley, J., & Amati, M. (2019). Turning down the heat: An enhanced understanding of the relationship between urban vegetation and surface temperature at the city scale. *Science of The Total Environment*, 656, 118–128. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.223>
- Easterling, D., Horton, B., Jones, P., Peterson, T., Karl, T. R., Parker, D., Salinger, M., Razuvayev, V., Plummer, N., Jamason, P., & Folland, C. (1997). Maximum and Minimum Temperature Trends for the Globe. *Science*, 277, 364–367. <https://doi.org/10.1126/science.277.5324.364>



- Edmondson, J. L., Davies, Z. G., McHugh, N., Gaston, K. J., & Leake, J. R. (2012). Organic carbon hidden in urban ecosystems. *Scientific Reports*, 2, 963–963. PubMed. <https://doi.org/10.1038/srep00963>
- Elnahas, M. M. (2003). The Effects of Urban Configuration on Urban Air Temperatures. *Architectural Science Review*, 46(2), 135–138. <https://doi.org/10.1080/00038628.2003.9696975>
- Equere, V., Mirzaei, P. A., & Riffat, S. (2020). Definition of a new morphological parameter to improve prediction of urban heat island. *Sustainable Cities and Society*, 56, 102021. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102021>
- Erdem Okumus, D., & Terzi, F. (2021). Evaluating the role of urban fabric on surface urban heat island: The case of Istanbul. *Sustainable Cities and Society*, 73, 103128. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103128>
- Erdem, U., Cubukcu, K. M., & Sharifi, A. (2021). An analysis of urban form factors driving Urban Heat Island: The case of Izmir. *Environment, Development and Sustainability*, 23(5), 7835–7859. <https://doi.org/10.1007/s10668-020-00950-4>
- Erell, E., Pearlmutter, D., Boneh, D., & Kutiel, P. B. (2014). Effect of high-albedo materials on pedestrian heat stress in urban street canyons. *Urban Climate*, 10, 367–386. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2013.10.005>
- Eriksson, H.-E., Penker, M., Lyons, B., & Fado, D. (2003). *UML 2 Toolkit*. John Wiley & Sons.
- Esch, T., Brzoska, E., Dech, S., Leutner, B., Palacios-Lopez, D., Metz-Marconcini, A., Marconcini, M., Roth, A., & Zeidler, J. (2022). World Settlement Footprint 3D - A first three-dimensional survey of the global building stock. *Remote Sensing of Environment*, 270, 112877. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112877>
- Fahed, J., Kinab, E., Ginestet, S., & Adolphe, L. (2020). Impact of urban heat island mitigation measures on microclimate and pedestrian comfort in a dense urban district of Lebanon. *Sustainable Cities and Society*, 61, 102375. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102375>

- Feng, D., & Gong, C. (2012). Sensitivity Analysis and Determination of the Effects of Asphalt Pavement Thermophysical Properties on the Temperature Field. *Journal of Highway and Transportation Research and Development (English Edition)*, 6(4), 1–10. <https://doi.org/10.1061/JHTRCQ.0000001>
- Feng, X., & Shi, H. (2012). Research on the cooling effect of Xi'an parks in summer based on remote sensing. *Shengtai Xuebao/ Acta Ecologica Sinica*, 32(23), 7355–7363. Scopus. <https://doi.org/10.5846/stxb201112261976>
- Feyisa, G. L., Dons, K., & Meilby, H. (2014). Efficiency of parks in mitigating urban heat island effect: An example from Addis Ababa. *Landscape and Urban Planning*, 123, 87–95. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2013.12.008>
- Fikfak, A., Kosanović, S., Konjar, M., Grom, J. P., & Zbašnik-Senegačnik, M. (2017). The Impact of Morphological Features on Summer Temperature Variations on the Example of Two Residential Neighborhoods in Ljubljana, Slovenia. *Sustainability*, 9(1), Article 1. <https://doi.org/10.3390/su9010122>
- Gabriel, K. M. A., & Endlicher, W. R. (2011). Urban and rural mortality rates during heat waves in Berlin and Brandenburg, Germany. *Environmental Pollution (Barking, Essex: 1987)*, 159(8–9), 2044–2050. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2011.01.016>
- Gaffin, S. R., Imhoff, M., Rosenzweig, C., Khanbilvardi, R., Pasqualini, A., Kong, A. Y. Y., Grillo, D., Freed, A., Hillel, D., & Hartung, E. (2012). Bright is the new black—Multi-year performance of high-albedo roofs in an urban climate. *Environmental Research Letters*, 7(1), 014029. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/7/1/014029>
- Georgakis, Ch., & Santamouris, M. (2006). Experimental investigation of air flow and temperature distribution in deep urban canyons for natural ventilation purposes. *Energy and Buildings*, 38(4), 367–376. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2005.07.009>
- Georgakis, Ch., Zoras, S., & Santamouris, M. (2014). Studying the effect of “cool” coatings in street urban canyons and its potential as a heat island mitigation technique. *Sustainable Cities and Society*, 13, 20–31. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2014.04.002>

- Gerçek, D., Güven, İ. T., & Oktay, İ. Ç. (2016). Analysis of the intra-city variation of urban heat island and its relation to land surface/cover parameters. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 3, 123.
- Ghadban, M., Baayoun, A., Lakkis, I., Najem, S., Saliba, N. A., & Shihadeh, A. (2020). A novel method to improve temperature forecast in data-scarce urban environments with application to the Urban Heat Island in Beirut. *Urban Climate*, 33, 100648. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2020.100648>
- Ghofrani, F. Z., Sposito, R., & Victor, A. (2016). Infrastructure for development: Blue-green infrastructure. *Plann. News*, 42(7), 14–15. Scopus.
- Giannaros, C., Nenes, A., Giannaros, T. M., Kourtidis, K., & Melas, D. (2018). A comprehensive approach for the simulation of the Urban Heat Island effect with the WRF/SLUCM modeling system: The case of Athens (Greece). *Atmospheric Research*, 201, 86–101. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2017.10.015>
- Giannopoulou, K., Santamouris, M., Livada, I., Georgakis, C., & Caouris, Y. (2010). The Impact of Canyon Geometry on Intra Urban and Urban: Suburban Night Temperature Differences Under Warm Weather Conditions. *Pure and Applied Geophysics*, 167(11), Article 11. <https://doi.org/10.1007/s00024-010-0099-8>
- Giles-Corti, B., Broomhall, M. H., Knuiiman, M., Collins, C., Douglas, K., Ng, K., Lange, A., & Donovan, R. J. (2005). Increasing walking: How important is distance to, attractiveness, and size of public open space? *American Journal of Preventive Medicine*, 28(2 SUPPL. 2), 169–176. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.amepre.2004.10.018>
- Gill, S. E., Handley, J. F., Ennos, A. R., & Pauleit, S. (2007). Adapting cities for climate change: The role of the green infrastructure. *Built Environment*, 33(1), 115–133. Scopus. <https://doi.org/10.2148/benv.33.1.115>
- Gillner, S., Vogt, J., Tharang, A., Dettmann, S., & Roloff, A. (2015). Role of street trees in mitigating effects of heat and drought at highly sealed urban sites. *Landscape and Urban Planning*, 143, 33–42. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2015.06.005>

- Giridharan, R., Lau, S. S. Y., & Ganesan, S. (2005). Nocturnal heat island effect in urban residential developments of Hong Kong. *Energy and Buildings*, 37(9), 964–971. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2004.12.005>
- Giridharan, R., Lau, S. S. Y., Ganesan, S., & Givoni, B. (2007). Urban design factors influencing heat island intensity in high-rise high-density environments of Hong Kong. *Building and Environment*, 42(10), 3669–3684. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.09.011>
- Giridharan, R., Lau, S. S. Y., Ganesan, S., & Givoni, B. (2008). Lowering the outdoor temperature in high-rise high-density residential developments of coastal Hong Kong: The vegetation influence. *Building and Environment*, 43(10), 1583–1595. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2007.10.003>
- Glover, F. (1986). Future paths for integer programming and links to artificial intelligence. *Computers & operations research*, 13(5), 533–549.
- Gogna, A., & Tayal, A. (2013). Metaheuristics: Review and application. *Journal of Experimental & Theoretical Artificial Intelligence*, 25(4), 503–526. <https://doi.org/10.1080/0952813X.2013.782347>
- Gonzalez-Trevizo, M. E., Martinez-Torres, K. E., Armendariz-Lopez, J. F., Santamouris, M., Bojorquez-Morales, G., & Luna-Leon, A. (2021). Research trends on environmental, energy and vulnerability impacts of Urban Heat Islands: An overview. *Energy and Buildings*, 246, 111051. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111051>
- Grimmond, C. S. B., & Oke, T. R. (1991). An evapotranspiration-interception model for urban areas. *Water Resources Research*, 27(7), 1739–1755. <https://doi.org/10.1029/91WR00557>
- Gunawardena, K. R., Wells, M. J., & Kershaw, T. (2017). Utilising green and bluespace to mitigate urban heat island intensity. *Science of The Total Environment*, 584–585, 1040–1055. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.01.158>
- Guo, C., Buccolieri, R., & Gao, Z. (2019). Characterizing the morphology of real street models and modeling its effect on thermal environment. *Energy and Buildings*, 203, 109433. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109433>

- Guo, J., Han, G., Xie, Y., Cai, Z., & Zhao, Y. (2020). Exploring the relationships between urban spatial form factors and land surface temperature in mountainous area: A case study in Chongqing city, China. *Sustainable Cities and Society*, *61*, 102286. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102286>
- Ha, J., Lee, S., & Park, C. (2016). Temporal Effects of Environmental Characteristics on Urban Air Temperature: The Influence of the Sky View Factor. *Sustainability*, *8*(9), Article 9. <https://doi.org/10.3390/su8090895>
- Hamdi, R., & Schayes, G. (2008). Sensitivity study of the urban heat island intensity to urban characteristics. *International Journal of Climatology*, *28*(7), 973–982. <https://doi.org/10.1002/joc.1598>
- Han, H.-L., Jing, Y.-X., Yang, D.-J., Xiao, L., Li, G.-L., Zhan, C.-G., Wang, A.-L., & Sun, R.-Y. (2008). Microclimate regulation and airborne bacteria purification services of reservoir ecosystem: A case study of Meilin Reservoir and Xili Reservoir in Shenzhen. *Shengtai Xuebao/ Acta Ecologica Sinica*, *28*(8), 3553–3562. Scopus.
- Hathway, E. A., & Sharples, S. (2012). The interaction of rivers and urban form in mitigating the Urban Heat Island effect: A UK case study. *Building and Environment*, *58*, 14–22. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.06.013>
- He, X., Gao, W., & Wang, R. (2021). Impact of urban morphology on the microclimate around elementary schools: A case study from Japan. *Building and Environment*, 108383. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108383>
- He, Y., Yu, H., Ozaki, A., Dong, N., & Zheng, S. (2017a). An investigation on the thermal and energy performance of living wall system in Shanghai area. *Energy and Buildings*, *140*, 324–335. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.12.083>
- He, Y., Yu, H., Ozaki, A., Dong, N., & Zheng, S. (2017b). Influence of plant and soil layer on energy balance and thermal performance of green roof system. *Energy*, *141*, 1285–1299. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.08.064>
- Hendel, M., Parison, S., Grados, A., & Royon, L. (2018). Which pavement structures are best suited to limiting the UHI effect? A laboratory-scale study of Parisian pavement structures. *Building and Environment*, *144*, 216–229. <https://doi.org/10.1016/j>

buildenv.2018.08.027

- Henits, L., Mucsi, L., & Liska, C. M. (2017). Monitoring the changes in impervious surface ratio and urban heat island intensity between 1987 and 2011 in Szeged, Hungary. *Environmental Monitoring and Assessment*, *189*(2), 86. <https://doi.org/10.1007/s10661-017-5779-8>
- Herrmann, J., & Matzarakis, A. (2012). Mean radiant temperature in idealised urban canyons—Examples from Freiburg, Germany. *International Journal of Biometeorology*, *56*(1), 199–203. <https://doi.org/10.1007/s00484-010-0394-1>
- Heusinkveld, B. G., Steeneveld, G. J., Hove, L. W. A. van, Jacobs, C. M. J., & Holtslag, A. a. M. (2014). Spatial variability of the Rotterdam urban heat island as influenced by urban land use. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, *119*(2), 677–692. <https://doi.org/10.1002/2012JD019399>
- Hoelscher, M.-T., Nehls, T., Jänicke, B., & Wessolek, G. (2016). Quantifying cooling effects of facade greening: Shading, transpiration and insulation. *Energy and Buildings*, *114*, 283–290. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.06.047>
- Hu, P., Negnevitsky, M., & Muttaqi, K. (2023). *Loading Capabilities Assessment of Power Transmission Lines*.
- Huang, J.-M., Chang, H.-Y., & Wang, Y.-S. (2020). Spatiotemporal Changes in the Built Environment Characteristics and Urban Heat Island Effect in a Medium-Sized City, Chiayi City, Taiwan. *Sustainability*, *12*(1), Article 1. <https://doi.org/10.3390/su12010365>
- Huang, Q., Meng, X., Yang, X., Jin, L., Liu, X., & Hu, W. (2016). The Ecological City: Considering Outdoor Thermal Environment. *Energy Procedia*, *104*, 177–182. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.12.031>
- Huang, X., & Wang, Y. (2019). Investigating the effects of 3D urban morphology on the surface urban heat island effect in urban functional zones by using high-resolution remote sensing data: A case study of Wuhan, Central China. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, *152*, 119–131. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2019.04.010>

- Huang, X., Song, J., Wang, C., Chui, T. F. M., & Chan, P. W. (2021). The synergistic effect of urban heat and moisture islands in a compact high-rise city. *Building and Environment*, 205, 108274. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108274>
- Hunter, A. M., Williams, N. S. G., Rayner, J. P., Aye, L., Hes, D., & Livesley, S. J. (2014). Quantifying the thermal performance of green façades: A critical review. *Ecological Engineering*, 63, 102–113. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2013.12.021>
- Imam Syafii, N., Ichinose, M., Kumakura, E., Jusuf, S. K., Chigusa, K., & Wong, N. H. (2017). Thermal environment assessment around bodies of water in urban canyons: A scale model study. *Sustainable Cities and Society*, 34, 79–89. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2017.06.012>
- Imran, H. M., Kala, J., Ng, A. W. M., & Muthukumaran, S. (2018). Effectiveness of green and cool roofs in mitigating urban heat island effects during a heatwave event in the city of Melbourne in southeast Australia. *Journal of Cleaner Production*, 197, 393–405. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.06.179>
- Internet 1. *AR6 Synthesis Report: Climate Change 2023*. IPCC. Pobrano 5 maj 2023, z <https://www.ch/report/sixth-assessment-report-cycle/>
- Internet 2. *VISAT (Urban TEP)*. Pobrano 16 lipiec 2020, z <https://urban-tep.eu/puma/tool/?id=567873922>
- Internet 3. *Geoserwis EOC*. Pobrano 3 maj 2023, z <https://geoservice.dlr.de/web/>
- Internet 4. *State of the Climate in Europe 2021 (WMO-No. 1304)*. World Meteorological Organization (WMO). Pobrano 1 lipiec 2023, z <https://public.wmo.int/en/our-mandate/climate/wmo-statement-state-of-global-climate/Europe-2022>
- Internet 5. *Internetowy System Aktów Prawnych*. Pobrano 5 maj 2023, z <https://isap.sejm.gov.pl/isap.nsf/home.xsp>
- Internet 6. *Biodiversity strategy for 2030*. Pobrano 27 czerwiec 2023, z [https://environment.ec.europa.eu/strategy/biodiversity-strategy-2030\\_en](https://environment.ec.europa.eu/strategy/biodiversity-strategy-2030_en)
- Internet 7. *Portal Systemu Informacji Przestrzennej Miasta Poznania*. Pobrano 5 maj 2023, z <http://sip.geopoz.pl/sip/nmap/mapa/1/default#>

- Internet 8. *Orphic Hymns 1-40*. Theoi Classical Texts Library. Pobrano 1 lipiec 2023, z <https://www.theoi.com/Text/OrphicHymns1.html>
- Internet 9. *Smart cities: Shaping the society of 2030*. UNESCO Digital Library. Pobrano 3 lipiec 2023, z <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000367762>
- Internet 10. *Us-smart-cities-market.png (670×350)*. Pobrano 8 wrzesień 2023, z <https://www.grandviewresearch.com/static/img/research/us-smart-cities-market.png>
- Internet 11. *Smart Cities—Poland | Statista Market Forecast*. Statista. Pobrano 3 lipiec 2023, z <https://www.statista.com/outlook/tmo/internet-of-things/smart-cities/poland>
- Internet 12. *Smart Cities Market Size, Share & Growth Report, 2030*. Pobrano 3 lipiec 2023, z <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/smart-cities-market>
- Internet 13. *Architekci i projektanci w czasie kryzysu*. Home Sweet Home PR. Pobrano 8 wrzesień 2023, z <https://hshpr.pl/>
- Internet 14. *Główny Urząd Statystyczny*. Pobrano 8 wrzesień 2023, z <https://stat.gov.pl/>
- Internet 15. *Premiera Raportu PLGBC Certyfikacja Zielonych Budynków w Liczbach 2021*. ngo.pl. Pobrano 18 czerwiec 2022, z <https://publicystyka.ngo.pl/premiera-raportu-plgbc-certyfikacja-zielonych-budynkow-w-liczbach-2021>
- Internet 16. *Database—Eurostat*. Pobrano 8 wrzesień 2023, z [https://ec.europa.eu/eurostat/data/database?node\\_code=proj](https://ec.europa.eu/eurostat/data/database?node_code=proj)
- Internet 17. *ENVI met Case Study Microclimate Thermal Comfort*. Pobrano 19 kwiecień 2023, z [https://www.envi-met.com/wp-content/uploads/2021/08/ENVI-met-Case-Study\\_Microclimate\\_Thermal\\_Comfort.pdf](https://www.envi-met.com/wp-content/uploads/2021/08/ENVI-met-Case-Study_Microclimate_Thermal_Comfort.pdf)
- Internet 18. *Deep Blue—Research, consultancy and training*. Deep Blue. Pobrano 8 wrzesień 2023, z <https://dblue.it/en/about-us/>
- Internet 19. *Obwieszczenie Marszałka Sejmu Rzeczypospolitej Polskiej z dnia 29 kwietnia 2016 r. W sprawie ogłoszenia jednolitego tekstu ustawy o prawie autorskim i prawach pokrewnych*. Pobrano 8 wrzesień 2023, z <https://isap.sejm.gov.pl/isap.nsf/DocDetails.xsp?id=WDU20160000666>
- Internet 20. *CiITT UP w Poznaniu*. Pobrano 8 wrzesień 2023, z <https://ciitt.up.poznan.pl/>
- Internet 21. *Baza biur architektonicznych*. BNF. Pobrano 8 wrzesień 2023, z <https://www.>



bnf.pl/katalog/baza/baza-biur-architektonicznych

Internet 22. *Baza Firm Ogrodniczych*. Przegląd ogrodniczy. Pobrano 8 wrzesień 2023, z <https://przeglad-ogrodniczy.pl/baza>

Internet 23. *Baza deweloperów*. BNF. Pobrano 8 wrzesień 2023, z <https://www.bnf.pl/katalog/baza/baza-deweloperow>

Internet 24. *Spółdzielnie mieszkaniowe w Polsce—Wykaz, lista 30-06-2023*. Pobrano 8 wrzesień 2023, z [https://www.coig.com.pl/wykaz\\_lista\\_spoldzielnie-mieszkaniowe\\_w\\_polsce.php](https://www.coig.com.pl/wykaz_lista_spoldzielnie-mieszkaniowe_w_polsce.php)

Internet 25. *Google Cloud Pricing Calculator*. Google Cloud. Pobrano 8 wrzesień 2023, z <https://cloud.google.com/products/calculator>

Internet 26. *Ile zarabia administrator stron internetowych—Zarobki administratora stron internetowych*. *Wynagrodzenia.pl*. Pobrano 8 wrzesień 2023, z <https://wynagrodzenia.pl/moja-placa/ile-zarabia-administrator-stron-internetowych>

Internet 27. *Customer service specialist – opis stanowiska, zarobki*. Hrk. Pobrano 8 wrzesień 2023, z <https://hrk.pl/pl/baza-wiedzy/artykuly-eksperckie/customer-service-specialist-opis-stanowiska-zarobki>

Iping, A., Kidston-Lattari, J., Simpson-Young, A., Duncan, E., & McManus, P. (2019). (Re)presenting urban heat islands in Australian cities: A study of media reporting and implications for urban heat and climate change debates. *Urban Climate*, 27, 420–429. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2018.12.014>

Jamei, E., & Rajagopalan, P. (2019). Effect of street design on pedestrian thermal comfort. *Architectural Science Review*, 62(2), 92–111.

Jamei, E., & Tapper, N. (2019). WSUD and Urban Heat Island Effect Mitigation. W *Approaches to Water Sensitive Urban Design* (s. 381–407). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812843-5.00019-8>

Jamei, E., Rajagopalan, P., Seyedmahmoudian, M., & Jamei, Y. (2016). Review on the impact of urban geometry and pedestrian level greening on outdoor thermal comfort. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 54, 1002–1017. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.104>

- Jia, J., Liu, S., Zhao, S., Li, Y., Zhang, Q., & Tang, W. (2020). *Influences of landscape composition and configuration on land surface temperature in Wuhan, a „furnace” city in China*. 2020, GC006-0001.
- Jiang, Y., Wu, C., & Teng, M. (2020). Impact of Residential Building Layouts on Microclimate in a High Temperature and High Humidity Region. *Sustainability*, 12(3), Article 3. <https://doi.org/10.3390/su12031046>
- Jim, C. Y. (2015). Cold-season solar input and ambivalent thermal behavior brought by climber greenwalls. *Energy*, 90, 926–938. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.07.127>
- Jin, H., Cheng, H., & Zhai, H. (2005). Calculating method of minimum load-shedding cost in transmission network planning. *Proceedings of Electric Power System and Automation*, 17(6), 5–9. Scopus.
- Johansson, E. (2006). Influence of urban geometry on outdoor thermal comfort in a hot dry climate: A study in Fez, Morocco. *Building and Environment*, 41(10), 1326–1338. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.05.022>
- Johansson, E., Grundström, K., & Rosenlund, H. (2001). Street canyon microclimate in traditional and modern neighbourhoods in a hot dry climate—A case study in Fez, Morocco, 661–665. 18th International Conference on Passive and Low Energy Architecture (PLEA) - Florianópolis, Brazil
- Jr, B. S., Vargo, J., Liu, P., Habeeb, D., DeLucia, A., Trail, M., Hu, Y., & Russell, A. (2014). Avoided Heat-Related Mortality through Climate Adaptation Strategies in Three US Cities. *PLOS ONE*, 9(6), e100852. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0100852>
- Kalman, Y., Pearlmutter, D., & Erell, E. (2013). Impact of increasing the height of Tel Aviv buildings on pedestrian comfort and building energy efficiency. *PLEA*.
- Kantzioura, A., Kosmopoulos, P., & Zoras, S. (2012). Urban surface temperature and microclimate measurements in Thessaloniki. *Energy and Buildings*, 44, 63–72. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.10.019>
- Kantzioura, A., Kosmopoulos, P., Dimoudi, A., & Zoras, S. (2015). Experimental investigation of microclimatic conditions in relation to the built environment in a central

urban area in Thessaloniki (Northern Greece): A case study. *Sustainable Cities and Society*, 19, 331–340. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2015.03.006>

Karl, T. R., Jones, P. D., Knight, R. W., Kukla, G., Plummer, N., Razuvayev, V., Gallo, K. P., Lindsey, J., Charlson, R. J., & Peterson, T. C. (1993). A New Perspective on Recent Global Warming: Asymmetric Trends of Daily Maximum and Minimum Temperature. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 74(6), 1007–1024. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1993\)074<1007:ANPORG>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1993)074<1007:ANPORG>2.0.CO;2)

Kedissa, C., Outtas, S., & Belarbi, R. (2016). The impact of height/width ratio on the microclimate and thermal comfort levels of urban courtyards. *International Journal of Sustainable Building Technology and Urban Development*, 7(3–4), 174–183. <https://doi.org/10.1080/2093761X.2017.1302830>

Ketterer, C., & Matzarakis, A. (2014). Human-biometeorological assessment of heat stress reduction by replanning measures in Stuttgart, Germany. *Landscape and Urban Planning*, 122, 78–88. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2013.11.003>

Kim, J.-H., Gu, D., Sohn, W., Kil, S.-H., Kim, H., & Lee, D.-K. (2016). Neighborhood Landscape Spatial Patterns and Land Surface Temperature: An Empirical Study on Single-Family Residential Areas in Austin, Texas. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 13(9), Article 9. <https://doi.org/10.3390/ijerph13090880>

Klemm, W., Heusinkveld, B. G., Lenzholzer, S., Jacobs, M. H., & Van Hove, B. (2015). Psychological and physical impact of urban green spaces on outdoor thermal comfort during summertime in The Netherlands. *Building and Environment*, 83, 120–128. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.05.013>

Köhler, M. (2008). Green facades—a view back and some visions. *Urban Ecosystems*, 11(4), 423–436. Scopus. <https://doi.org/10.1007/s11252-008-0063-x>

Kolokotroni, M., Ren, X., Davies, M., & Mavrogianni, A. (2012). London's urban heat island: Impact on current and future energy consumption in office buildings. *Energy and Buildings*, 47, 302–311. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.12.019>

- Kolokotsa, D., Santamouris, M., & Zerefos, S. C. (2013). Green and cool roofs' urban heat island mitigation potential in European climates for office buildings under free floating conditions. *Solar Energy*, *95*, 118–130. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2013.06.001>
- Kong, F., Yan, W., Zheng, G., Yin, H., Cavan, G., Zhan, W., Zhang, N., & Cheng, L. (2016). Retrieval of three-dimensional tree canopy and shade using terrestrial laser scanning (TLS) data to analyze the cooling effect of vegetation. *Agricultural and Forest Meteorology*, *217*, 22–34. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2015.11.005>
- Kong, L., Lau, K. K.-L., Yuan, C., Chen, Y., Xu, Y., Ren, C., & Ng, E. (2017). Regulation of outdoor thermal comfort by trees in Hong Kong. *Sustainable Cities and Society*, *31*, 12–25. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2017.01.018>
- Kontoleon, K. J., & Eumorfopoulou, E. A. (2010). The effect of the orientation and proportion of a plant-covered wall layer on the thermal performance of a building zone. *Building and Environment*, *45*(5), 1287–1303. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.11.013>
- Kotak, Y., Gul, M., Muneer, T., & Ivanova, S. (2015). *Investigating the Impact of Ground Albedo on the Performance of PV Systems*.
- Koyama, T., Yoshinaga, M., Hayashi, H., Maeda, K., & Yamauchi, A. (2013). Identification of key plant traits contributing to the cooling effects of green façades using freestanding walls. *Building and Environment*, *66*, 96–103. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.04.020>
- Krüger, E. L., Minella, F. O., & Rasia, F. (2011). Impact of urban geometry on outdoor thermal comfort and air quality from field measurements in Curitiba, Brazil. *Building and Environment*, *46*(3), 621–634. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.09.006>
- Kuczera, A. (2021). *Certyfikacja zielonych budynków w liczbach*. Polskie Stowarzyszenie Budownictwa Ekologicznego PLGBC. <https://plgbc.org.pl/wp-content/uploads/2021/04/Certyfikacja-zielonych-budynkow-2021.pdf>
- Kwak, Y., Park, C., & Deal, B. (2020). Discerning the success of sustainable planning: A comparative analysis of urban heat island dynamics in Korean new towns. *Sustainable Cities and Society*, *61*(102341). <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102341>

- Lamprey, B. L., Barron, E. J., & Pollard, D. (2005). Simulation of the relative impact of land cover and carbon dioxide to climate change from 1700 to 2100. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, *110*(D20). <https://doi.org/10.1029/2005JD005916>
- Lan, Y., & Zhan, Q. (2017). How do urban buildings impact summer air temperature? The effects of building configurations in space and time. *Building and Environment*, *125*, 88–98. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.08.046>
- Lau, K. K.-L., Chung, S. C., & Ren, C. (2019). Outdoor thermal comfort in different urban settings of sub-tropical high-density cities: An approach of adopting local climate zone (LCZ) classification. *Building and Environment*, *154*, 227–238. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.03.005>
- Lau, K. K.-L., Lindberg, F., Rayner, D., & Thorsson, S. (2015). The effect of urban geometry on mean radiant temperature under future climate change: A study of three European cities. *International Journal of Biometeorology*, *59*(7), 799–814. <https://doi.org/10.1007/s00484-014-0898-1>
- Lau, K. K.-L., Ren, C., Ho, J., & Ng, E. (2016). Numerical modelling of mean radiant temperature in high-density sub-tropical urban environment. *Energy and Buildings*, *114*, 80–86. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.06.035>
- Lauwaet, D., De Ridder, K., Saeed, S., Brisson, E., Chatterjee, F., van Lipzig, N. P. M., Maiheu, B., & Hooyberghs, H. (2016). Assessing the current and future urban heat island of Brussels. *Urban Climate*, *15*, 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2015.11.008>
- Lazar, A. (2002). Heuristic knowledge discovery for archaeological data using genetic algorithms and rough sets. W *Heuristic and optimization for knowledge discovery* (s. 263–278). IGI Global.
- Le, M. T., Shukurov, I., Shukurova, L., & Dmitrieva, A. (2020). A Study Case of Mathematical Calculation of Urban Heat Island Intensity Based on Urban Geometry. W B. Anatolijs, V. Nikolai, & S. Vitalii (Red.), *Proceedings of EECE 2019* (s. 373–388). Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-42351-3\\_33](https://doi.org/10.1007/978-3-030-42351-3_33)

- Lee, A. C. K., & Maheswaran, R. (2011). The health benefits of urban green spaces: A review of the evidence. *Journal of Public Health, 33*(2), 212–222. <https://doi.org/10.1093/pubmed/fdq068>
- Lee, D. O. (1991). Urban—Rural humidity differences in London. *International Journal of Climatology, 11*(5), 577–582. <https://doi.org/10.1002/joc.3370110509>
- Lee, H., & Mayer, H. (2018). Thermal comfort of pedestrians in an urban street canyon is affected by increasing albedo of building walls. *International Journal of Biometeorology, 62*(7), 1199–1209. <https://doi.org/10.1007/s00484-018-1523-5>
- Lee, H., Mayer, H., & Chen, L. (2016). Contribution of trees and grasslands to the mitigation of human heat stress in a residential district of Freiburg, Southwest Germany. *Landscape and Urban Planning, 148*, 37–50. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2015.12.004>
- Lee, L. S. H., & Jim, C. Y. (2017). Subtropical summer thermal effects of wire-rope climber green walls with different air-gap depths. *Building and Environment, 126*, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.09.021>
- Lehmann, S. (2014). Low carbon districts: Mitigating the urban heat island with green roof infrastructure. *City, Culture and Society, 5*(1), 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.ccs.2014.02.002>
- Leon, A., & Koch, A. S. (2004). *Agile Software Development Evaluating the Methods for Your Organization*. Artech House, Inc.
- Leuzinger, S., Vogt, R., & Körner, C. (2010). Tree surface temperature in an urban environment. *Agricultural and Forest Meteorology, 150*(1), 56–62. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2009.08.006>
- Li, H., Li, Y., Wang, T., Wang, Z., Gao, M., & Shen, H. (2021). Quantifying 3D building form effects on urban land surface temperature and modeling seasonal correlation patterns. *Building and Environment, 204*, 108132. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108132>

- Li, J., Song, C., Cao, L., Zhu, F., Meng, X., & Wu, J. (2011). Impacts of landscape structure on surface urban heat islands: A case study of Shanghai, China. *Remote Sensing of Environment*, *115*(12), 3249–3263. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.07.008>
- Li, Y., Schubert, S., Kropp, J. P., & Rybski, D. (2020). On the influence of density and morphology on the Urban Heat Island intensity. *Nature Communications*, *11*(1), 2647. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-16461-9>
- Li, Y., Wang, D., Li, S., & Gao, W. (2021). Impact Analysis of Urban Morphology on Residential District Heat Energy Demand and Microclimate Based on Field Measurement Data. *Sustainability*, *13*(4), Article 4. <https://doi.org/10.3390/su13042070>
- Li, Z., Zhang, H., Wen, C.-Y., Yang, A.-S., & Juan, Y.-H. (2020). Effects of height-asymmetric street canyon configurations on outdoor air temperature and air quality. *Building and Environment*, *183*, 107195.
- Liang, B. P., Ma, Y. F., & Li, H. (2015). Study on cooling effect of typical garden green space and water body in guilin city. *Ecol. Environ. Sci.*, *24*, 278–285. Scopus.
- Liao, F.-C., Cheng, M.-J., Hwang, R.-L., & Yang, W.-S. (2014). The effect of land cover and land use on urban heat island in Taiwan. *Proceedings of the World SB14, Barcelona, Spain*, 28–30.
- Lin, B. B., Meyers, J., Beaty, M. R., & Barnett, B. G. (2016). Urban Green Infrastructure Impacts on Climate Regulation Services in Sydney, Australia. *Sustainability*, *8*(8). <https://doi.org/10.3390/su8080788>
- Lin, B.-S., & Lin, Y.-J. (2010). Cooling Effect of Shade Trees with Different Characteristics in a Subtropical Urban Park. *HortScience*, *45*(1), 83–86. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.45.1.83>
- Lin, P., Lau, S. S. Y., Qin, H., & Gou, Z. (2017). Effects of urban planning indicators on urban heat island: A case study of pocket parks in high-rise high-density environment. *Landscape and Urban Planning*, *168*, 48–60. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2017.09.024>

- Lin, P., Song, D., LAU, S. S. Y., & Hao, Q. I. N. (2021). *Investigation of The Impacts of Urban Morphology On Summer-Time Urban Heat Island Using GIS And Field Measurement.*
- Liu, K., Zhang, X., Li, X., & Jiang, H. (2014). Multiscale analysis of urban thermal characteristics: Case study of Shijiazhuang, China. *Journal of Applied Remote Sensing*, 8(1), 083649. <https://doi.org/10.1117/1.JRS.8.083649>
- Liu, W., Feddema, J., Hu, L., Zung, A., & Brunsell, N. (2017). Seasonal and Diurnal Characteristics of Land Surface Temperature and Major Explanatory Factors in Harris County, Texas. *Sustainability*, 9(12), Article 12. <https://doi.org/10.3390/su9122324>
- Livesley, S. J., McPherson, E. G., & Calfapietra, C. (2016). The Urban Forest and Ecosystem Services: Impacts on Urban Water, Heat, and Pollution Cycles at the Tree, Street, and City Scale. *Journal of Environmental Quality*, 45(1), 119–124. <https://doi.org/10.2134/jeq2015.11.0567>
- Lobaccaro, G., Acero, J. A., Sanchez Martinez, G., Padro, A., Laburu, T., & Fernandez, G. (2019). Effects of Orientations, Aspect Ratios, Pavement Materials and Vegetation Elements on Thermal Stress inside Typical Urban Canyons. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16(19), Article 19. <https://doi.org/10.3390/ijerph16193574>
- Lontorfos, V., Efthymiou, C., & Santamouris, M. (2018). On the time varying mitigation performance of reflective geoengineering technologies in cities. *Renewable Energy*, 115, 926–930. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.09.033>
- Loughner, C. P., Allen, D. J., Zhang, D.-L., Pickering, K. E., Dickerson, R. R., & Landry, L. (2012). Roles of Urban Tree Canopy and Buildings in Urban Heat Island Effects: Parameterization and Preliminary Results. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 51(10), 1775–1793. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-11-0228.1>
- Lu, J., Li, C., Yang, Y., Zhang, X., & Jin, M. (2012). Quantitative evaluation of urban park cool island factors in mountain city. *Journal of Central South University*, 19(6), 1657–1662. <https://doi.org/10.1007/s11771-012-1189-9>



- Lu, J., Li, C., Yu, C., Jin, M., & Dong, S. (2012). Regression Analysis of the Relationship between Urban Heat Island Effect and Urban Canopy Characteristics in a Mountainous City, Chongqing. *Indoor and Built Environment*, *21*(6), 821–836. <https://doi.org/10.1177/1420326X12461659>
- Lundholm, J., MacIvor, J. S., MacDougall, Z., & Ranalli, M. (2010). Plant Species and Functional Group Combinations Affect Green Roof Ecosystem Functions. *PLOS ONE*, *5*(3), e9677. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0009677>
- Lyu, T., Buccolieri, R., & Gao, Z. (2019). A Numerical Study on the Correlation between Sky View Factor and Summer Microclimate of Local Climate Zones. *Atmosphere*, *10*(8), Article 8. <https://doi.org/10.3390/atmos10080438>
- Macintyre, H. L., & Heaviside, C. (2019). Potential benefits of cool roofs in reducing heat-related mortality during heatwaves in a European city. *Environment International*, *127*, 430–441. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.02.065>
- Mankins, J. C. (1995). Technology readiness levels. *White Paper, April*, 6(1995), 1995.
- Manoli, G., Fatichi, S., Schläpfer, M., Yu, K., Crowther, T. W., Meili, N., Burlando, P., Katul, G. G., & Bou-Zeid, E. (2019). Magnitude of urban heat islands largely explained by climate and population. *Nature*, *573*(7772), Article 7772. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1512-9>
- Martin, P., Baudouin, Y., & Gachon, P. (2015). An alternative method to characterize the surface urban heat island. *International Journal of Biometeorology*, *59*(7), 849–861. <https://doi.org/10.1007/s00484-014-0902-9>
- Martinelli, L., & Matzarakis, A. (2017). Influence of height/width proportions on the thermal comfort of courtyard typology for Italian climate zones. *Sustainable Cities and Society*, *29*, 97–106. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2016.12.004>
- Mathew, A., Khandelwal, S., & Kaul, N. (2016). Spatial and temporal variations of urban heat island effect and the effect of percentage impervious surface area and elevation on land surface temperature: Study of Chandigarh city, India. *Sustainable Cities and Society*, *26*, 264–277. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2016.06.018>

- Matzarakis, A., Gangwisch, M., & Fröhlich, D. (2021). RayMan and SkyHelios Model. *Urban Microclimate Modelling for Comfort and Energy Studies*, 339–361.
- Mayer, H., Holst, J., Dostal, P., Imbery, F., & Schindler, D. (2008). Human thermal comfort in summer within an urban street canyon in Central Europe. *Meteorologische Zeitschrift*, 17, 241–250. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2008/0285>
- Meier, F., & Scherer, D. (2012). Spatial and temporal variability of urban tree canopy temperature during summer 2010 in Berlin, Germany. *Theoretical and Applied Climatology*, 110(3), 373–384. <https://doi.org/10.1007/s00704-012-0631-0>
- Menon, S., Akbari, H., Mahanama, S., Sednev, I., & Levinson, R. (2010). Radiative forcing and temperature response to changes in urban albedos and associated CO<sub>2</sub> offsets. *Environmental Research Letters*, 5(1), 014005. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/5/1/014005>
- Mikami, T. (2005). The heat island phenomenon and rain storms in urban areas. *Gesuido Kyokai-shi*, 42, 512–519. Scopus.
- Mirzaee, S., Özgun, O., Ruth, M., & Binita, K. C. (2018). Neighborhood-scale sky view factor variations with building density and height: A simulation approach and case study of Boston. *Urban Climate*, 26, 95–108. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2018.08.012>
- Mirzaei, P., & Haghighat, F. (2010). Approaches to study Urban Heat Island – Abilities and limitations. *Building and Environment*, 45, 2192–2201. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.04.001>
- Mitchell, V. G., Mein, R. G., & McMahon, T. A. (2001). Modelling the urban water cycle. *Environmental Modelling & Software*, 16(7), 615–629. [https://doi.org/10.1016/S1364-8152\(01\)00029-9](https://doi.org/10.1016/S1364-8152(01)00029-9)
- Mohegh, A., Levinson, R., Taha, H., Gilbert, H., Zhang, J., Li, Y., Tang, T., & Ban-Weiss, G. A. (2018). Observational Evidence of Neighborhood Scale Reductions in Air Temperature Associated with Increases in Roof Albedo. *Climate*, 6(4), Article 4. <https://doi.org/10.3390/cli6040098>

- Montávez, J. P., Rodríguez, A., & Jiménez, J. I. (2000). A study of the Urban Heat Island of Granada. *International Journal of Climatology*, 20(8), Article 8. [https://doi.org/10.1002/1097-0088\(20000630\)20](https://doi.org/10.1002/1097-0088(20000630)20)
- Morakinyo, T. E., Lai, A., Lau, K. K.-L., & Ng, E. (2019). Thermal benefits of vertical greening in a high-density city: Case study of Hong Kong. *Urban Forestry & Urban Greening*, 37, 42–55. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2017.11.010>
- Morakinyo, T. E., Ouyang, W., Lau, K. K.-L., Ren, C., & Ng, E. (2020). Right tree, right place (urban canyon): Tree species selection approach for optimum urban heat mitigation - development and evaluation. *Science of The Total Environment*, 719, 137461. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137461>
- Morini, E., Castellani, B., Presciutti, A., Anderini, E., Filipponi, M., Nicolini, A., & Rossi, F. (2017). Experimental Analysis of the Effect of Geometry and Façade Materials on Urban District's Equivalent Albedo. *Sustainability*, 9(7), Article 7. <https://doi.org/10.3390/su9071245>
- Morini, E., Touchaei, A. G., Castellani, B., Rossi, F., & Cotana, F. (2016). The Impact of Albedo Increase to Mitigate the Urban Heat Island in Terni (Italy) Using the WRF Model. *Sustainability*, 8(10), Article 10. <https://doi.org/10.3390/su8100999>
- Muhaisen, A. S., & Abed, H. M. (2014). Effect of urban geometry and spacing on the thermal performance in the Mediterranean climate of the Gaza Strip. *Journal of Architecture and Planning, Volume: 26, Number: 1*(Volume: 26, Number: 1). <https://iugspace.iugaza.edu.ps/handle/20.500.12358/24568>
- Muniz-Gaal, L. P., Pezzuto, C. C., Carvalho, M. F. H. de, & Mota, L. T. M. (2020). Urban geometry and the microclimate of street canyons in tropical climate. *Building and Environment*, 169, 106547. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106547>
- Nakano, A., Bueno, B., Norford, L., & Reinhart, C. F. (2015). Urban Weather Generator—A Novel Workflow for Integrating Urban Heat Island Effect within Urban Design Process. *MIT Web Domain*. <https://dspace.mit.edu/handle/1721.1/108779>
- Nakata-Osaki, C. M., Souza, L. C. L., & Rodrigues, D. S. (2018). THIS – Tool for Heat Island Simulation: A GIS extension model to calculate urban heat island intensity based on

- urban geometry. *Computers, Environment and Urban Systems*, 67, 157–168. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2017.09.007>
- Nakicenovic, N., Alcamo, J., Davis, G., Vries, B. de, Fenhann, J., Gaffin, S., Gregory, K., Grubler, A., Jung, T. Y., & Kram, T. (2000). *Special report on emissions scenarios*.
- Nazarian, N., & Kleissl, J. (2015). CFD simulation of an idealized urban environment: Thermal effects of geometrical characteristics and surface materials. *Urban Climate*, 12, 141–159. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2015.03.002>
- Nesmachnow, S. (2014). An overview of metaheuristics: Accurate and efficient methods for optimisation. *International Journal of Metaheuristics*, 3(4), 320–347. <https://doi.org/10.1504/IJMHEUR.2014.068914>
- Newman, L., & Herbert, Y. (2009). The use of deep water cooling systems: Two Canadian examples. *Renewable Energy*, 34(3), 727–730. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2008.04.022>
- Ng, E., Chen, L., Wang, Y., & Yuan, C. (2012). A study on the cooling effects of greening in a high-density city: An experience from Hong Kong. *Building and Environment*, 47, 256–271. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.07.014>
- Niachou, K., Livada, I., & Santamouris, M. (2008). Experimental study of temperature and airflow distribution inside an urban street canyon during hot summer weather conditions—Part I: Air and surface temperatures. *Building and Environment - BLDG ENVIRON*, 43, 1383–1392. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2007.01.039>
- Noro, M., Busato, F., & Lazzarin, R. (2014). UHI effect in the city of Padua: Simulations and mitigation strategies using the Rayman and envimet model. *Geographia Polonica*, 87(4), 517–530.
- Norton, B. A., Coutts, A. M., Livesley, S. J., Harris, R. J., Hunter, A. M., & Williams, N. S. G. (2015). Planning for cooler cities: A framework to prioritise green infrastructure to mitigate high temperatures in urban landscapes. *Landscape and Urban Planning*, 134, 127–138. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2014.10.018>

- O'Malley, C., Piroozfar, P., Farr, E. R. P., & Pomponi, F. (2015). Urban Heat Island (UHI) mitigating strategies: A case-based comparative analysis. *Sustainable Cities and Society*, *19*, 222–235. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2015.05.009>
- Oberndorfer, E., Lundholm, J., Bass, B., Coffman, R. R., Doshi, H., Dunnett, N., Gaffin, S., Köhler, M., Liu, K. K. Y., & Rowe, B. (2007). Green roofs as urban ecosystems: Ecological structures, functions, and services. *BioScience*, *57*(10), 823–833. Scopus. <https://doi.org/10.1641/B571005>
- Oh, M., Jang, K. M., & Kim, Y. (2021). Empirical analysis of building energy consumption and urban form in a large city: A case of Seoul, South Korea. *Energy and Buildings*, *245*, 111046. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111046>
- Oke, T. R. (1982). The energetic basis of the urban heat island. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, *108*(455), 1–24. <https://doi.org/10.1002/qj.49710845502>
- Oke, T. R. (1987). *Boundary Layer Climates* (2. wyd.). Routledge. <https://doi.org/10.4324/9780203407219>
- Oke, T. R., & Maxwell, G. B. (1975). Urban heat island dynamics in Montreal and Vancouver. *Atmospheric Environment (1967)*, *9*(2), 191–200. [https://doi.org/10.1016/0004-6981\(75\)90067-0](https://doi.org/10.1016/0004-6981(75)90067-0)
- Oke, T. R., Johnson, G. T., Steyn, D. G., & Watson, I. D. (1991). Simulation of surface urban heat islands under 'ideal' conditions at night part 2: Diagnosis of causation. *Boundary-Layer Meteorology*, *56*(4), 339–358. <https://doi.org/10.1007/BF00119211>
- Ooka, R., Chen, H., & Kato, S. (2008). Study on optimum arrangement of trees for design of pleasant outdoor environment using multi-objective genetic algorithm and coupled simulation of convection, radiation and conduction. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, *96*(10), 1733–1748. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2008.02.039>
- Ouldboukhitine, S.-E., Belarbi, R., Jaffal, I., & Trabelsi, A. (2011). Assessment of green roof thermal behavior: A coupled heat and mass transfer model. *Building and Environment*, *46*(12), 2624–2631. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.06.021>

- Ouldboukhitine, S.-E., Spolek, G., & Belarbi, R. (2014). Impact of plants transpiration, grey and clean water irrigation on the thermal resistance of green roofs. *Ecological Engineering*, *67*, 60–66. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2014.03.052>
- Park, M., Hagishima, A., Tanimoto, J., & Narita, K. (2012). Effect of urban vegetation on outdoor thermal environment: Field measurement at a scale model site. *Building and Environment*, *56*, 38–46. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.02.015>
- Parsaee, M., Joybari, M. M., Mirzaei, P. A., & Haghghat, F. (2019). Urban heat island, urban climate maps and urban development policies and action plans. *Environmental Technology & Innovation*, *14*, 100341. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2019.100341>
- Pasetto, M., Pasquini, E., Giacomello, G., & Baliello, A. (2019). Innovative pavement surfaces as urban heat islands mitigation strategy: Chromatic, thermal and mechanical characterisation of clear/coloured mixtures. *Road Materials and Pavement Design*, *20*(sup1), S533–S555. <https://doi.org/10.1080/14680629.2019.1593230>
- Pataki, D. E., Carreiro, M. M., Cherrier, J., Grulke, N. E., Jennings, V., Pincetl, S., Pouyat, R. V., Whitlow, T. H., & Zipperer, W. C. (2011). Coupling biogeochemical cycles in urban environments: Ecosystem services, green solutions, and misconceptions. *Frontiers in Ecology and the Environment*, *9*(1), 27–36. <https://doi.org/10.1890/090220>
- Pauleit, S. (2003). Urban street tree plantings: Identifying the key requirements. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Municipal Engineer*, *156*(1), 43–50. Scopus. <https://doi.org/10.1680/muen.2003.156.1.43>
- Pearlmutter, D., Pucher, B., Calheiros, C., Hoffmann, K., Aicher, A., Pinho, P., Stracqualursi, A., Korolova, A., Pobrić, A., Galvão, A., Tokuç, A., Bas, B., Theochari, D., Milosevic, D., Giancola, E., Bertino, G., Castellar, J., Flaszynska, J., Onur, M., & Nehls, T. (2021). Closing Water Cycles in the Built Environment through Nature-Based Solutions: The Contribution of Vertical Greening Systems and Green Roofs. *Water*, *13*. <https://doi.org/10.3390/w13162165>

- Pérez, G., Coma, J., Martorell, I., & Cabeza, L. F. (2014). Vertical Greenery Systems (VGS) for energy saving in buildings: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 39, 139–165. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.055>
- Pérez, G., Coma, J., Sol, S., & Cabeza, L. F. (2017). Green facade for energy savings in buildings: The influence of leaf area index and facade orientation on the shadow effect. *Applied Energy*, 187, 424–437. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.11.055>
- Perini, K., & Magliocco, A. (2014). Effects of vegetation, urban density, building height, and atmospheric conditions on local temperatures and thermal comfort. *Urban Forestry & Urban Greening*, 13(3), 495–506. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2014.03.003>
- Peron, F., Maria, M. M. D., Spinazzè, F., & Mazzali, U. (2015). An analysis of the urban heat island of Venice mainland. *Sustainable Cities and Society, Complete*(19), 300–309. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2015.05.008>
- Pigliautile, I., Chàfer, M., Pisello, A. L., Pérez, G., & Cabeza, L. F. (2020). Inter-building assessment of urban heat island mitigation strategies: Field tests and numerical modelling in a simplified-geometry experimental set-up. *Renewable Energy*, 147, 1663–1675. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.09.082>
- Pomerantz, M. (2000). *The Effect of Pavements' Temperatures On Air Temperatures in Large Cities*. <https://escholarship.org/uc/item/6ss5g0wg>
- Potchter, O., Cohen, P., & Bitan, A. (2006). Climatic behavior of various urban parks during hot and humid summer in the mediterranean city of Tel Aviv, Israel. *International Journal of Climatology*, 26(12), 1695–1711. <https://doi.org/10.1002/joc.1330>
- Pullin, A. S., & Stewart, G. B. (2006). Guidelines for Systematic Review in Conservation and Environmental Management. *Conservation Biology*, 20(6), 1647–1656. <https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2006.00485.x>
- Rajagopalan, P., Lim, K. C., & Jamei, E. (2014). Urban heat island and wind flow characteristics of a tropical city. *Solar Energy*, 107, 159–170. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2014.05.042>
- Ramyar, R., Zarghami, E., & Bryant, M. (2019). Spatio-temporal planning of urban neighborhoods in the context of global climate change: Lessons for urban form design

- in Tehran, Iran. *Sustainable Cities and Society*, 51, 101554. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101554>
- Rhee, J., Park, S., & Lu, Z. (2014). Relationship between land cover patterns and surface temperature in urban areas. *GIScience & Remote Sensing*, 51(5), 521–536. <https://doi.org/10.1080/15481603.2014.964455>
- Rizwan, A. M., Dennis, L. Y. C., & Liu, C. (2008). A review on the generation, determination and mitigation of Urban Heat Island. *Journal of Environmental Sciences*, 20(1), 120–128. [https://doi.org/10.1016/S1001-0742\(08\)60019-4](https://doi.org/10.1016/S1001-0742(08)60019-4)
- Ronchi, S., Salata, S., & Arcidiacono, A. (2020). Which urban design parameters provide climate-proof cities? An application of the Urban Cooling InVEST Model in the city of Milan comparing historical planning morphologies. *Sustainable Cities and Society*, 63, 102459. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102459>
- Rosso, F., Pisello, A. L., Cotana, F., & Ferrero, M. (2016). On the thermal and visual pedestrians' perception about cool natural stones for urban paving: A field survey in summer conditions. *Building and Environment*, 107, 198–214. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.07.028>
- Rubel, F., Brugger, K., Haslinger, K., & Auer, I. (2017). The climate of the European Alps: Shift of very high resolution Köppen-Geiger climate zones 1800–2100. *Meteorologische Zeitschrift*, 26(2), Article 2. <https://doi.org/10.1127/metz/2016/0816>
- Sachindra, D. A., Ng, A. W. M., Muthukumaran, S., & Perera, B. J. C. (2016). Impact of climate change on urban heat island effect and extreme temperatures: A case-study. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 142(694), 172–186. <https://doi.org/10.1002/qj.2642>
- Sadri, H., & Zeybekoglu, S. (2018). Deurbanization and the right to the deurbanized city. *ANDULI, Revista Andaluza de Ciencias Sociales*, 17, Article 17. <https://doi.org/10.12795/anduli.2018.i17.10>
- Sailor, D. J., & Fan, H. (2002). Modeling the diurnal variability of effective albedo for cities. *Atmospheric Environment*, 36(4), 713–725. Scopus. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(01\)00452-6](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(01)00452-6)



- Sailor, D. J., Elley, T. B., & Gibson, M. (2012). Exploring the building energy impacts of green roof design decisions – a modeling study of buildings in four distinct climates. *Journal of Building Physics*, 35(4), 372–391. <https://doi.org/10.1177/1744259111420076>
- Salata, F., Golasi, I., de Lieto Vollaro, R., & de Lieto Vollaro, A. (2016). Urban microclimate and outdoor thermal comfort. A proper procedure to fit ENVI-met simulation outputs to experimental data. *Sustainable Cities and Society*, 26, 318–343. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2016.07.005>
- Salazar, A., Baldi, G., Hirota, M., Syktus, J., & McAlpine, C. (2015). Land use and land cover change impacts on the regional climate of non-Amazonian South America: A review. *Global and Planetary Change*, 128, 103–119. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2015.02.009>
- Salvati, A., Coch, H., & Morganti, M. (2017). Effects of urban compactness on the building energy performance in Mediterranean climate. *Energy Procedia*, 122, 499–504. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.07.303>
- Salvati, A., Kolokotroni, M., Kotopouleas, A., Watkins, R., Giridharan, R., & Nikolopoulou, M. (2020). Impact of urban albedo on microclimate: Computational investigation in London. *35th PLEA Conference, Sustainable Architecture and Urban Design, Planning Post Carbon Cities*. <http://bura.brunel.ac.uk/handle/2438/22215>
- Salvati, A., Palme, M., & Inostroza, L. (2017). Key Parameters for Urban Heat Island Assessment in A Mediterranean Context: A Sensitivity Analysis Using the Urban Weather Generator Model. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 245, 082055. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/245/8/082055>
- Santamouris, M. (2013). Using cool pavements as a mitigation strategy to fight urban heat island—A review of the actual developments. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 26, 224–240. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.05.047>
- Santamouris, M. (2014). Cooling the cities – A review of reflective and green roof mitigation technologies to fight heat island and improve comfort in urban environments. *Solar Energy*, 103, 682–703. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2012.07.003>

- Santamouris, M. (2015). Analyzing the heat island magnitude and characteristics in one hundred Asian and Australian cities and regions. *Science of The Total Environment*, 512–513, 582–598. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.01.060>
- Santamouris, M. (2016). Cooling the buildings – past, present and future. *Energy and Buildings*, 128, 617–638. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.07.034>
- Santamouris, M. (2018). *Minimizing Energy Consumption, Energy Poverty and Global and Local Climate Change in the Built Environment: Innovating to Zero: Causalities and Impacts in a Zero Concept World*. Elsevier.
- Santamouris, M., & Kolokotsa, D. (Eds.). (2016). *Urban Climate Mitigation Techniques*. Routledge. <https://doi.org/10.4324/9781315765839>
- Santamouris, M., Haddad, S., Saliari, M., Vasilakopoulou, K., Synnefa, A., Paolini, R., Ulpiani, G., Garshasbi, S., & Fiorito, F. (2018). On the energy impact of urban heat island in Sydney: Climate and energy potential of mitigation technologies. *Energy and Buildings*, 166, 154–164. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.02.007>
- Santamouris, M., Mihalakakou, G., Papanikolaou, N., & Asimakopoulos, D. N. (1999). A neural network approach for modeling the Heat Island phenomenon in urban areas during the summer period. *Geophysical Research Letters*, 26(3), 337–340. <https://doi.org/10.1029/1998GL900316>
- Santamouris, M., Sfakianaki, A., & Pavlou, K. (2010). On the efficiency of night ventilation techniques applied to residential buildings. *Energy and Buildings*, 42(8), 1309–1313. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.02.024>
- Sarrat, C., Lemonsu, A., Masson, V., & Guedalia, D. (2006). Impact of urban heat island on regional atmospheric pollution. *Atmospheric Environment*, 40(10), 1743–1758. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2005.11.037>
- Scarano, M., & Sobrino, J. A. (2015). On the relationship between the sky view factor and the land surface temperature derived by Landsat-8 images in Bari, Italy. *International Journal of Remote Sensing*, 36(19–20), 4820–4835. <https://doi.org/10.1080/01431161.2015.1070325>

- Schoonenboom, J., & Johnson, R. B. (2017). How to Construct a Mixed Methods Research Design. *Kolner Zeitschrift Fur Soziologie Und Sozialpsychologie*, 69(Suppl 2), 107–131. <https://doi.org/10.1007/s11577-017-0454-1>
- Sen, S., Fernandéz, J. P. R. M.-R., & Roesler, J. (2020). Reflective Parking Lots for Microscale Urban Heat Island Mitigation. *Transportation Research Record*, 2674(8), 663–671. <https://doi.org/10.1177/0361198120919401>
- Shafizadeh-Moghadam, H., Weng, Q., Liu, H., & Valavi, R. (2020). Modeling the spatial variation of urban land surface temperature in relation to environmental and anthropogenic factors: A case study of Tehran, Iran. *GIScience & Remote Sensing*, 57(4), 483–496. <https://doi.org/10.1080/15481603.2020.1736857>
- Shahrestani, M., Yao, R., Luo, Z., Turkbeyler, E., & Davies, H. (2015). A field study of urban microclimates in London. *Renewable Energy*, 73, 3–9. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.05.061>
- Sharifi, E., & Lehmann, S. (2014). *Comparative analysis of surface urban heat island effect in central Sydney*. <https://doi.org/10.5539/jsd.v7n3p23>
- Sharifi, E., & Lehmann, S. (2015). Correlation analysis of surface temperature of rooftops, streetscapes and urban heat island effect: case study of central Sydney. *Journal of Urban and Environmental Engineering*, 9(1), 3–11.
- Sharifi, E., Sivam, A., & Boland, J. (2016). Resilience to heat in public space: A case study of Adelaide, South Australia. *Journal of Environmental Planning and Management*, 59(10), 1833–1854. <https://doi.org/10.1080/09640568.2015.1091294>
- Shashua-Bar, L., & Hoffman, M. E. (2002). - Quantitative evaluation of the effects of built-up geometry and trees on diurnal air temperature in canyon-type courtyards. W M. Anson, J. M. Ko, & E. S. S. Lam (Red.), *Advances in Building Technology* (s. 1493–1500). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-008044100-9/50185-6>
- Shashua-Bar, L., Pearlmutter, D., & Erell, E. (2009). The cooling efficiency of urban landscape strategies in a hot dry climate. *Landscape and Urban Planning*, 92(3), 179–186. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2009.04.005>

- Shashua-Bar, L., Potchter, O., Bitan, A., Boltansky, D., & Yaakov, Y. (2010). Microclimate modelling of street tree species effects within the varied urban morphology in the Mediterranean city of Tel Aviv, Israel. *International Journal of Climatology*, *30*(1), 44–57. Scopus. <https://doi.org/10.1002/joc.1869>
- Shashua-Bar, L., Tsiros, I. X., & Hoffman, M. (2012). Passive cooling design options to ameliorate thermal comfort in urban streets of a Mediterranean climate (Athens) under hot summer conditions. *Building and Environment*, *57*, 110–119. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.04.019>
- Shashua-Bar, L., Tzimir, Y., & Hoffman, M. E. (2004). Thermal effects of building geometry and spacing on the urban canopy layer microclimate in a hot-humid climate in summer. *International Journal of Climatology*, *24*(13), 1729–1742. <https://doi.org/10.1002/joc.1092>
- Shiflett, S. A., Liang, L. L., Crum, S. M., Feyisa, G. L., Wang, J., & Jenerette, G. D. (2017). Variation in the urban vegetation, surface temperature, air temperature nexus. *Science of The Total Environment*, *579*, 495–505. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.11.069>
- Shimazaki, Y., Aoki, M., Nitta, J., Okajima, H., & Yoshida, A. (2021). Experimental Determination of Pedestrian Thermal Comfort on Water-Retaining Pavement for UHI Adaptation Strategy. *Atmosphere*, *12*(2), Article 2. <https://doi.org/10.3390/atmos12020127>
- Shou, Y., & Zhang, D.-L. (2012). Recent advances in understanding urban heat island effects with some future prospects. *Acta Meteorologica Sinica*, *70*(3), 338–353. Scopus.
- Smith, C. L., Webb, A., Levermore, G. J., Lindley, S. J., & Beswick, K. (2011). Fine-scale spatial temperature patterns across a UK conurbation. *Climatic Change*, *109*(3), 269–286. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0021-0>
- Song, U., Kim, E., Bang, J. H., Son, D. J., Waldman, B., & Lee, E. J. (2013). Wetlands are an effective green roof system. *Building and Environment*, *66*, 141–147. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.04.024>

- Spronken-Smith, R. A., & Oke, T. R. (1999). Scale modelling of nocturnal cooling in urban parks. *Boundary-Layer Meteorology*, *93*(2), 287–312. Scopus. <https://doi.org/10.1023/A:1002001408973>
- Steenefeld, G. J., Koopmans, S., Heusinkveld, B. G., & Theeuwes, N. E. (2014). Refreshing the role of open water surfaces on mitigating the maximum urban heat island effect. *Landscape and Urban Planning*, *121*, 92–96. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2013.09.001>
- Stewart, I. D. (2011). A systematic review and scientific critique of methodology in modern urban heat island literature. *International Journal of Climatology*, *31*(2), 200–217. <https://doi.org/10.1002/joc.2141>
- Stojakovic, V., Bajanski, I., Savic, S., Milosevic, D., & Tepavcevic, B. (2020). The influence of changing location of trees in urban green spaces on insolation mitigation. *Urban Forestry & Urban Greening*, *53*, 126721. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2020.126721>
- Sugie, L., Jaehyun, H., & Hyemin, C. (2017). Spatial and Temporal Effects of Built Environment on Urban Air Temperature in Seoul City, Korea: An Application of Spatial Regression Models. *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, *16*(1), Article 1. <https://doi.org/10.3130/jaabe.16.123>
- Sun, C.-Y. (2011). A street thermal environment study in summer by the mobile transect technique. *Theoretical and Applied Climatology*, *106*(3), 433–442. <https://doi.org/10.1007/s00704-011-0444-6>
- Sun, F., Liu, M., Wang, Y., Wang, H., & Che, Y. (2020). The effects of 3D architectural patterns on the urban surface temperature at a neighborhood scale: Relative contributions and marginal effects. *Journal of Cleaner Production*, *258*, 120706. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120706>
- Sun, Y., Gao, C., Li, J., Wang, R., & Liu, J. (2019). Quantifying the Effects of Urban Form on Land Surface Temperature in Subtropical High-Density Urban Areas Using Machine Learning. *Remote Sensing*, *11*(8), Article 8. <https://doi.org/10.3390/rs11080959>

- Suomi, J., & Käyhkö, J. (2012). The impact of environmental factors on urban temperature variability in the coastal city of Turku, SW Finland. *International Journal of Climatology*, 32(3), 451–463. <https://doi.org/10.1002/joc.2277>
- Susca, T. (2012). Multiscale Approach to Life Cycle Assessment. *Journal of Industrial Ecology*, 16(6), 951–962. <https://doi.org/10.1111/j.1530-9290.2012.00560.x>
- Swanson, E. (2006). *World development indicators 2006*. <https://policycommons.net/artifacts/1519591/world-development-indicators-2006/2199923/>
- Taha, H. (1997). Urban climates and heat islands: Albedo, evapotranspiration, and anthropogenic heat. *Energy and Buildings*, 25(2), 99–103. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(96\)00999-1](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(96)00999-1)
- Takebayashi, H. (2017). Influence of Urban Green Area on Air Temperature of Surrounding Built-Up Area. *Climate*, 5(3), Article 3. <https://doi.org/10.3390/cli5030060>
- Takebayashi, H., & Moriyama, M. (2012). Relationships between the properties of an urban street canyon and its radiant environment: Introduction of appropriate urban heat island mitigation technologies. *Solar Energy*, 86(9), 2255–2262. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2012.04.019>
- Taleb, D., & Abu-Hijleh, B. (2013). Urban heat islands: Potential effect of organic and structured urban configurations on temperature variations in Dubai, UAE. *Renewable Energy*, 50, 747–762. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2012.07.030>
- Taleghani, M. (2018a). Outdoor thermal comfort by different heat mitigation strategies- A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81, 2011–2018. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.06.010>
- Taleghani, M. (2018b). The impact of increasing urban surface albedo on outdoor summer thermal comfort within a university campus. *Urban Climate*, 24, 175–184. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2018.03.001>
- Taleghani, M., Kleerekoper, L., Tenpierik, M., & Dobbelsteen, A. (2014). Outdoor thermal comfort within five different urban forms in The Netherlands. *Building and Environment*, 83. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.03.014>

- Taleghani, M., Sailor, D. J., Tenpierik, M., & van den Dobbelen, A. (2014). Thermal assessment of heat mitigation strategies: The case of Portland State University, Oregon, USA. *Building and Environment*, *73*, 138–150. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.12.006>
- Taleghani, M., Tenpierik, M., van den Dobbelen, A., & Sailor, D. J. (2014). Heat in courtyards: A validated and calibrated parametric study of heat mitigation strategies for urban courtyards in the Netherlands. *Solar Energy*, *103*, 108–124. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2014.01.033>
- Tan, Z., Lau, K. K.-L., & Ng, E. (2016). Urban tree design approaches for mitigating daytime urban heat island effects in a high-density urban environment. *Energy and Buildings*, *114*, 265–274. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.06.031>
- Targhi, M. Z., & Van Dessel, S. (2015). Potential Contribution of Urban Developments to Outdoor Thermal Comfort Conditions: The Influence of Urban Geometry and Form in Worcester, Massachusetts, USA. *Procedia Engineering*, *118*, 1153–1161. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.457>
- Tashakkori, A., & Creswell, J. W. (2007). The new era of mixed methods. *Journal of mixed methods research*, *1*(1), 3–7.
- Teichmann, F., Baumgartner, C. M., Horvath, A., Luisser, M., & Korjenic, A. (2021). Simulation of urban microclimate with uhiSolver: Software validation using simplified material data. *Ecological Processes*, *10*, 1–23.
- Theeuwes, N. E., Solcerová, A., & Steeneveld, G. J. (2013). Modeling the influence of open water surfaces on the summertime temperature and thermal comfort in the city. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, *118*(16), 8881–8896. <https://doi.org/10.1002/jgrd.50704>
- Thorsson, S., Lindberg, F., Björklund, J., Holmer, B., & Rayner, D. (2011). Potential changes in outdoor thermal comfort conditions in Gothenburg, Sweden due to climate change: The influence of urban geometry. *International Journal of Climatology*, *31*(2), Article 2. <https://doi.org/10.1002/joc.2231>

- Tian, Y., Bai, X., Qi, B., & Sun, L. (2017). Study on heat fluxes of green roofs based on an improved heat and mass transfer model. *Energy and Buildings*, *152*, 175–184. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.07.021>
- Tominaga, Y., Sato, Y., & Sadohara, S. (2015). CFD simulations of the effect of evaporative cooling from water bodies in a micro-scale urban environment: Validation and application studies. *Sustainable Cities and Society, Complete*(19), 259–270. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2015.03.011>
- Tong, S., Wong, N. H., Jusuf, S. K., Tan, C. L., Wong, H. F., Ignatius, M., & Tan, E. (2018). Study on correlation between air temperature and urban morphology parameters in built environment in northern China. *Building and Environment*, *127*, 239–249. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.11.013>
- Tremeac, B., Bousquet, P., de Munck, C., Pigeon, G., Masson, V., Marchadier, C., Merchat, M., Poeuf, P., & Meunier, F. (2012). Influence of air conditioning management on heat island in Paris air street temperatures. *Applied Energy*, *95*, 102–110. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.02.015>
- Tsilini, V., Papantoniou, S., Kolokotsa, D.-D., & Maria, E.-A. (2015). Urban gardens as a solution to energy poverty and urban heat island. *Sustainable Cities and Society*, *14*, 323–333. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2014.08.006>
- Tsoka, S., Tsikaloudaki, K., & Theodosiou, T. (2017). Urban space's morphology and microclimatic analysis: A study for a typical urban district in the Mediterranean city of Thessaloniki, Greece. *Energy and Buildings*, *156*, 96–108. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.09.066>
- Tudiwer, D., & Korjenic, A. (2017). The effect of living wall systems on the thermal resistance of the façade. *Energy and Buildings*, *135*, 10–19. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.11.023>
- Turner, M. G. (2005). Landscape Ecology: What Is the State of the Science? *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, *36*(1), 319–344. <https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.36.102003.152614>



- Uchwała 1. (2015). *Uchwała nr 213 Rady Ministrów z 6 listopada 2015 w sprawie zatwierdzenia „Programu ochrony i zrównoważonego użytkowania różnorodności biologicznej wraz z Planem działań na lata 2015-2020*. <https://isap.sejm.gov.pl/isap.nsf/DocDetails.xsp?id=WMP20150001207>
- Unger, J. (2006). Modelling of the annual mean maximum urban heat island using 2D and 3D surface parameters. *Climate Research*, 30(3), 215–226. <https://doi.org/10.3354/cr030215>
- Ustawa 1. (2003). *Ustawa z dnia 27 marca 2003 r. O planowaniu i zagospodarowaniu przestrzennym*. <https://isap.sejm.gov.pl/isap.nsf/DocDetails.xsp?id=wdu20030800717>
- Vargas-Nordbeck, A., & Timm, D. H. (2012). *Evaluation of Pavement Temperatures of Various Pavement Sections*. 782–791. [https://doi.org/10.1061/41167\(398\)75](https://doi.org/10.1061/41167(398)75)
- Vartholomaios, A. (2017). A parametric sensitivity analysis of the influence of urban form on domestic energy consumption for heating and cooling in a Mediterranean city. *Sustainable Cities and Society*, 28, 135–145. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2016.09.006>
- Vaz Monteiro, M., Blanuša, T., Verhoef, A., Richardson, M., Hadley, P., & Cameron, R. W. F. (2017). Functional green roofs: Importance of plant choice in maximising summertime environmental cooling and substrate insulation potential. *Energy and Buildings*, 141, 56–68. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.02.011>
- Vaz Monteiro, M., Doick, K. J., Handley, P., & Peace, A. (2016). The impact of greenspace size on the extent of local nocturnal air temperature cooling in London. *Urban Forestry & Urban Greening*, 16, 160–169. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2016.02.008>
- Völker, S., Baumeister, H., Claßen, T., Hornberg, C., & Kistemann, T. (2013). Evidence for the temperature-mitigating capacity of urban blue space – a health geographic perspective. *Erdkunde*, 67(04), 355–371. <https://doi.org/10.3112/erdkunde.2013.04.05>
- Wallenberg, N., Lindberg, F., & Rayner, D. (2022). Locating trees to mitigate outdoor radiant load of humans in urban areas using a metaheuristic hill-climbing algorithm—introducing TreePlanter v1. 0. *Geoscientific Model Development*, 15(3), 1107–1128.

- Wang, W., & Ng, E. (2018). Large-eddy simulations of air ventilation in parametric scenarios: Comparative studies of urban form and wind direction. *Architectural Science Review*, 61(4), 215–225. <https://doi.org/10.1080/00038628.2018.1481359>
- Wang, Y., Bakker, F., de Groot, R., Wörtche, H., & Leemans, R. (2015). Effects of urban green infrastructure (UGI) on local outdoor microclimate during the growing season. *Environmental Monitoring and Assessment*, 187(12), 732. <https://doi.org/10.1007/s10661-015-4943-2>
- Wang, Y., Li, Y., Xue, Y., Martilli, A., Shen, J., & Chan, P. W. (2020). City-scale morphological influence on diurnal urban air temperature. *Building and Environment*, 169, 106527. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106527>
- Wang, Y., Zhang, Y., Ding, N., Qin, K., & Yang, X. (2020). Simulating the Impact of Urban Surface Evapotranspiration on the Urban Heat Island Effect Using the Modified RS-PM Model: A Case Study of Xuzhou, China. *Remote Sensing*, 12(3), Article 3. <https://doi.org/10.3390/rs12030578>
- Wei, R., Song, D., Wong, N. H., & Martin, M. (2016). Impact of Urban Morphology Parameters on Microclimate. *Procedia Engineering*, 169, 142–149. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.10.017>
- Weng, Q., Liu, H., Liang, B., & Lu, D. (2008). The Spatial Variations of Urban Land Surface Temperatures: Pertinent Factors, Zoning Effect, and Seasonal Variability. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 1(2), 154–166. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2008.917869>
- Wong, K. V., Paddon, A., & Jimenez, A. (2013). Review of World Urban Heat Islands: Many Linked to Increased Mortality. *Journal of Energy Resources Technology*, 135(022101). <https://doi.org/10.1115/1.4023176>
- Wong, M. S., Nichol, J., & Lee, K.-H. (2010). A Satellite View of Urban Heat Island: Causative Factors and Scenario Analysis. *Korean Journal of Remote Sensing*, 26(6), 617–627.

- Wu, C., Li, J., Wang, C., Song, C., Chen, Y., Finka, M., & La Rosa, D. (2019). Understanding the relationship between urban blue infrastructure and land surface temperature. *Science of The Total Environment*, 694, 133742. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.133742>
- Xi, C., Ren, C., Wang, J., Feng, Z., & Cao, S.-J. (2021). Impacts of urban-scale building height diversity on urban climates: A case study of Nanjing, China. *Energy and Buildings*, 251, 111350. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111350>
- Xiao, J. Y., Ji, N., Li, X., Yu, L. X., & Ji, F. (2015). Cooling effect of city parks—a case of Shijiazhuang. *J. Arid. Landsc. Res. Environ.*, 29(2), 75–79. Scopus.
- Xu, D., Zhou, D., Wang, Y., Xu, W., & Yang, Y. (2019). Field measurement study on the impacts of urban spatial indicators on urban climate in a Chinese basin and static-wind city. *Building and Environment*, 147, 482–494. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.10.042>
- Yahia, M. W., & Johansson, E. (2013). Influence of urban planning regulations on the microclimate in a hot dry climate: The example of Damascus, Syria. *Journal of Housing and the Built Environment*, 28(1), 51–65. <https://doi.org/10.1007/s10901-012-9280-y>
- Yan, H.-Y., Vorontsov, V. A., & Dye, D. (2014). Alloying effects in polycrystalline  $\gamma'$  strengthened Co–Al–W base alloys. *Intermetallics*, 48, 44–53. <https://doi.org/10.1016/j.intermet.2013.10.022>
- Yang, F., Lau, S. S. Y., & Qian, F. (2010). Summertime heat island intensities in three high-rise housing quarters in inner-city Shanghai China: Building layout, density and greenery. *Building and Environment*, 45(1), 115–134. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.05.010>
- Yang, F., Lau, S. S. Y., & Qian, F. (2011). Urban design to lower summertime outdoor temperatures: An empirical study on high-rise housing in Shanghai. *Building and Environment*, 46(3), 769–785. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.10.010>
- Yang, G., Yu, Z., Jørgensen, G., & Vejre, H. (2020). How can urban blue-green space be planned for climate adaption in high-latitude cities? A seasonal perspective. *Sustainable Cities and Society*, 53, 101932. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101932>

- Yang, J., Menenti, M., Wu, Z., Wong, M. S., Abbas, S., Xu, Y., & Shi, Q. (2021). Assessing the impact of urban geometry on surface urban heat island using complete and nadir temperatures. *International Journal of Climatology*, *41*(S1), E3219–E3238. <https://doi.org/10.1002/joc.6919>
- Yang, J., Shi, Q., Menenti, M., Wong, M. S., Wu, Z., Zhao, Q., Abbas, S., & Xu, Y. (2021). Observing the impact of urban morphology and building geometry on thermal environment by high spatial resolution thermal images. *Urban Climate*, *39*, 100937. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2021.100937>
- Yang, J., Wong, M. S., Menenti, M., & Nichol, J. (2015). Study of the geometry effect on land surface temperature retrieval in urban environment. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, *109*, 77–87. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2015.09.001>
- Yang, J., Zhan, Y., Xiao, X., Xia, J. C., Sun, W., & Li, X. (2020). Investigating the diversity of land surface temperature characteristics in different scale cities based on local climate zones. *Urban Climate*, *34*, 100700. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2020.100700>
- Yang, S., Zhou, D., Wang, Y., & Li, P. (2020). Comparing impact of multi-factor planning layouts in residential areas on summer thermal comfort based on orthogonal design of experiments (ODOE). *Building and Environment*, *182*, 107145. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107145>
- Yang, X., & Li, Y. (2015). The impact of building density and building height heterogeneity on average urban albedo and street surface temperature. *Building and Environment*, *90*, 146–156. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.03.037>
- Yang, X.-S. (2011). Metaheuristic Optimization. *Scholarpedia*, *6*(8), 11472. <https://doi.org/10.4249/scholarpedia.11472>
- Yang, Y. K., Kang, I. S., Chung, M. H., Kim, S., & Park, J. C. (2017). Effect of PCM cool roof system on the reduction in urban heat island phenomenon. *Building and Environment*, *122*, 411–421. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.06.015>

- Yang, Y., Zhang, X., Lu, X., Hu, J., Pan, X., Zhu, Q., & Su, W. (2017). Effects of Building Design Elements on Residential Thermal Environment. *Sustainability*, *10*(1), 1–15.
- Yin, H., Kong, F., Middel, A., Dronova, I., Xu, H., & James, P. (2017). Cooling effect of direct green façades during hot summer days: An observational study in Nanjing, China using TIR and 3DPC data. *Building and Environment*, *116*, 195–206. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.02.020>
- Yin, S., & Xiao, Y. (2016). Scale Study of Traditional Shophouse Street in South of China Based on Outdoor Thermal Comfort. *Procedia Engineering*, *169*, 232–239. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.10.028>
- Yin, S., Lang, W., & Xiao, Y. (2019). The synergistic effect of street canyons and neighbourhood layout design on pedestrian-level thermal comfort in hot-humid area of China. *Sustainable Cities and Society*, *49*, 101571. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101571>
- Yu, Z., Yang, G., Zuo, S., Jørgensen, G., Koga, M., & Vejre, H. (2020). Critical review on the cooling effect of urban blue-green space: A threshold-size perspective. *Urban Forestry & Urban Greening*, *49*, 126630. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2020.126630>
- Yuan, C., & Ng, E. (2012). Building porosity for better urban ventilation in high-density cities – A computational parametric study. *Building and Environment*, *50*, 176–189. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.10.023>
- Yuan, J., Yamanaka, T., Kobayashi, T., Kitakaze, H., & Emura, K. (2019). Effect of highly reflective building envelopes on outdoor environment temperature and indoor thermal loads using CFD and numerical analysis. *E3S Web of Conferences*, *111*, 06031. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201911106031>
- Zajic, D., Fernando, H. J. S., Calhoun, R., Princevac, M., Brown, M. J., & Pardyjak, E. R. (2011). Flow and Turbulence in an Urban Canyon. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, *50*(1), 203–223. <https://doi.org/10.1175/2010JAMC2525.1>
- Zhang, J., Gou, Z., Lu, Y., & Lin, P. (2019). The impact of sky view factor on thermal environments in urban parks in a subtropical coastal city of Australia. *Urban Forestry & Urban Greening*, *44*, 126422. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2019.126422>

- Zhang, M., & Gao, Z. (2021). Effect of urban form on microclimate and energy loads: Case study of generic residential district prototypes in Nanjing, China. *Sustainable Cities and Society*, *70*, 102930. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.102930>
- Zhang, X., Estoque, R. C., & Murayama, Y. (2017). An urban heat island study in Nanchang City, China based on land surface temperature and social-ecological variables. *Sustainable Cities and Society*, *32*, 557–568. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2017.05.005>
- Zhang, Y., Du, X., & Shi, Y. (2017). Effects of street canyon design on pedestrian thermal comfort in the hot-humid area of China. *International Journal of Biometeorology*, *61*(8), 1421–1432. <https://doi.org/10.1007/s00484-017-1320-6>
- Zhang, Z., Lv, Y., & Pan, H. (2013). Cooling and humidifying effect of plant communities in subtropical urban parks. *Urban Forestry & Urban Greening*, *12*(3), 323–329. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2013.03.010>
- Zhao, H., Zhang, H., Miao, C., Ye, X., & Min, M. (2018). Linking Heat Source–Sink Landscape Patterns with Analysis of Urban Heat Islands: Study on the Fast-Growing Zhengzhou City in Central China. *Remote Sensing*, *10*(8), Article 8. <https://doi.org/10.3390/rs10081268>
- Zhao, L., Lee, X., Smith, R. B., & Oleson, K. (2014). Strong contributions of local background climate to urban heat islands. *Nature*, *511*(7508), 216–219. <https://doi.org/10.1038/nature13462>
- Zhao, Q., Wentz, E. A., & Murray, A. T. (2017). Tree shade coverage optimization in an urban residential environment. *Building and Environment*, *115*, 269–280. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.01.036>
- Zhou, L., Shi, W., Xue, W., Wang, T., Ge, Z., Zhou, H., & Zhong, Y. (2005). Relationship between vegetation structure and the temperature and moisture in urban green spaces of Shanghai. *Chinese Journal of Ecology*, *24*(9), 1102–1105. Scopus.
- Zhou, W., & Cao, F. (2020). Effects of changing spatial extent on the relationship between urban forest patterns and land surface temperature. *Ecological Indicators*, *109*, 105778. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.105778>

- Zhou, W., Huang, G., & Cadenasso, M. L. (2011). Does spatial configuration matter? Understanding the effects of land cover pattern on land surface temperature in urban landscapes. *Landscape and Urban Planning*, *102*(1), 54–63. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2011.03.009>
- Zhu, C., Li, S., Ji, P., Ren, B., & Li, X. (2011). Effects of the different width of urban green belts on the temperature and humidity. *Shengtai Xuebao/ Acta Ecologica Sinica*, *31*, 383–394.
- Zwoliński, A., & Wochna, A. (2021). Analytical Study of the Impact of Greenery and Public Space Distribution on Land Surface Temperature in Mid-Size Cities of Poland. A. Globa, J. van Ameijde, A. Fingrut, N. Kim, T.T.S. Lo (eds.), *PROJECTIONS - Proceedings of the 26th CAADRIA Conference - Volume 2, The Chinese University of Hong Kong and Online, Hong Kong, 29 March - 1 April 2021*, pp. 437-446. [http://papers.cumincad.org/cgi-bin/works/BrowseAZname=authors/Show?caadria2021\\_202](http://papers.cumincad.org/cgi-bin/works/BrowseAZname=authors/Show?caadria2021_202)
- Žuvela-Aloise, M., Koch, R., Buchholz, S., & Früh, B. (2016). Modelling the potential of green and blue infrastructure to reduce urban heat load in the city of Vienna. *Climatic Change*, *135*(3), 425–438. <https://doi.org/10.1007/s10584-016-1596-2>

## Wykaz tabel

- Tab. 1.** Klasyfikacja dominacji badanych danych parametrycznych
- Tab. 2.** Parametry statystyczne dla analizy CCA w klasie obiektów BE
- Tab. 3.** Parametry statystyczne dla analizy CCA w klasie obiektów BGI
- Tab.4.** Parametry predestynowane do budowy modelu i wybrane do dalszych badań
- Tab. 5.** Wskaźniki produktów i wyników pośrednich uzyskanych w projekcie
- Tab. 6.** Analiza parametrów jakościowych konkurencyjnych produktów dostępnych na rynku w porównaniu do projektowanej technologii
- Tab. 7.** Bariery wejścia na rynek i ich potencjalne rozwiązania
- Tab. 8.** Liczebność grup docelowych oraz ich zapotrzebowanie rynkowe
- Tab. 9.** Struktura kosztów poniesionych na utrzymanie operacyjności systemu informatycznego



## Wykaz rycin

- Ryc. 1.** Rozkład profilu termicznego w ekosystemie miejskim w zależności od poziomu zurbanizowania przestrzeni
- Ryc. 2.** Przewidywana roczna liczba zgonów spowodowanych stresem ciepła w Polsce, w kolejnych dekadach XXI w. względem różnych scenariuszy rozwoju cywilizacji (SRES)
- Ryc. 3.** Wpływ czynników możliwych do kontrolowania z poziomu planowania przestrzennego na zmiany temperatury w mieście
- Ryc. 4.** Generalna zasada działania programów wspierających decyzyjność w zakresie mitygacji efektu UHI
- Ryc. 5.** Dualna natura działania algorytmów metaheurystycznych
- Ryc. 6.** Diagram logiczny hipotez badawczych na tle celów cząstkowych i etapów technologicznych
- Ryc. 7.** Zagęszczenie osad ludzkich na tle klimatu umiarkowanego
- Ryc. 8.** Schemat logiczny wyboru publikacji do przeglądu parametrów BE i BGI mogących mieć wpływ na modyfikację intensywności efektu UHI
- Ryc. 9.** Układ logiczny hierarchii osadzenia elementów miejskiego ekosystemu w obszarze niezurbanizowanym na tle siły wpływu obiektów na środowisko termiczne
- Ryc. 10.** Rodzaje jednostek architektoniczno-urbanistycznych odpowiadające głównym skalom przestrzenno-krajobrazowym w ekosystemie miejskim
- Ryc. 11.** Rodzaje obiektów błękitno-zielonej infrastruktury na tle głównych skali przestrzenno-krajobrazowych i synergii zachodzących pomiędzy jednostkami architektoniczno-urbanistycznymi w nich osadzonymi
- Ryc. 12.** Reprezentacja logiczna efektu synergii zachodzącego pomiędzy parametrami gęstości zabudowy i powierzchni ekosystemu miejskiego na tle korelacji z intensywnością efektu UHI
- Ryc. 13.** Rodzaje lokalnych stref klimatycznych w zależności od typu zabudowy i pokrycia terenu
- Ryc. 14.** Porównanie albedo
- Ryc. 15.** Porównanie materiałów o różnych właściwościach odbić promieniowania krótkofalowego

- Ryc. 16.** Reprezentacja logiczna przestrzeni rozwiązań modyfikacji trzech parametrów geometrycznych dla budynku
- Ryc. 17.** Rodzaj dachów zielonych w zależności od technologii wykonania warstw
- Ryc. 18.** Zależność wpływu wysokości budynku na zasięg i siłę optymalizacji PET na poziomie pieszego dla budynku
- Ryc. 19.** Podstawowe rodzaje zieleni wertykalnej
- Ryc. 20.** Wartość wskaźnika pokrycia liśćmi (LAI) w zależności od procentu pokrycia całkowitej powierzchni ściany lub fasady zielonej i liczby warstw liści
- Ryc. 21.** Współczynnik proporcji dla kanionu miejskiego:
- Ryc. 22.** Wpływ geometrii powierzchni kanionu na wzorce wiatrów
- Ryc. 23.** Orientacja osi ulicy w stosunku do przebiegu ścieżki słonecznej
- Ryc. 24.** Wpływ geometrii kanionu o orientacji N-S na temperaturę w kanionie
- Ryc. 25.** Wpływ geometrii kanionu o orientacji E-W na temperaturę w kanionie
- Ryc. 26.** Wpływ konstrukcji drzewa na natężenie ewapotranspiracji i ilość rzucanego cienia
- Ryc. 27.** Wpływ parametrów związanych z zagęszczeniem drzew w kanionie na natężenie ewapotranspiracji, ilość rzucanego cienia oraz efekt pułapkowania termalnego
- Ryc. 28.** Wpływ parametrów lokalizacyjnych drzew w kanionie na intensywność chłodzenia wyparnego
- Ryc. 29.** Ustawienie różnych wartości parametru powierzchni zabudowy
- Ryc. 30.** Wpływ różnych konfiguracji przestrzennych na mikroklimat jednostki urbanistycznej
- Ryc. 31.** Reprezentacja przestrzenna zmian linearności bloków w jednostce urbanistycznej
- Ryc. 32.** Zmiana intensywności oddziaływania parametru gęstości zabudowy na temperaturę powietrza w zależności od pory dnia i rodzaju materiału dna jednostki sąsiedzkiej
- Ryc. 33.** Reprezentacja przestrzenna zmiany gęstości zabudowy drogami i liczby węzłów komunikacyjnych oraz przepustowości dróg dla tej samej gęstości
- Ryc. 34.** Reprezentacja przestrzenna zmian parametrów związanych z wysokością budynków

- Ryc. 35.** Reprezentacja przestrzenna zmian parametrów terenów zieleni związanych z wielkością pokrycia przy wysokim stężeniu zwartości, linearyzacją rozkładu, amorficznością rozkładu, randomizacją rozproszenia, regulacją rozproszenia
- Ryc. 36.** Zmiana intensywności oddziaływania na siłę ewapotranspiracji i prędkość powietrza w zależności od modyfikacji parametru gęstości terenu zieleni
- Ryc. 37.** Zmiana intensywności oddziaływania na ewapotranspirację w zależności od modyfikacji parametru gęstości zabudowy otoczenia terenu zieleni
- Ryc. 38.** Wpływ parametrów dotyczących różnych relacji przestrzennych między terenami zieleni a otaczającą zabudową na mikroklimat jednostki urbanistycznej
- Ryc. 39.** Wpływ wielkości powierzchni obiektu wodnego na intensywność ewaporacji z powierzchni obiektu wodnego
- Ryc. 40.** Wpływ wartości różnych parametrów obiektów wodnych na mikroklimat jednostki urbanistycznej
- Ryc. 41.** Wpływ na mikroklimat jednostki urbanistycznej parametrów dotyczących różnych relacji przestrzennych pomiędzy obiektami wodnymi a otaczającą zabudową
- Ryc. 42.** Częstotliwość cytowań rodzin parametrów w artykułach naukowych opisujących wpływ obiektów BE i BGI na środowisko termiczne ekosystemu miejskiego
- Ryc. 43.** Analiza kanonicznej analizy zgodności (CCA) ( $n = 948$ ). Rozkład częstotliwości badań nad rodzinami parametrów obiektów z klasy BE na tle krajów, w których były prowadzone (na podstawie prac włączonych do analiz).
- Ryc. 44.** Kanoniczna analiza zgodności (CCA) ( $n = 167$ ). Rozkład częstotliwości badań nad rodzinami parametrów obiektów z klasy BGI na tle krajów, w których były prowadzone (na podstawie prac włączonych do analiz).
- Ryc. 45.** Składowe ekosystemu miejskiego tworzące środowisko termiczne w danych skalach
- Ryc. 46.** Kontrowersyjny pod względem wpływu na mikroklimat centrum miasta projekt parku biurowo-mieszkaniowego „Nowy Rynek”.
- Ryc. 47.** Podstawowy, dwubarwny znak towarowy produktu „PHYSIS”
- Ryc. 48.** Wykres wzrostu wartości poszczególnych nisz rynku Smart City w czasie

**Ryc. 49.** Rycina zawarta w broszurze informacyjnej programu „ENVI-met” reprezentująca graficzny wynik obniżenia temperatury

## Wykaz załączników

- Załącznik 1.** Wystąpienia w literaturze przedmiotu parametrów obiektów zlokalizowanych w miejskim ekosystemie modyfikujących jego środowisko termiczne
- Załącznik 2.** Parametryczny model środowiska termicznego ekosystemu miejskiego
- Załącznik 3.** Parametry modelu środowiska termicznego ekosystemu miejskiego w skali budynku wraz z wytycznymi i warunkami ich optymalizacji
- Załącznik 4.** Parametry modelu środowiska termicznego ekosystemu miejskiego w skali kanionu ulicznego wraz z wytycznymi i warunkami ich optymalizacji
- Załącznik 5.** Parametry modelu środowiska termicznego ekosystemu miejskiego w skali jednostki sąsiedzkiej wraz z wytycznymi i warunkami ich optymalizacji
- Załącznik 6.** Ograniczenia optymalizacyjne środowiska termicznego ekosystemu miejskiego wynikające z polskich aktów prawnych
- Załącznik 7.** Schemat blokowy algorytmu „PHYSIS”
- Załącznik 8.** Mgr inż. arch. kraj. Patryk Antoszewski – Życiorys naukowy
- Załącznik 9.** Oferta na przygotowanie rozwiązań algorytmicznych i programistycznych dla Uniwersytetu Przyrodniczego w Poznaniu
- Załącznik 10.** Parametry wybrane do badań terenowych i struktura planowanych badań
- Załącznik 11.** Harmonogram projektu
- Załącznik 12.** Alokacja zasobów technicznych i nietechnicznych niezbędnych do wykorzystania w poszczególnych zadaniach projektowych
- Załącznik 13.** Alokacja zasobów ludzkich w poszczególnych zadaniach projektu oraz budżet projektu
- Załącznik 14.** Wpływ wyników projektu na realizację celów zrównoważonego rozwoju (SDG)
- Załącznik 15.** Propozycje cen zakupu dostępu do usługi „PHYSIS” dla grup docelowych oraz proponowane strumienie przychodów

## Załącznik 1.

### A1. Wystąpienia w literaturze przedmiotu parametrów obiektów zlokalizowanych w miejskim ekosystemie modyfikujących jego środowisko termiczne

(źródło: opracowanie własne na podstawie (Antoszewski i in., 2020, 2022))

<i>Rodzaj obiektu</i>	<i>Rodzina parametrów</i>	<i>Parametr</i>	<i>Wystąpienia w literaturze</i>	
Obiekty wodne	-	-	47	
	Geom	-	15	
		Obszar	9	
		Kształt	5	
		Głębokość	1	
	Morfo	-	4	
		Stopień pokrycia brzegów roślinnością	2	
		Stopień utwardzenia brzegu	1	
		Intensywność mieszania wód	1	
	Topo	-	28	
		Odległość od obiektu	4	
		Stopień urbanizacji otoczenia	2	
		Współczynnik widoczności nieba (SVF)	1	
		Geometria zabudowy otoczenia	2	
		Poziom zacienienia przez obiekty znajdujące się w otoczeniu	1	
		Albedo materiałów w otoczeniu	2	
		Przepuszczalność gleby w otoczeniu	1	
		Położenie względem układu ulic	1	
		Ekspozycja na wiatr	6	
		Połączenie z głównym korytarzem wiatrowym	1	
		Prędkość wiatru nad obiektem	1	
		Połączenie z innym obiektem BGI	1	
		Odległość do najbliższego obiektu BGI	1	
		Odległość do najbliższego obiektu wodnego	2	
		Obecność lasu w najbliższym otoczeniu	1	
		Gęstość ulistnienia drzew w otoczeniu	1	
	Tereny zieleni powierzchniowej	-	-	231
		Geom	-	51
			Powierzchnia	32
			Kształt	11
			Obwód	2
			Średnica	1
			Gęstość krawędzi	2
			Wysokość dominującego piętra roślinności	1
			Poziom fragmentacji powierzchni	2
			Morfo	-
Procent pokrycia roślinnością				11
Procent pokrycia roślinnością od strony zawietrznej		1		
Typ dominującej zieleni		10		
Ilość pięter zieleni		2		
Dominujący gatunek roślin		2		
Stan zdrowotny roślin		2		
Gęstość sadzenia		4		
Procent pokrycia drzewami		14		
Wzór sadzenia drzew		1		
Charakterystyka morfologiczna gatunku		1		
Gęstość ulistnienia		4		
Indeks pokrycia liśćmi (LAI)		4		
Typ drzew (iglaste/liściaste)		2		
Wysokość korony		2		

<i>Rodzaj obiektu</i>	<i>Rodzina parametrów</i>	<i>Parametr</i>	<i>Wystąpienia w literaturze</i>
		Szerokość korony	3
		Gatunek drzewa	1
		Kolor liści drzewa	1
		Grubość liścia	1
		Tekstura liścia	1
		Wysokość drzewa	3
		Lokalizacja drzew wewnątrz terenu zieleni	1
		Procent pokrycia krzewami	6
		Procent pokrycia trawnikiem	10
		Procent pokrycia gołą glebą	1
		Występowanie obiektów wodnych	5
		Procent pokrycia obiektami wodnymi	6
		Procent pokrycia nieprzepuszczalnymi nawierzchniami	1
		Procent pokrycia infrastrukturą techniczną	5
		Typ ścieżki	1
		Procent pokrycia budynkami	2
		Obecność systemu nawadniania	6
		Powierzchnia nawadnianej przestrzeni	1
		Stopień nasycenia wodą gleby	5
		Czas nawadniania	1
		Albedo nawierzchni	1
		Powierzchnia sumaryczna niskiego albedo	1
		Powierzchnia sumaryczna wysokiego albedo	1
	Topo	-	55
		Odległość do zabudowy	3
		Lokalizacja obiektu względem centrum miasta	2
		Odległość od centrum miasta	2
		Stopień zurbanizowania przestrzeni w jednostce sąsiedzkiej	2
		Gęstość zabudowy w jednostce sąsiedzkiej	5
		Geometria zabudowy w jednostce sąsiedzkiej	2
		Współczynnik proporcji kanionu w jednostce sąsiedzkiej	4
		Wysokość zabudowy w jednostce sąsiedzkiej	2
		Orientacja ulic w jednostce sąsiedzkiej	2
		Orientacja obiektu względem ścieżki słonecznej	1
		Stopień zacielenia przez otaczającą zabudowę	6
		Stopień pokrycia roślinnością jednostki sąsiedzkiej	2
		Stopień pokrycia drzewami jednostki sąsiedzkiej	1
		Stopień pokrycia krzewami jednostki sąsiedzkiej	1
		Stopień pokrycia obiektami wodnymi w jednostce sąsiedzkiej	1
		Stopień pokrycia nieprzepuszczalnymi nawierzchniami w jednostce sąsiedzkiej	1
		Lokalizacja względem głównych kierunków wiatrów	3
		Ilość wiatru docierającego do obiektu	3
		Prędkość wiatru nad obiektem	1
		Rodzaj zieleni od strony zawietrznej	1
		Połączenie obiektu z głównym korytarzem wiatrowym	1
		Powierzchnia pokrycie terenami zieleni w jednostce sąsiedzkiej	2
		Różnorodność terenów zieleni w jednostce sąsiedzkiej	2
		Gęstość pokrycia terenami zieleni w jednostce sąsiedzkiej	1
		Odległość od najbliższego obiektu BGI w jednostce sąsiedzkiej	2
		Połączenie z innym obiektem BGI	2
		Powierzchnia największego obiektu BGI w jednostce sąsiedzkiej	1

<i>Rodzaj obiektu</i>	<i>Rodzina parametrów</i>	<i>Parametr</i>	<i>Wystąpienia w literaturze</i>	
Zieleń przyuliczna	-	-	110	
	Geom	-	26	
		Powierzchnia	3	
		Kształt korony	1	
		Wysokość drzewa	6	
		Wysokość korony	3	
		Szerokość korony	8	
		Wysokość i szerokość pnia	5	
		Morfo	-	39
			Rodzaj roślinności (trawnik, krzewy, drzewa)	1
			Gatunek roślin ogółem	2
	Gatunek drzew		5	
	Stopień dojrzałości drzewa		1	
	Architektura korony		2	
	Wzór sadzenia drzew		1	
	Gęstość nasadzenia drzew		4	
	Obecność systemu nawadniania		1	
	Stopień nasycenia gleby wodą		3	
	Procent pokrycia trawnikiem donicy		1	
	Intensywność przewodności szparkowej		1	
	Indeks pokrycia liśćmi (LAI)		11	
	Powierzchnia rzucanego cienia		2	
	Gęstość korony (LAD)		4	
	Topo		-	45
			Procent pokrycia zielenią kanionu ulicznego	2
		Procent pokrycia drzewami kanionu ulicznego	4	
		Lokalizacja drzew w kanionie ulicznym	3	
		Gęstość zabudowy kanionu ulicznego	1	
		Geometria kanionu ulicznego	5	
		Wysokość kanionu ulicznego	5	
		Szerokość kanionu ulicznego	5	
		Głębokość kanionu ulicznego	1	
		Procent pokrycia kanionu ulicznego nieprzepuszczalnymi nawierzchniami	2	
		Orientacja ulicy w kanionie ulicznym	2	
		Stopień zacielenia kanionu ulicznym	3	
		Ekspozycja drzew na wiatr	3	
		Prędkość wiatru nad obiektem	2	
		Albedo kanionu ulicznego	2	
		Odległość od najbliższych drzew	1	
		Odległość od innych obiektów BGI	2	
	Odległość od centrum miasta	1		
	Natężenie ruchu zależne od funkcji kanionu ulicznego	2		
	Zielone dachy	-	-	121
		Geom	-	20
			Powierzchnia	2
			Grubość warstwy wegetacyjnej	10
			Głębokość wody (dachy wodne i bagienne)	2
Wysokość roślin			6	
Morfo		-	92	
		Technologia wykonania (intensywne, ekstensywne)	4	
		Obecność roślin (dachy wodne)	1	
		Procent pokrycia roślinnością	3	
		Typ roślinności	12	
		Gatunek roślin	5	
		Indeks pokrycia liśćmi (LAI)	12	
	Gęstość sadzenia roślin	2		



<i>Rodzaj obiektu</i>	<i>Rodzina parametrów</i>	<i>Parametr</i>	<i>Wystąpienia w literaturze</i>
		Stan zdrowotny roślin	1
		Typ liścia	1
		Gładkość liścia	1
		Przewodność szparkowa liści	2
		Kolor roślin	4
		Procent pokrycia drzewami	1
		Architektura korony (krzewy, drzewa)	1
		Procent pokrycia trawą	1
		Obecność systemu nawadniania	3
		Rodzaj systemu nawadniania	1
		Jakość wody używanej do nawadniania	1
		Stopień uwodnienia warstwy wegetacyjnej	24
		Rodzaj substratu użytego w warstwie wegetacyjnej	3
		Zagęszczenie substratu	1
		Współczynnik przenikania ciepła przez substrat	1
		Pojemność cieplna substratu	2
		Grubość stropu	1
		Grubość izolacji stropu	1
		Albedo	3
	Topo	-	8
		Wysokość dachu zielonego nad powierzchnią ulicy	2
		Geometria budynków w otoczeniu	1
		Ekspozycja słoneczna dachu zielonego	1
		Prędkość wiatru nad dachem zielonym	1
		Powierzchnia dachów zielonych w otoczeniu	1
		Odległość do najbliższego obiektu BGI	2
Zielone ściany	-	-	59
	Geom	-	15
		Procent pokrycia budynku	8
		Grubość substratu	2
		Grubość warstwy roślinnej	2
		Ojobjętość roślin	2
		Wysokość roślin	1
	Morfo	-	33
		Typ roślinności	1
		Gatunek roślin	1
		Indeks pokrycia liśćmi (LAI)	8
		Gęstość roślinności	3
		Stan zdrowotny roślin	1
		Przewiewność warstwy roślinnej	1
		Obecność szczeliny wentylacyjnej	5
		Wielkość szczeliny wentylacyjnej	2
		Ty substratu	1
		Przewodność cieplna substratu	2
		Zaizolowanie ściany	1
		Grubość izolacji ściany	1
		Obecność nawożenia	1
		Obecność systemu nawadniania	3
		Stopień uwodnienia substratu	1
		Równomierność cykli nawadniania	1
	Topo	-	11
		Orientacja względem ścieżki słonecznej	9
		Odległość do obiektu	1
		Odległość do najbliższego obiektu BGI	1
Jednostki sąsiedzkie	-	-	383
	Geom	-	272
		Powierzchnia działki	1

<i>Rodzaj obiektu</i>	<i>Rodzina parametrów</i>	<i>Parametr</i>	<i>Wystąpienia w literaturze</i>
		Typ działki	1
		Zagęszczenie parceli (PD)	1
		Stopień urbanizacji	6
		Intensywność zabudowy (BI)	6
		Złożoność zabudowy (Cex)	4
		Gęstość krawędzi zabudowy (EDBuild)	1
		Średnia powierzchnia zajmowana przez zabudowę (BF)	2
		Gęstość zabudowy (BD)	74
		Konfiguracja kształtu bloku	1
		Struktura zabudowy	2
		Rozłożenie zabudowy	2
		Wariancja orientacji zabudowy (OV)	1
		Wskaźnik pokrycia budynkami średnimi i wysokimi (CRMB)	1
		Długość bloku	18
		Współczynnik powierzchni budynku (FAR)	1
		Współczynnik powierzchni budynku do powierzchni działki (SAR_St)	1
		Indeks powierzchni fasady (F)	1
		Odchylenie standardowe powierzchni obrysu budynku (StF)	1
		Uśredniony wskaźnik kształtu zabudowy	1
		Indeks powierzchni czołowej (FAI)	2
		Zwartość zabudowy (Com)	1
		Średnia objętość zabudowy (BV)	1
		Średnia objętość zabudowy na piętro (BV/F)	1
		Stosunek objętości zabudowy do objętości drzew (VV2BV)	1
		Stosunek obwodu do powierzchni budynku (FD)	1
		Średnia odległość pomiędzy budynkami (D2B)	1
		Średni stosunek długości do szerokości budynków (LWB)	1
		Indeks największego płata zabudowy (LPIBuild)	1
		Średnia odległość zewnętrzna (MOD)	1
		Odstęp pomiędzy budynkami	1
		Uśredniony współczynnik widoczności nieba (SVF)	2
		Stopień domknięcia nieba (Ed)	1
		Średnia wysokość zabudowy (BH)	18
		Chropowatość jednostki sąsiedzkiej (USR)	4
		Wysokość elementów chropowatych (HRE),	2
		Średni stosunek wysokości zabudowy do powierzchni zabudowy jednostki sąsiedzkiej (HA)	3
		Średni stosunek wysokości do całkowitej powierzchni bloku	1
		Średnia wysokość zabudowy do głębokości kanionu ulicznego	1
		Odchylenie standardowe wysokości budynku (StH)	2
		Znormalizowana wariancja wysokości (NHV)	1
		Ilość kondygnacji (L)	1
		Współczynnik wysokości (EF)	1
		Średnia szerokość zabudowy (W)	1
		Znormalizowana liczba budynków na blok (#B/A)	1
		Współczynnik otwartej przestrzeni publicznej	1
		Gęstość pokrycia drogami (RD)	12
		Średnia szerokość ulic	1
		Powierzchnia nawierzchni brukowanych (pA)	1
		Uśredniony indeks kształtu nawierzchni	1
		Gęstość pokrycia nawierzchniami utwardzonymi	1

<i>Rodzaj obiektu</i>	<i>Rodzina parametrów</i>	<i>Parametr</i>	<i>Wystąpienia w literaturze</i>
		Gęstość krawędzi nawierzchni utwardzonych	1
		Współczynnik pokrycia asfaltem (Asr)	1
		Powierzchnia nieprzepuszczalnych nawierzchni (ISA)	19
		Udział przepuszczalnych nawierzchni (ISC)	4
		Wielkość obiektu BGI	1
		Stosunek pokrycia obiektami wodnymi (W)	10
		Stosunek pokrycia gołą glebą (S)	1
		Współczynnik pokrycia zielenią (GCR)	25
		Objętość drzew	1
		Wysokość drzew	1
		Indeks pokrycia liśćmi (LAI)	1
	Morfo	-	82
		Znormalizowany różnicowy wskaźnik wegetacji (NDVI)	13
		Ulepszony wskaźnik wegetacji (EVI)	1
		Znormalizowany różnicowy wskaźnik pokrycia wodą (NDWI)	1
		Znormalizowany wskaźnik pokrycia gołą glebą (NDBLI)	1
		Wilgotność gleby	2
		Przepuszczalność materiału	1
		Uśredniona wartość nawierzchni nieprzepuszczalnych	1
		Intensywność ewapotranspiracji	1
		Chropowatość powierzchni materiału	1
		Porowatość miejska	1
		Pokrycie terenu	1
		Użytkowanie gruntów	4
		Funkcja przestrzeni	1
		Globalne albedo jednostki sąsiedzkiej	7
		Albedo powierzchni jednostki sąsiedzkiej (WAS)	21
		Emisyjność powierzchni jednostki sąsiedzkiej	4
		Pojemność cieplna materiału	1
		Wydajność cieplna gleby	1
		Przewodność cieplna materiału	1
		Dopuszczalność powierzchni (SAD)	1
		Antropogeniczna moc cieplna (AHO)	5
		Gęstość antropogenicznych strumieni ciepła	1
		Zagęszczenie populacji (PD)	7
	Topo	-	24
		Promień miasta	1
		Geometria miasta	2
		Nieregularność miasta	1
		Orientacja bloków względem ścieżki słonecznej	2
		Orientacja siatki ulic względem ścieżki słonecznej	1
		Odległość od centrum miasta (CBD)	6
		Odległość od granicy miasta (D)	1
		Odległość do obiektów wodnych	2
		Odległość do terenów zieleni	1
		Odległość do morza	1
		Odległość do terenów przemysłowych (Dti)	1
		Odległość do głównych dróg	1
		Lokalizacja względem terenów zieleni	1
		Ekspozycja na wiatr	3
Kaniony uliczne	-	-	403
	Geom	-	234
		Szerokość (W)	15
		Długość (L)	3
		Stosunek szerokości do długości	1
		Wysokość (H)	3

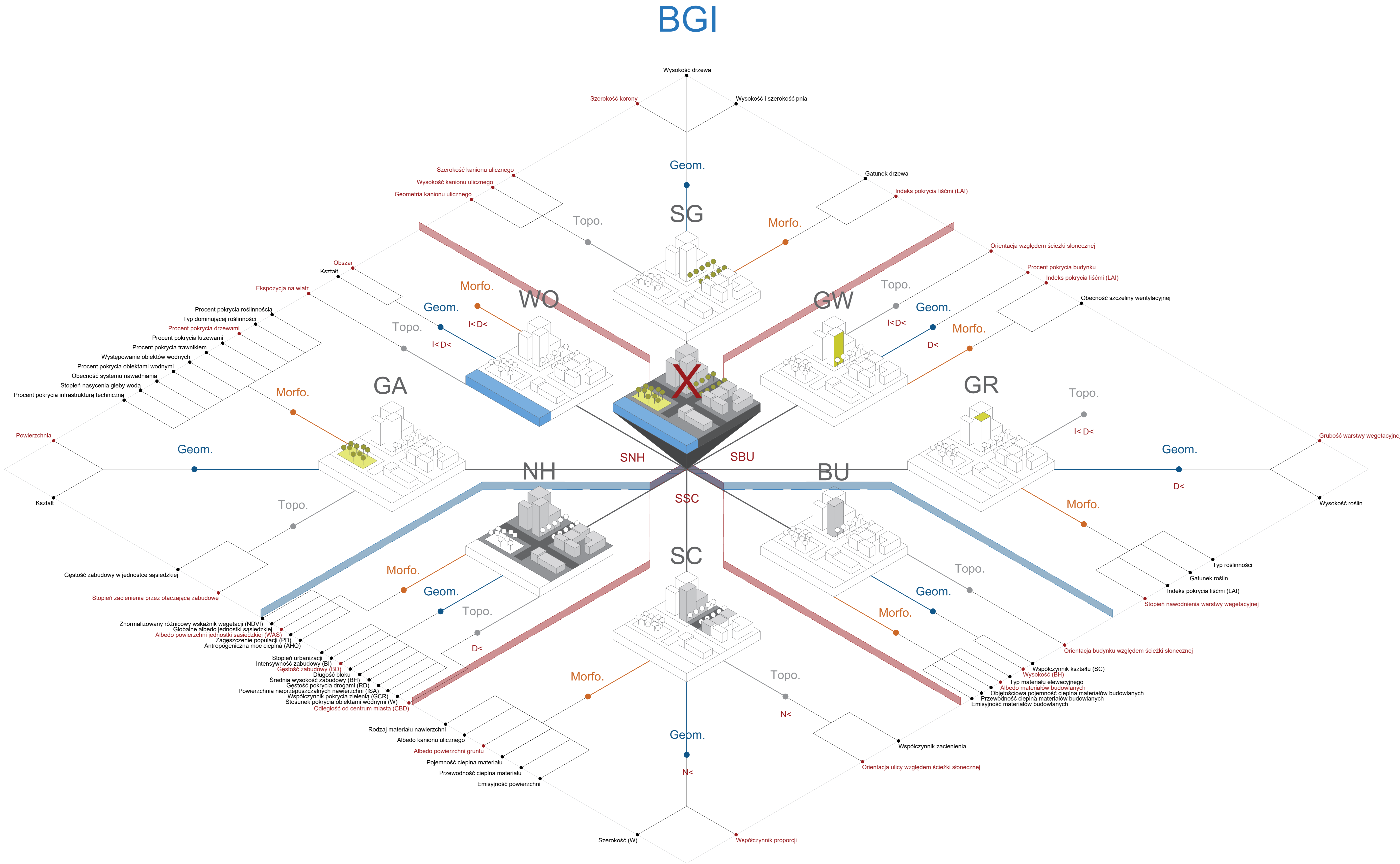
<i>Rodzaj obiektu</i>	<i>Rodzina parametrów</i>	<i>Parametr</i>	<i>Wystąpienia w literaturze</i>
		Stosunek długości do wysokości	1
		Współczynnik proporcji	84
		Asymetryczność (H1/H2)	2
		Współczynnik otwarcia (Ro)	1
		Współczynnik domknięcia (Rc)	1
		Współczynnik gładkości (Rs)	1
		Powierzchnia dróg i parkingów	1
		Kształt dróg i parkingów	1
		Współczynnik zabudowy	2
		Powierzchnia zieleni	3
		Wzór nasadzeń drzew	1
		Wymiary drzew	1
		Wysokość korony roślin ulicznych	3
		Średnia objętość drzew (TV)	1
		Współczynnik widoczności nieba (SVF)	91
	Morfo	-	111
		Emisyjność powierzchni	7
		Pojemność cieplna materiału	5
		Przewodność cieplna materiału	7
		Stopień pochłaniania ciepła przez nawierzchnię	2
		Dyfuzyjność termiczna materiału	1
		Emisja cieplna materiału	1
		Odblaskowość materiału	1
		Współczynnik odbicia światła słonecznego przez materiał	2
		Albedo kanionu ulicznego	11
		Albedo powierzchni gruntu	24
		Kolor materiału nawierzchni	1
		Rodzaj materiału nawierzchni	5
		Gęstość materiału nawierzchni	1
		Porowatość materiału nawierzchni	1
		Przepuszczalność chodnika	1
		Zawartość wody w chodniku	1
		Stopień parowania z chodnika	1
		Dyfuzyjność podbudowy drogi	1
		Efyzyjność podbudowy drogi	1
		Rodzaj wymiany ciepła w materiale	1
		Ilość roślinności	1
	Topo	-	58
		Orientacja ulicy względem ścieżki słonecznej	49
		Współczynnik zacielenia	5
		Ekspozycja na wiatr	2
Budynki	-	-	230
	Geom	-	80
		Powierzchnia	1
		Wysokość (BH)	51
		Szerokość	1
		Długość	2
		Głębokość	1
		Współczynnik głębokości budynku	2
		Powierzchnia dachu budynku (BGFA)	1
		Powierzchnia całkowita	1
		Średnia powierzchnia wszystkich pięter (GFA)	2
		Ilość kondygnacji	2
		Średnia wysokość kondygnacji	1
		Odsunięcie budynku w lini zabudowy	1
		Szerokość dachu	1
		Ważona zawartość objętości budynku (Cv)	1

<i>Rodzaj obiektu</i>	<i>Rodzina parametrów</i>	<i>Parametr</i>	<i>Wystąpienia w literaturze</i>
		Średnia zwartość budynku (Cm)	1
		Współczynnik kształtu (SC)	6
		Stosunek obwodu do powierzchni (PA)	1
	Morfo	-	128
		Emisyjność materiałów budowlanych	5
		Dyfuzyjność materiałów budowlanych	1
		Izolacyjność materiałów budowlanych (D)	2
		Przewodność cieplna materiałów budowlanych	5
		Objętościowa pojemność cieplna materiałów budowlanych	7
		Wydajność termiczna	1
		Albedo materiałów budowlanych	31
		Faza materiału pokrycia dachowego	1
		Rodzaj konstrukcji	1
		Typ materiału elewacyjnego	5
		Grubość ścian	3
		Współczynnik szklenia elewacji	3
		Obecność systemów HVAC	1
		Typ systemu HVAC	1
		Ilość ciepła emitowanego przez systemy HVAC	1
		Wydajność systemów HVAC	1
		Nastawa punktu chłodzenia przez HVAC	1
		Wskaźnik infiltracji	1
		Wewnętrzne zyski ciepła	1
	Topo	-	22
		Orientacja budynku względem ścieżki słonecznej (O)	11
		Współczynnik zacielenia budynku (BS)	4
		Kąt zacielenia ( $\theta$ )	1

## Bibliografia

- Antoszewski, P., Krzyżaniak, M., & Świerk, D. (2022). The Future of Climate-Resilient and Climate-Neutral City in the Temperate Climate Zone. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(7), Article 7.  
<https://doi.org/10.3390/ijerph19074365>
- Antoszewski, P., Świerk, D., & Krzyżaniak, M. (2020). Statistical Review of Quality Parameters of Blue-Green Infrastructure Elements Important in Mitigating the Effect of the Urban Heat Island in the Temperate Climate (C) Zone. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(19), Article 19.  
<https://doi.org/10.3390/ijerph17197093>

Załącznik 2. Parametryczny model środowiska termicznego ekosystemu miejskiego



**X** Środowisko termiczne

**Klasa obiektów:**

**BE** Obiekty środowiska zbudowanego  
**BGI** Obiekty błękitno-zielonej infrastruktury

**Skala obiektów:**

**SBU** Skala budynku  
**SSC** Skala kanionu ulicznego  
**SNH** Skala jednostki sąsiedzkiej

**Typ obiektów:**

**SC** Kanion uliczny  
**BU** Budynek  
**GR** Zielony dach  
**GW** Zielona ściana  
**SG** Zielień uliczna  
**WO** Obiekt wodny  
**GA** Teren zieleni powierzchniowej  
**NH** Jednostka sąsiedzka

**Grupa parametrów:**

**Topo.** Parametry topograficzne  
**Morfo.** Parametry morfologiczne  
**Geom.** Parametry geometryczne

**Ograniczenia danych:**

**D<** Niski poziom dostępności danych  
**I<** Niski poziom istotności danych  
**N<** Niski poziom normalizacji danych

**Rodzaj parametrów:**

**Typ roślinności** Parametr uwzględniony w modelu  
**Typ roślinności** Parametr dominujący

**A3.** Parametry modelu środowiska termicznego ekosystemu miejskiego w skali budynku wraz z wytycznymi i warunkami ich optymalizacji  
(źródło: opracowanie własne)

<i>Rodzaj obiektu</i>	<i>Rodzina parametrów</i>	<i>Parametr</i>	<i>Wytyczna dla stanu wartości i wariantu</i>	<i>Warunek wystąpienia</i>	<i>Podstawa naukowa</i>	
Budynki	Geom	-	-	-	-	
		-	-	-	-	
		Wysokość (BH)	Niska – średnia	-	(Xi i in., 2021)	
		Współczynnik kształtu (SC)	Niska	Bliskość głównej drogi	(Lu i in., 2012)	
			Niski	-	(Alsabry i in., 2017; Lin i in., 2021)	
	Morfo	-	-	-	-	-
		Emisyjność materiałów budowlanych	Wysoka	-	(Feng & Gong, 2012)	
		Przewodność cieplna materiałów budowlanych	Niska	-	(Ghadban i in., 2020)	
		Objętościowa pojemność cieplna materiałów budowlanych	Wysoka	Orientacja względem ścieżki słonecznej = N (półkula południowa) V orientacja względem ścieżki słonecznej = S (półkula północna)	(Hendel i in., 2018)	
		Albedo materiałów budowlanych	Wysokie	Gęstość zabudowy = niska	(Ghadban i in., 2020; Santamouris i in., 2018)	
			Zróżnicowane	Gęstość zabudowy = wysoka	(Ghadban i in., 2020; Santamouris i in., 2018)	
		Typ materiału elewacyjnego	Materiały retrorefleksyjne (RR)	-	(Castellani i in., 2019; Di Giuseppe i in., 2017; Rossi i in., 2014, 2015)	
			Powłoki zmiennofazowe (PCM)	Gęstość zabudowy = niska	(Echevarría Icaza i in., 2016)	
		Biała farba	Gęstość zabudowy = wysoka	(Echevarría Icaza i in., 2016)		
Topo	-	-	-	-	-	
	Orientacja budynku względem ścieżki słonecznej	E-W	Dłuższy bok	(Athamena i in., 2018; Elnahas, 2003; Kantzioura i in., 2012; Matzarakis & Mayer, 2009; Natanian i in., 2019; K. Niachou i in., 2008; Oh i in., 2021; Oh & Kim, 2019; Taleghani i in., 2014; Yang i in., 2020; Zakšek & Oštir, 2012)		

<i>Rodzaj obiektu</i>	<i>Rodzina parametrów</i>	<i>Parametr</i>	<i>Wytyczna dla stanu wartości i wariantu</i>	<i>Warunek wystąpienia</i>	<i>Podstawa naukowa</i>
Zielone dachy	-	-	-	-	-
	Geom	-	-	-	-
		Grubość warstwy wegetacyjnej	Duża	Duża nośność przegrody dachowej	(Lundholm i in., 2010; Norton i in., 2015; Santamouris, 2014)
			Mała	Mała nośność przegrody dachowej	(Lundholm i in., 2010; Norton i in., 2015; Santamouris, 2014)
		Wysokość roślin	Wysokie	-	(Lundholm i in., 2010; Norton i in., 2015; Santamouris, 2014)
	Morfo	-	-	-	-
		Typ roślinności	Bagienna	Obecność systemu nawadniania = tak $\wedge$ stopień nawodnienia warstwy wegetacyjnej = wysoki	(Boafo i in., 2017; Cao i in., 2019; Dvorak & Volder, 2013; Ferrante i in., 2016; Jim, 2012, 2014b, 2014a; Karachaliou i in., 2016; A. Niachou i in., 2001; Ouldboukhitine i in., 2014; Sisco i in., 2017; Song i in., 2013)
			Krzewy	Obecność systemu nawadniania = tak $\wedge$ stopień nawodnienia warstwy wegetacyjnej = średni	(Boafo i in., 2017; Cao i in., 2019; Dvorak & Volder, 2013; Ferrante i in., 2016; Jim, 2012, 2014b, 2014a; Karachaliou i in., 2016; A. Niachou i in., 2001; Ouldboukhitine i in., 2014; Sisco i in., 2017; Song i in., 2013)
			Trawy	Obecność systemu nawadniania = tak $\wedge$ stopień nawodnienia warstwy wegetacyjnej = niski	(Boafo i in., 2017; Cao i in., 2019; Dvorak & Volder, 2013; Ferrante i in., 2016; Jim, 2012, 2014b, 2014a; Karachaliou i in., 2016; A. Niachou i in., 2001; Ouldboukhitine i in., 2014; Sisco i in., 2017; Song i in., 2013)
			Sukulenty	Obecność systemu nawadniania = nie	(Boafo i in., 2017; Cao i in., 2019; Dvorak & Volder, 2013; Ferrante i in., 2016; Jim, 2012, 2014b, 2014a; Karachaliou i



<i>Rodzaj obiektu</i>	<i>Rodzina parametrów</i>	<i>Parametr</i>	<i>Wytyczna dla stanu wartości i wariantu</i>	<i>Warunek wystąpienia</i>	<i>Podstawa naukowa</i>
		Gatunek roślin	O dużej jasności liści	Gęstość zabudowy = niska	in., 2016; A. Niachou i in., 2001; Ouldboukhitime i in., 2014; Sisco i in., 2017; Song i in., 2013) (Vaz Monteiro i in., 2017)
			O dużej jasności liści	Gęstość zabudowy = wysoka Λ wysokość budynku = duża	(Vaz Monteiro i in., 2017)
			O średniej jasności liści	Gęstość zabudowy = wysoka Λ wysokość budynku = mała	(Echevarría Icaza i in., 2016)
			O niskich wymaganiach wodnych	Obecność systemu nawadniania = nie	(Azeñas i in., 2018; Blanusa i in., 2013; Ouldboukhitime i in., 2014; Ramyar i in., 2019; Vaz Monteiro i in., 2017)
		Indeks pokrycia liśćmi (LAI)	O wysokich wymaganiach wodnych Wysoki	Obecność systemu nawadniania = tak -	(Song i in., 2013) (Lundholm i in., 2010; Norton i in., 2015; Santamouris, 2014)
		Stopień nawodnienia warstwy wegetacyjnej	Średni – wysoki	Gatunek roślin = o wysokich wymaganiach wodnych	(Azeñas i in., 2018; Bevilacqua i in., 2016; Blanusa i in., 2013; Coutts i in., 2013; Djedjig i in., 2012; Dvorak & Volder, 2013; Tsang & Jim, 2011; Vaz Monteiro i in., 2017; Virk i in., 2014; Yin i in., 2019)
			Niski – średni	Gatunek roślin = o niskich wymaganiach wodnych	(Azeñas i in., 2018; Bevilacqua i in., 2016; Blanusa i in., 2013; Coutts i in., 2013; Djedjig i in., 2012; Dvorak & Volder, 2013; Tsang & Jim, 2011; Vaz Monteiro i in., 2017; Virk i in., 2014; Yin i in., 2019)
Zielone ściany	- Geom	-	-	-	-
		Procent pokrycia budynku	Wysoki	Albedo materiałów budowlanych = duże Λ	(Jamei & Tapper, 2019; Kontoleon & Eumorfopoulou, 2010; Norton i in., 2015)

<i>Rodzaj obiektu</i>	<i>Rodzina parametrów</i>	<i>Parametr</i>	<i>Wytyczna dla stanu wartości i wariantu</i>	<i>Warunek wystąpienia</i>	<i>Podstawa naukowa</i>
				orientacja budynku względem ścieżki słonecznej = N-S	
	Morfo	-	-	-	-
		Indeks pokrycia liśćmi (LAI)	Wysoki	-	(Dahanayake i in., 2017)
		Obecność szczeliny wentylacyjnej	Tak	-	(Lee & Jim, 2017; Tudiwer & Korjenic, 2017; Yin i in., 2017)
	Topo	-	-	-	-
			Zachodnia	-	(Jim, 2015; Kontoleon & Eumorfopoulou, 2010; Morakinyo i in., 2019)
			Wschodnia	-	(Jim, 2015; Kontoleon & Eumorfopoulou, 2010; Morakinyo i in., 2019)
			Północna	Półkula północna $\wedge$ przewodność cieplna materiałów budowlanych = wysoki	(Kontoleon & Eumorfopoulou, 2010; Morakinyo i in., 2019)
			Południowa	Półkula południowa $\wedge$ przewodność cieplna materiałów budowlanych = wysoki	(Kontoleon & Eumorfopoulou, 2010; Morakinyo i in., 2019)
			Południowa	Półkula północna	(Jamei & Tapper, 2019; Jim, 2015; Kontoleon & Eumorfopoulou, 2010; Lee & Jim, 2017; Morakinyo i in., 2019; Norton i in., 2015)
			Północna	Półkula południowa	(Jamei & Tapper, 2019; Jim, 2015; Kontoleon & Eumorfopoulou, 2010; Lee & Jim, 2017; Morakinyo i in., 2019; Norton i in., 2015)

## Bibliografia

- Alsabry, A., Truskiewicz, P., Szymański, K., Łaskawiec, K., & Rojek, Ł. (2017). Analysis of Energy Consumption and Possibilities of Thermal-Modernization in Residential Buildings in Poland Case Study: The Town of Zielona Góra. *International Journal of Applied Mechanics and Engineering*, 22. <https://doi.org/10.1515/ijame-2017-0070>
- Athamena, K., Sini, J.-F., Rosant, J.-M., & Guilhot, J. (2018). Numerical coupling model to compute the microclimate parameters inside a street canyon: Part I: Methodology and experimental validation of surface temperature. *Solar Energy*, 174, 1237–1251. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.04.059>
- Azeñas, V., Cuxart, J., Picos, R., Medrano, H., Simó, G., López-Grifol, A., & Gulías, J. (2018). Thermal regulation capacity of a green roof system in the mediterranean region: The effects of vegetation and irrigation level. *Energy and Buildings*, 164, 226–238. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.01.010>
- Bevilacqua, P., Mazzeo, D., Bruno, R., & Arcuri, N. (2016). Experimental investigation of the thermal performances of an extensive green roof in the Mediterranean area. *Energy and Buildings*, 122, 63–79. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.03.062>
- Blanusa, T., Vaz Monteiro, M. M., Fantozzi, F., Vysini, E., Li, Y., & Cameron, R. W. F. (2013). Alternatives to Sedum on green roofs: Can broad leaf perennial plants offer better ‘cooling service’? *Building and Environment*, 59, 99–106. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.08.011>
- Boafo, F. E., Kim, J.-T., & Kim, J.-H. (2017). Evaluating the impact of green roof evapotranspiration on annual building energy performance. *International Journal of Green Energy*, 14(5), 479–489. <https://doi.org/10.1080/15435075.2016.1278375>
- Cao, J., Hu, S., Dong, Q., Liu, L., & Wang, Z. (2019). Green roof cooling contributed by plant species with different photosynthetic strategies. *Energy and Buildings*, 195, 45–50. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.04.046>
- Castellani, B., Nicolini, A., Gambelli, A. M., Filipponi, M., Morini, E., & Rossi, F. (2019). Experimental assessment of the combined effect of retroreflective façades and pavement in urban canyons. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 609, 072004. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/609/7/072004>
- Coutts, A. M., Daly, E., Beringer, J., & Tapper, N. J. (2013). Assessing practical measures to reduce urban heat: Green and cool roofs. *Building and Environment*, 70, 266–276. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.08.021>
- Dahanayake, K. C., Chow, C. L., & Long Hou, G. (2017). Selection of suitable plant species for energy efficient Vertical Greenery Systems (VGS). *Energy Procedia*, 142, 2473–2478. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.12.185>

- Di Giuseppe, E., Pergolini, M., & Stazi, F. (2017). Numerical assessment of the impact of roof reflectivity and building envelope thermal transmittance on the UHI effect. *Energy Procedia*, *134*, 404–413. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.590>
- Djedjig, R., Ouldboukhitine, S.-E., Belarbi, R., & Bozonnet, E. (2012). Development and validation of a coupled heat and mass transfer model for green roofs. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, *39*(6), 752–761. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2012.03.024>
- Dvorak, B., & Volder, A. (2013). Rooftop temperature reduction from unirrigated modular green roofs in south-central Texas. *Urban Forestry & Urban Greening*, *12*(1), 28–35. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2012.05.004>
- Echevarría Icaza, L., van der Hoeven, F. D., & van den Dobbelsteen, A. (2016). The Urban Heat Island Effect in Dutch City Centres: Identifying Relevant Indicators and First Explorations. W W. Leal Filho, K. Adamson, R. M. Dunk, U. M. Azeiteiro, S. Illingworth, & F. Alves (Red.), *Implementing Climate Change Adaptation in Cities and Communities: Integrating Strategies and Educational Approaches* (s. 123–160). Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-28591-7\\_7](https://doi.org/10.1007/978-3-319-28591-7_7)
- Elnahas, M. M. (2003). The Effects of Urban Configuration on Urban Air Temperatures. *Architectural Science Review*, *46*(2), 135–138. <https://doi.org/10.1080/00038628.2003.9696975>
- Feng, D., & Gong, C. (2012). Sensitivity Analysis and Determination of the Effects of Asphalt Pavement Thermophysical Properties on the Temperature Field. *Journal of Highway and Transportation Research and Development (English Edition)*, *6*(4), 1–10. <https://doi.org/10.1061/JHTRCQ.0000001>
- Ferrante, P., La Gennusa, M., Peri, G., Rizzo, G., & Scaccianoce, G. (2016). Vegetation growth parameters and leaf temperature: Experimental results from a six plots green roofs' system. *Energy*, *115*, 1723–1732. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.07.085>
- Ghadban, M., Baayoun, A., Lakkis, I., Najem, S., Saliba, N. A., & Shihadeh, A. (2020). A novel method to improve temperature forecast in data-scarce urban environments with application to the Urban Heat Island in Beirut. *Urban Climate*, *33*, 100648. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2020.100648>
- Hendel, M., Parison, S., Grados, A., & Royon, L. (2018). Which pavement structures are best suited to limiting the UHI effect? A laboratory-scale study of Parisian pavement structures. *Building and Environment*, *144*, 216–229. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.08.027>

- Jamei, E., & Tapper, N. (2019). WSUD and Urban Heat Island Effect Mitigation. W *Approaches to Water Sensitive Urban Design* (s. 381–407). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812843-5.00019-8>
- Jim, C. Y. (2012). Effect of vegetation biomass structure on thermal performance of tropical green roof. *Landscape and Ecological Engineering*, 8(2), 173–187. <https://doi.org/10.1007/s11355-011-0161-4>
- Jim, C. Y. (2014a). Air-conditioning energy consumption due to green roofs with different building thermal insulation. *Applied Energy*, 128, 49–59. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.04.055>
- Jim, C. Y. (2014b). Building thermal-insulation effect on ambient and indoor thermal performance of green roofs. *Ecological Engineering*, 69, 265–275. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2014.04.016>
- Jim, C. Y. (2015). Cold-season solar input and ambivalent thermal behavior brought by climber greenwalls. *Energy*, 90, 926–938. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.07.127>
- Kantzioura, A., Kosmopoulos, P., & Zoras, S. (2012). Urban surface temperature and microclimate measurements in Thessaloniki. *Energy and Buildings*, 44, 63–72. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.10.019>
- Karachaliou, P., Santamouris, M., & Pangelou, H. (2016). Experimental and numerical analysis of the energy performance of a large scale intensive green roof system installed on an office building in Athens. *Energy and Buildings*, 114, 256–264. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.04.055>
- Kontoleon, K. J., & Eumorfopoulou, E. A. (2010). The effect of the orientation and proportion of a plant-covered wall layer on the thermal performance of a building zone. *Building and Environment*, 45(5), 1287–1303. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.11.013>
- Lee, L. S. H., & Jim, C. Y. (2017). Subtropical summer thermal effects of wire-rope climber green walls with different air-gap depths. *Building and Environment*, 126, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.09.021>
- Lin, P., Song, D., LAU, S. S. Y., & Hao, Q. I. N. (2021). *Investigation of The Impacts of Urban Morphology On Summer-Time Urban Heat Island Using GIS And Field Measurement*.
- Lu, J., Li, C., Yu, C., Jin, M., & Dong, S. (2012). Regression Analysis of the Relationship between Urban Heat Island Effect and Urban Canopy Characteristics in a Mountainous City, Chongqing. *Indoor and Built Environment*, 21(6), 821–836. <https://doi.org/10.1177/1420326X12461659>

- Lundholm, J., MacIvor, J. S., MacDougall, Z., & Ranalli, M. (2010). Plant Species and Functional Group Combinations Affect Green Roof Ecosystem Functions. *PLOS ONE*, 5(3), e9677. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0009677>
- Matzarakis, A., & Mayer, H. (2009). Dependence of urban climate on urban morphology. *5th Japanese-German meeting on urban climatology*, 277–282.
- Morakinyo, T. E., Lai, A., Lau, K. K.-L., & Ng, E. (2019). Thermal benefits of vertical greening in a high-density city: Case study of Hong Kong. *Urban Forestry & Urban Greening*, 37, 42–55. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2017.11.010>
- Natanian, J., Aleksandrowicz, O., & Auer, T. (2019). A parametric approach to optimizing urban form, energy balance and environmental quality: The case of Mediterranean districts. *Applied Energy*, 254, 113637. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113637>
- Niachou, A., Papakonstantinou, K., Santamouris, M., Tsangrassoulis, A., & Mihalakakou, G. (2001). Analysis of the green roof thermal properties and investigation of its energy performance. *Energy and Buildings*, 33(7), 719–729. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(01\)00062-7](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(01)00062-7)
- Niachou, K., Livada, I., & Santamouris, M. (2008). Experimental study of temperature and airflow distribution inside an urban street canyon during hot summer weather conditions—Part I: Air and surface temperatures. *Building and Environment - BLDG ENVIRON*, 43, 1383–1392. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2007.01.039>
- Norton, B. A., Coutts, A. M., Livesley, S. J., Harris, R. J., Hunter, A. M., & Williams, N. S. G. (2015). Planning for cooler cities: A framework to prioritise green infrastructure to mitigate high temperatures in urban landscapes. *Landscape and Urban Planning*, 134, 127–138. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2014.10.018>
- Oh, M., Jang, K. M., & Kim, Y. (2021). Empirical analysis of building energy consumption and urban form in a large city: A case of Seoul, South Korea. *Energy and Buildings*, 245, 111046. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111046>
- Oh, M., & Kim, Y. (2019). Identifying urban geometric types as energy performance patterns. *Energy for Sustainable Development*, 48, 115–129. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2018.12.002>
- Ouldboukhitine, S.-E., Spolek, G., & Belarbi, R. (2014). Impact of plants transpiration, grey and clean water irrigation on the thermal resistance of green roofs. *Ecological Engineering*, 67, 60–66. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2014.03.052>
- Ramyar, R., Zarghami, E., & Bryant, M. (2019). Spatio-temporal planning of urban neighborhoods in the context of global climate change: Lessons for urban form design in Tehran, Iran. *Sustainable Cities and Society*, 51, 101554. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101554>

- Rossi, F., Morini, E., Castellani, B., Nicolini, A., Bonamente, E., Anderini, E., & Cotana, F. (2015). Beneficial effects of retroreflective materials in urban canyons: Results from seasonal monitoring campaign. *Journal of Physics: Conference Series*, 655, 012012. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/655/1/012012>
- Rossi, F., Pisello, A. L., Nicolini, A., Filipponi, M., & Palombo, M. (2014). Analysis of retro-reflective surfaces for urban heat island mitigation: A new analytical model. *Applied Energy*, 114, 621–631. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.10.038>
- Santamouris, M. (2014). Cooling the cities — A review of reflective and green roof mitigation technologies to fight heat island and improve comfort in urban environments. *Solar Energy*, 103. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2012.07.003>
- Santamouris, M., Haddad, S., Saliari, M., Vasilakopoulou, K., Synnefa, A., Paolini, R., Ulpiani, G., Garshasbi, S., & Fiorito, F. (2018). On the energy impact of urban heat island in Sydney: Climate and energy potential of mitigation technologies. *Energy and Buildings*, 166, 154–164. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.02.007>
- Sisco, L., Monzer, S., Farajalla, N., Bashour, I., & Saoud, I. P. (2017). Roof top gardens as a means to use recycled waste and A/C condensate and reduce temperature variation in buildings. *Building and Environment*, 117, 127–134. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.02.025>
- Song, U., Kim, E., Bang, J. H., Son, D. J., Waldman, B., & Lee, E. J. (2013). Wetlands are an effective green roof system. *Building and Environment*, 66, 141–147. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.04.024>
- Taleghani, M., Tenpierik, M., van den Dobbelen, A., & Sailor, D. J. (2014). Heat in courtyards: A validated and calibrated parametric study of heat mitigation strategies for urban courtyards in the Netherlands. *Solar Energy*, 103, 108–124. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2014.01.033>
- Tsang, S. W., & Jim, C. Y. (2011). Theoretical evaluation of thermal and energy performance of tropical green roofs. *Energy*, 36(5), 3590–3598. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2011.03.072>
- Tudiwer, D., & Korjenic, A. (2017). The effect of living wall systems on the thermal resistance of the façade. *Energy and Buildings*, 135, 10–19. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.11.023>
- Vaz Monteiro, M., Blanuša, T., Verhoef, A., Richardson, M., Hadley, P., & Cameron, R. W. F. (2017). Functional green roofs: Importance of plant choice in maximising summertime environmental cooling and substrate insulation potential. *Energy and Buildings*, 141, 56–68. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.02.011>

- Virk, G., Jansz, A., Mavrogianni, A., Mylona, A., Stocker, J., & Davies, M. (2014). The effectiveness of retrofitted green and cool roofs at reducing overheating in a naturally ventilated office in London: Direct and indirect effects in current and future climates: *Indoor and Built Environment*. <https://doi.org/10.1177/1420326X14527976>
- Xi, C., Ren, C., Wang, J., Feng, Z., & Cao, S.-J. (2021). Impacts of urban-scale building height diversity on urban climates: A case study of Nanjing, China. *Energy and Buildings*, *251*, 111350. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111350>
- Yang, S., Zhou, D., Wang, Y., & Li, P. (2020). Comparing impact of multi-factor planning layouts in residential areas on summer thermal comfort based on orthogonal design of experiments (ODOE). *Building and Environment*, *182*, 107145. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107145>
- Yin, H., Kong, F., Dronova, I., Middel, A., & James, P. (2019). Investigation of extensive green roof outdoor spatio-temporal thermal performance during summer in a subtropical monsoon climate. *Science of The Total Environment*, *696*, 133976. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.133976>
- Yin, H., Kong, F., Middel, A., Dronova, I., Xu, H., & James, P. (2017). Cooling effect of direct green façades during hot summer days: An observational study in Nanjing, China using TIR and 3DPC data. *Building and Environment*, *116*, 195–206. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.02.020>
- Zakšek, K., & Oštir, K. (2012). Downscaling land surface temperature for urban heat island diurnal cycle analysis. *Remote Sensing of Environment*, *117*, 114–124. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.05.027>



#### Załącznik 4.

**A4.** Parametry modelu środowiska termicznego ekosystemu miejskiego w skali kanionu ulicznego wraz z wytycznymi i warunkami ich optymalizacji  
(źródło: opracowanie własne)

<i>Rodzaj obiektu</i>	<i>Rodzina parametrów</i>	<i>Parametr</i>	<i>Wytyczna dla stanu wartości i wariantu</i>	<i>Warunek wystąpienia</i>	<i>Podstawa naukowa</i>
Kaniony uliczne	-	-	-	-	-
	Geom	-	-	-	-
		Szerokość (W)	Duża	Współczynnik zacielenia = wysoki	(Erdem i in., 2021)
		Współczynnik proporcji	Niski	Współczynnik zacielenia = wysoki	(Martinelli & Matzarakis, 2017)
			Średni	Klimat Csa $\vee$ Cfa $\wedge$ $\vee$ współczynnik zacielenia = niski	(Martinelli & Matzarakis, 2017)
	Morfo	-	-	-	-
		Emisyjność powierzchni	Niska	-	(Bokaie i in., 2016; Giannaros i in., 2018; Tsoka i in., 2017; Zonato i in., 2020)
		Pojemność cieplna materiału	Niska	-	(Vargas-Nordbeck & Timm, 2012)
			Wysoka	Szerokość = duża	(Vargas-Nordbeck & Timm, 2012)
		Przewodność cieplna materiału	Niska	-	(Zonato i in., 2020)
		Albedo kanionu ulicznego	Zróznicowane	-	(Giridharan i in., 2005)
			Wysokie	Współczynnik proporcji = niski	(Giridharan i in., 2005)
		Albedo powierzchni gruntu	Zróznicowane	-	(Giridharan i in., 2005)
		Rodzaj materiału nawierzchni	Nawierzchnia zielona	Ruch kołowy = brak	(Jia i in., 2020)
			Materiał retrorefleksyjny (RR)	-	(Castellani i in., 2019; Di Giuseppe i in., 2017; Rossi i in., 2014, 2015)
		Powłoka zmiennofazowa (PCM)	Gęstość zabudowy = niska	(Echevarría Icaza i in., 2016)	
		Jasna farba	Gęstość zabudowy = niska	(Echevarría Icaza i in., 2016)	
		Nawierzchnie bitumiczne modyfikowane tlenkami	Gęstość zabudowy = niska	(Echevarría Icaza i in., 2016)	

<i>Rodzaj obiektu</i>	<i>Rodzina parametrów</i>	<i>Parametr</i>	<i>Wytyczna dla stanu wartości i wariantu</i>	<i>Warunek wystąpienia</i>	<i>Podstawa naukowa</i>
			Nawierzchnie barwione na jasny kolor w masie	Gęstość zabudowy = niska	(Echevarría Icaza i in., 2016)
			Nawierzchnie żywiczne z wyeksponowanym kruszywem o jasnej barwie	Gęstość zabudowy = niska $\wedge$ obciążenie kołowe = brak – niskie	(Gaffin i in., 2012; Pasetto i in., 2019)
			Recyklingowana nawierzchnia asfaltowa (RAP)	Szerokość = duża	(Vargas-Nordbeck & Timm, 2012)
			Granit	Szerokość = duża	(Hendel i in., 2018)
	Topo	-	-	-	-
		Orientacja ulicy względem ścieżki słonecznej	Nieregularna	-	(Andreou & Axarli, 2012; Johansson, 2006)
			Ukośna	Współczynnik proporcji = średni	(Huang, Li, i in., 2021; Zhang i in., 2017)
			N-S	Klimat Csa $\vee$ Cfa $\wedge$ współczynnik proporcji = średni – wysoki	(Andreou, 2013, s. 201; Dai & Schnabel, 2014; Delpak i in., 2021; Huang, Li, i in., 2021; Lau i in., 2016)
			E-W	Klimat Cfc $\wedge$ współczynnik zacielenia = wysoki	(Chatzidimitriou & Axarli, 2017; Ramyar i in., 2019; Taleghani i in., 2014; Yin i in., 2019)
		Współczynnik zacielenia	Wysoki	Orientacja ulicy względem ścieżki słonecznej = E-W	(Achour-Younsi & Kharrat, 2016; Andreou, 2014; Noro i in., 2014a)
			Niski	współczynnik proporcji = wysoki	(Loughner i in., 2012)
Zieleń przyuliczna	-	-	-	-	-
	Geom	-	-	-	-
		Wysokość drzewa	Duża	Połączenie koron = brak	(Dimoudi & Nikolopoulou, 2003; Noro i in., 2014b; Pauleit, 2003)
		Szerokość korony	Duża	Współczynnik proporcji = niski $\wedge$ szerokość = duża $\wedge$ połączenie koron = brak	(Chen i in., 2021; Huang, Song, i in., 2021; L. Kong i in., 2017)

<i>Rodzaj obiektu</i>	<i>Rodzina parametrów</i>	<i>Parametr</i>	<i>Wytyczna dla stanu wartości i wariantu</i>	<i>Warunek wystąpienia</i>	<i>Podstawa naukowa</i>
			Mała	Współczynnik proporcji = niski $\wedge$ niska ekspozycja na wiatr $\wedge$ bez połączenia koron	(Chen i in., 2021; Huang, Song, i in., 2021)
		Długość pnia	Średnia	Współczynnik proporcji = średni	(Chen i in., 2021)
			Duża	-	(Chen i in., 2021)
	Morfo	-	-	-	-
		Gatunek drzew	O dużych liściach $\wedge$ /V dużej gęstości korony	Klimat Cfc V Cfb V Cwa $\wedge$ współczynnik proporcji = niski $\wedge$ /V współczynnik zacienienia = niski	(Chatzipoulka i in., 2016; Gillner i in., 2015; F. Kong i in., 2016; Meier & Scherer, 2012; Tong i in., 2017)
			O dużych liściach $\wedge$ /V dużej gęstości korony $\wedge$ małych wymaganiach wodnych	Klimat Csa V Csb $\wedge$ współczynnik proporcji = niski $\wedge$ /V współczynnik zacienienia = niski	(Chatzipoulka i in., 2016; Gillner i in., 2015; F. Kong i in., 2016; Meier & Scherer, 2012; Tong i in., 2017)
			O dużych liściach $\wedge$ /V dużej gęstości korony $\wedge$ dużych wymaganiach wodnych	Klimat Cfa V Cwb $\wedge$ współczynnik proporcji = niski $\wedge$ /V współczynnik zacienienia = niski	(Chatzipoulka i in., 2016; Gillner i in., 2015; F. Kong i in., 2016; Meier & Scherer, 2012; Tong i in., 2017)
			O małych liściach $\wedge$ /V małej gęstości korony	Klimat Cfc V Cfb V Cwa	(Chatzipoulka i in., 2016; Gillner i in., 2015; F. Kong i in., 2016; Meier & Scherer, 2012; Tong i in., 2017)
			O małych liściach $\wedge$ /V małej gęstości korony $\wedge$ małych wymaganiach wodnych	Klimat Csa V Csb $\wedge$ współczynnik proporcji = wysoki $\wedge$ /V współczynnik zacienienia = wysoki	(Chatzipoulka i in., 2016; Gillner i in., 2015; F. Kong i in., 2016; Meier & Scherer, 2012; Tong i in., 2017)
			O małych liściach $\wedge$ /V małej gęstości korony $\wedge$ dużych wymaganiach wodnych	Klimat Cfa V Cwb $\wedge$ współczynnik proporcji = wysoki $\wedge$ /V współczynnik zacienienia = wysoki	(Chatzipoulka i in., 2016; Gillner i in., 2015; F. Kong i in., 2016; Meier & Scherer, 2012; Tong i in., 2017)
		Indeks pokrycia liśćmi (LAI)	Wysoki	Współczynnik proporcji = niski $\wedge$ /V szerokość = duża	(Chen i in., 2021; Coutts i in., 2016; Dimoudi & Nikolopoulou, 2003; Dixon & Mote, 2003; Leuzinger i in., 2010; Lin & Lin, 2010;

<i>Rodzaj obiektu</i>	<i>Rodzina parametrów</i>	<i>Parametr</i>	<i>Wytyczna dla stanu wartości i wariantu</i>	<i>Warunek wystąpienia</i>	<i>Podstawa naukowa</i>
			Niski	Współczynnik proporcji = wysoki	Morakinyo i in., 2020; Pataki i in., 2011; Pauleit, 2003; Shashua-Bar i in., 2009, 2010) (Chen i in., 2021; Coutts i in., 2016; Dimoudi & Nikolopoulou, 2003; Dixon & Mote, 2003; Leuzinger i in., 2010; Lin & Lin, 2010; Morakinyo i in., 2020; Pataki i in., 2011; Pauleit, 2003; Shashua-Bar i in., 2009, 2010)
	Topo	-	-	-	-
		Geometria kanionu ulicznego	Mały – średni	Gatunek drzew = o dużych liściach $\wedge$ /V dużej gęstości korony	(Chatzipoulka i in., 2016; Chen i in., 2021; Tong i in., 2017)
			Średni – duży	Gatunek drzew = o małych liściach $\wedge$ /V małej gęstości korony	(Chatzipoulka i in., 2016; Chen i in., 2021; Tong i in., 2017)
		Wysokość kanionu ulicznego	Mała – średnia	Gatunek drzew = o dużych liściach $\wedge$ /V dużej gęstości korony	(Chatzipoulka i in., 2016; Chen i in., 2021; Tong i in., 2017)
			Średnia – duża	Gatunek drzew = o małych liściach $\wedge$ /V małej gęstości korony	(Chatzipoulka i in., 2016; Chen i in., 2021; Tong i in., 2017)
		Szerokość kanionu ulicznego	Średnia – duża	Gatunek drzew = o dużych liściach $\wedge$ /V dużej gęstości korony	(Abreu-Harbich i in., 2014; Coutts i in., 2016; Yin i in., 2019; Zhang i in., 2017)
			Mała – średnia	Gatunek drzew = o małych liściach $\wedge$ /V małej gęstości korony	(Abreu-Harbich i in., 2014; Coutts i in., 2016; Yin i in., 2019; Zhang i in., 2017)

## Bibliografia

- Abreu-Harbich, L. V., Labaki, L. C., & Matzarakis, A. (2014). Thermal bioclimate in idealized urban street canyons in Campinas, Brazil. *Theoretical and Applied Climatology*, *115*(1), 333–340. <https://doi.org/10.1007/s00704-013-0886-0>
- Achour-Younsi, S., & Kharrat, F. (2016). Outdoor Thermal Comfort: Impact of the Geometry of an Urban Street Canyon in a Mediterranean Subtropical Climate – Case Study Tunis, Tunisia. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, *216*, 689–700. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2015.12.062>
- Andreou, E. (2013). Thermal comfort in outdoor spaces and urban canyon microclimate. *Renewable Energy*, *55*, 182–188. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2012.12.040>
- Andreou, E. (2014). The effect of urban layout, street geometry and orientation on shading conditions in urban canyons in the Mediterranean. *Renewable Energy*, *63*, 587–596. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2013.09.051>
- Andreou, E., & Axarli, K. (2012). Investigation of urban canyon microclimate in traditional and contemporary environment. Experimental investigation and parametric analysis. *Renewable Energy*, *43*, 354–363. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.11.038>
- Bokaie, M., Zarkesh, M. K., Arasteh, P. D., & Hosseini, A. (2016). Assessment of Urban Heat Island based on the relationship between land surface temperature and Land Use/ Land Cover in Tehran. *Sustainable Cities and Society*, *23*, 94–104. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2016.03.009>
- Castellani, B., Nicolini, A., Gambelli, A. M., Filipponi, M., Morini, E., & Rossi, F. (2019). Experimental assessment of the combined effect of retroreflective façades and pavement in urban canyons. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, *609*, 072004. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/609/7/072004>
- Chatzidimitriou, A., & Axarli, K. (2017). Street Canyon Geometry Effects on Microclimate and Comfort; A Case Study in Thessaloniki. *Procedia Environmental Sciences*, *38*, 643–650. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2017.03.144>
- Chatzipoulka, C., Compagnon, R., & Nikolopoulou, M. (2016a). Urban geometry and solar availability on façades and ground of real urban forms: Using London as a case study. *Solar Energy*, *138*, 53–66. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.09.005>

- Chen, T., Yang, H., Chen, G., Lam, C. K. C., Hang, J., Wang, X., Liu, Y., & Ling, H. (2021). Integrated impacts of tree planting and aspect ratios on thermal environment in street canyons by scaled outdoor experiments. *Science of The Total Environment*, 764, 142920. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142920>
- Coutts, A. M., White, E. C., Tapper, N. J., Beringer, J., & Livesley, S. J. (2016a). Temperature and human thermal comfort effects of street trees across three contrasting street canyon environments. *Theoretical and Applied Climatology*, 124(1), 55–68. <https://doi.org/10.1007/s00704-015-1409-y>
- Dai, Q., & Schnabel, M. A. (2014). Thermal comfort levels classified by aspect ratio and orientation for three zones of a street in Rotterdam. *Architectural Science Review*, 57(4), Article 4. <https://doi.org/10.1080/00038628.2014.930016>
- Delpak, N., Sajadzadeh, H., Hasanpourfard, S., & Aram, F. (2021). *The Effect of Street Orientation on Outdoor Thermal Comfort in a Cold Mountainous Climate*. <https://doi.org/10.20944/preprints202105.0654.v1>
- Di Giuseppe, E., Pergolini, M., & Stazi, F. (2017). Numerical assessment of the impact of roof reflectivity and building envelope thermal transmittance on the UHI effect. *Energy Procedia*, 134, 404–413. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.590>
- Dimoudi, A., & Nikolopoulou, M. (2003). Vegetation in the urban environment: Microclimatic analysis and benefits. *Energy and Buildings*, 35(1), 69–76. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(02\)00081-6](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(02)00081-6)
- Dixon, P. G., & Mote, T. (2003). Patterns And Causes Of Atlanta's Urban Heat Island Initiated Precipitation. *Journal of Applied Meteorology - J APPL METEOROL*, 42, 1273–1284. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(2003\)042<1273:PACOAU>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(2003)042<1273:PACOAU>2.0.CO;2)
- Echevarría Icaza, L., van der Hoeven, F. D., & van den Dobbelen, A. (2016). The Urban Heat Island Effect in Dutch City Centres: Identifying Relevant Indicators and First Explorations. W W. Leal Filho, K. Adamson, R. M. Dunk, U. M. Azeiteiro, S. Illingworth, & F. Alves (Red.), *Implementing Climate Change Adaptation in Cities and Communities: Integrating Strategies and Educational Approaches* (s. 123–160). Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-28591-7\\_7](https://doi.org/10.1007/978-3-319-28591-7_7)
- Erdem, U., Cubukcu, K. M., & Sharifi, A. (2021). An analysis of urban form factors driving Urban Heat Island: The case of Izmir. *Environment, Development and Sustainability*, 23(5), 7835–7859. <https://doi.org/10.1007/s10668-020-00950-4>

- Gaffin, S. R., Imhoff, M., Rosenzweig, C., Khanbilvardi, R., Pasqualini, A., Kong, A. Y. Y., Grillo, D., Freed, A., Hillel, D., & Hartung, E. (2012). Bright is the new black—Multi-year performance of high-albedo roofs in an urban climate. *Environmental Research Letters*, 7(1), 014029. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/7/1/014029>
- Giannaros, C., Nenes, A., Giannaros, T. M., Kourtidis, K., & Melas, D. (2018). A comprehensive approach for the simulation of the Urban Heat Island effect with the WRF/SLUCM modeling system: The case of Athens (Greece). *Atmospheric Research*, 201, 86–101. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2017.10.015>
- Gillner, S., Vogt, J., Tharang, A., Dettmann, S., & Roloff, A. (2015). Role of street trees in mitigating effects of heat and drought at highly sealed urban sites. *Landscape and Urban Planning*, 143, 33–42. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2015.06.005>
- Giridharan, R., Lau, S. S. Y., & Ganesan, S. (2005). Nocturnal heat island effect in urban residential developments of Hong Kong. *Energy and Buildings*, 37(9), 964–971. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2004.12.005>
- Hendel, M., Parison, S., Grados, A., & Royon, L. (2018). Which pavement structures are best suited to limiting the UHI effect? A laboratory-scale study of Parisian pavement structures. *Building and Environment*, 144, 216–229. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.08.027>
- Huang, X., Li, C., & Zhuang, Z. (2021). Analysis of Height-to-Width Ratio of Commercial Streets with Arcades Based on Sunshine Hours and Street Orientation. *Applied Sciences*, 11(4), Article 4. <https://doi.org/10.3390/app11041706>
- Huang, X., Song, J., Wang, C., Chui, T. F. M., & Chan, P. W. (2021). The synergistic effect of urban heat and moisture islands in a compact high-rise city. *Building and Environment*, 205, 108274. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108274>
- Jia, J., Liu, S., Zhao, S., Li, Y., Zhang, Q., & Tang, W. (2020). *Influences of landscape composition and configuration on land surface temperature in Wuhan, a „furnace” city in China*. 2020, GC006-0001.
- Johansson, E. (2006). Influence of urban geometry on outdoor thermal comfort in a hot dry climate: A study in Fez, Morocco. *Building and Environment*, 41(10), 1326–1338. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.05.022>

- Kong, F., Yan, W., Zheng, G., Yin, H., Cavan, G., Zhan, W., Zhang, N., & Cheng, L. (2016). Retrieval of three-dimensional tree canopy and shade using terrestrial laser scanning (TLS) data to analyze the cooling effect of vegetation. *Agricultural and Forest Meteorology*, *217*, 22–34. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2015.11.005>
- Kong, L., Lau, K. K.-L., Yuan, C., Chen, Y., Xu, Y., Ren, C., & Ng, E. (2017). Regulation of outdoor thermal comfort by trees in Hong Kong. *Sustainable Cities and Society*, *31*, 12–25. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2017.01.018>
- Lau, K. K.-L., Ren, C., Ho, J., & Ng, E. (2016). Numerical modelling of mean radiant temperature in high-density sub-tropical urban environment. *Energy and Buildings*, *114*, 80–86. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.06.035>
- Leuzinger, S., Vogt, R., & Körner, C. (2010). Tree surface temperature in an urban environment. *Agricultural and Forest Meteorology*, *150*(1), 56–62. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2009.08.006>
- Lin, B.-S., & Lin, Y.-J. (2010). Cooling Effect of Shade Trees with Different Characteristics in a Subtropical Urban Park. *HortScience*, *45*(1), 83–86. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.45.1.83>
- Loughner, C. P., Allen, D. J., Zhang, D.-L., Pickering, K. E., Dickerson, R. R., & Landry, L. (2012). Roles of Urban Tree Canopy and Buildings in Urban Heat Island Effects: Parameterization and Preliminary Results. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, *51*(10), 1775–1793. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-11-0228.1>
- Martinelli, L., & Matzarakis, A. (2017). Influence of height/width proportions on the thermal comfort of courtyard typology for Italian climate zones. *Sustainable Cities and Society*, *29*, 97–106. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2016.12.004>
- Meier, F., & Scherer, D. (2012). Spatial and temporal variability of urban tree canopy temperature during summer 2010 in Berlin, Germany. *Theoretical and Applied Climatology*, *110*(3), 373–384. <https://doi.org/10.1007/s00704-012-0631-0>
- Morakinyo, T. E., Ouyang, W., Lau, K. K.-L., Ren, C., & Ng, E. (2020). Right tree, right place (urban canyon): Tree species selection approach for optimum urban heat mitigation - development and evaluation. *Science of The Total Environment*, *719*, 137461. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137461>



- Noro, M., Busato, F., & Lazzarin, R. (2014a). UHI effect in the city of Padua: Simulations and mitigation strategies using the Rayman and envimet model. *Geographia Polonica*, 87(4), 517–530.
- Noro, M., Busato, F., & Lazzarin, R. (2014b). UHI effect in the city of Padua: Simulations and mitigation strategies using the Rayman and envimet model. *Geographia Polonica*, 87(4), Article 4.
- Pasetto, M., Pasquini, E., Giacomello, G., & Baliello, A. (2019). Innovative pavement surfaces as urban heat islands mitigation strategy: Chromatic, thermal and mechanical characterisation of clear/coloured mixtures. *Road Materials and Pavement Design*, 20(sup1), S533–S555. <https://doi.org/10.1080/14680629.2019.1593230>
- Pataki, D. E., Carreiro, M. M., Cherrier, J., Grulke, N. E., Jennings, V., Pincetl, S., Pouyat, R. V., Whitlow, T. H., & Zipperer, W. C. (2011). Coupling biogeochemical cycles in urban environments: Ecosystem services, green solutions, and misconceptions. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 9(1), 27–36. <https://doi.org/10.1890/090220>
- Pauleit, S. (2003). Urban street tree plantings: Identifying the key requirements. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Municipal Engineer*, 156(1), 43–50. Scopus. <https://doi.org/10.1680/muen.2003.156.1.43>
- Ramyar, R., Zarghami, E., & Bryant, M. (2019). Spatio-temporal planning of urban neighborhoods in the context of global climate change: Lessons for urban form design in Tehran, Iran. *Sustainable Cities and Society*, 51, 101554. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101554>
- Rossi, F., Morini, E., Castellani, B., Nicolini, A., Bonamente, E., Anderini, E., & Cotana, F. (2015). Beneficial effects of retroreflective materials in urban canyons: Results from seasonal monitoring campaign. *Journal of Physics: Conference Series*, 655, 012012. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/655/1/012012>
- Rossi, F., Pisello, A. L., Nicolini, A., Filippini, M., & Palombo, M. (2014). Analysis of retro-reflective surfaces for urban heat island mitigation: A new analytical model. *Applied Energy*, 114, 621–631. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.10.038>
- Shashua-Bar, L., Pearlmutter, D., & Erell, E. (2009). The cooling efficiency of urban landscape strategies in a hot dry climate. *Landscape and Urban Planning*, 92(3), 179–186. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2009.04.005>

- Shashua-Bar, L., Potchter, O., Bitan, A., Boltansky, D., & Yaakov, Y. (2010). Microclimate modelling of street tree species effects within the varied urban morphology in the Mediterranean city of Tel Aviv, Israel. *International Journal of Climatology*, *30*(1), 44–57. Scopus. <https://doi.org/10.1002/joc.1869>
- Taleghani, M., Tenpierik, M., van den Dobbelsteen, A., & Sailor, D. J. (2014). Heat in courtyards: A validated and calibrated parametric study of heat mitigation strategies for urban courtyards in the Netherlands. *Solar Energy*, *103*, 108–124. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2014.01.033>
- Tong, S., Wong, N. H., Tan, C. L., Jusuf, S. K., Ignatius, M., & Tan, E. (2017). Impact of urban morphology on microclimate and thermal comfort in northern China. *Solar Energy*, *155*, 212–223. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.06.027>
- Tsoka, S., Tsikaloudaki, K., & Theodosiou, T. (2017). Urban space's morphology and microclimatic analysis: A study for a typical urban district in the Mediterranean city of Thessaloniki, Greece. *Energy and Buildings*, *156*, 96–108. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.09.066>
- Vargas-Nordbeck, A., & Timm, D. H. (2012). *Evaluation of Pavement Temperatures of Various Pavement Sections*. 782–791. [https://doi.org/10.1061/41167\(398\)75](https://doi.org/10.1061/41167(398)75)
- Yin, S., Lang, W., & Xiao, Y. (2019). The synergistic effect of street canyons and neighbourhood layout design on pedestrian-level thermal comfort in hot-humid area of China. *Sustainable Cities and Society*, *49*, 101571. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101571>
- Zhang, Y., Du, X., & Shi, Y. (2017). Effects of street canyon design on pedestrian thermal comfort in the hot-humid area of China. *International Journal of Biometeorology*, *61*(8), 1421–1432. <https://doi.org/10.1007/s00484-017-1320-6>
- Zonato, A., Martilli, A., Di Sabatino, S., Zardi, D., & Giovannini, L. (2020). Evaluating the performance of a novel WUDAPT averaging technique to define urban morphology with mesoscale models. *Urban Climate*, *31*, 100584. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2020.100584>

**A5.** Parametry modelu środowiska termicznego ekosystemu miejskiego w skali jednostki sąsiedzkiej wraz z wytycznymi i warunkami ich optymalizacji  
(źródło: opracowanie własne)

<i>Rodzaj obiektu</i>	<i>Rodzina parametrów</i>	<i>Parametr</i>	<i>Wytyczna dla stanu wartości i wariantu</i>	<i>Warunek wystąpienia</i>	<i>Podstawa naukowa</i>
Jednostki sąsiedzkie	-	-	-	-	-
	Geom	-	-	-	-
		Stopień urbanizacji	Niski	-	(Ronchi i in., 2020; Sun i in., 2020)
		Intensywność zabudowy (BI)	Mała	-	(Erdem i in., 2021; Smith i in., 2011; Weng i in., 2008)
		Gęstość zabudowy budynkami (BD)	Niska	Współczynnik pokrycia zielenią = wysoki	(S. Chen i in., 2018; He i in., 2021)
			Średnia – wysoka	Klimat Csa $\vee$ Csb $\wedge$ współczynnik pokrycia zielenią = niski	(Chatzipoulka i in., 2015; S. Chen i in., 2018; Lau i in., 2015; H. Li i in., 2021; Lin i in., 2017; Thorsson i in., 2011; J. Yang, Shi, i in., 2021; X. Yang & Li, 2015)
			Średnia – wysoka	Klimat Cfc $\wedge$ współczynnik pokrycia zielenią = niski $\wedge$ wysokość zabudowy = średnia	(Chatzipoulka i in., 2015; S. Chen i in., 2018; Lau i in., 2015; H. Li i in., 2021; Lin i in., 2017; Thorsson i in., 2011; J. Yang, Shi, i in., 2021; X. Yang & Li, 2015)
		Długość bloku	Mała	Wysokość bloku = duża	(Dirksen i in., 2019; F. Yang i in., 2010)
			Mała - średnia	Orientacja względem ścieżki słonecznej = N (półkula północna) $\vee$ S (półkula południowa) $\vee$	(Jiang i in., 2020; Taleghani i in., 2014; F. Yang i in., 2011; Yuan & Ng, 2012)
		Średnia wysokość zabudowy (BH)	Niska	W obwodzie osiedla	(W. Wang & Ng, 2018; F. Yang i in., 2011; J. Yang, Shi, i in., 2021)
			Niskie - średnie	W centrum osiedla $\wedge$ < wysokość drzewa	(Perini & Magliocco, 2014; W. Wang & Ng, 2018; Xi i in., 2021; F. Yang i in., 2011; S. Yang i in., 2020)

<i>Rodzaj obiektu</i>	<i>Rodzina parametrów</i>	<i>Parametr</i>	<i>Wytyczna dla stanu wartości i wariantu</i>	<i>Warunek wystąpienia</i>	<i>Podstawa naukowa</i>
Obiekty wodne	Geom	Gęstość zabudowy drogami (RD)	Jednolita – umiarkowanie zróżnicowana	Na linii promienia jednostki $\wedge$ równoległe do kierunku dominujących wiatrów	(Choi i in., 2018; Ghadban i in., 2020; W. Wang & Ng, 2018; J. Yang, Menenti, i in., 2021; X. Yang & Li, 2015)
			Niska	Prędkość projektowana drogi = niska	(Gerçek i in., 2016; Ha i in., 2016; Huang i in., 2020; Liao i in., 2014; Salvati, Palme, i in., 2017)
		Powierzchnia nieprzepuszczalnych nawierzchni (ISA)	Niska – średnia	Prędkość projektowana drogi = wysoka	(Gerçek i in., 2016; Ha i in., 2016; Huang i in., 2020; Liao i in., 2014; Salvati, Palme, i in., 2017)
			Mała	Gęstość zabudowy budynkami = wysoka $\wedge$ / $\vee$ gęstość zabudowy drogami = wysoka $\wedge$ współczynnik pokrycia zielenią = wysoki	(Abreu-Harbach i in., 2014; Chatzipoulka i in., 2015; Ramirez-Aguilar & Lucas Souza, 2019; Shimazaki i in., 2021)
		Stosunek pokrycia obiektami wodnymi (W)	Wysoki	-	(Chun & Guldman, 2014; Erdem i in., 2021; Fahed i in., 2020; Liu i in., 2017; Xu i in., 2019, s.).
		Współczynnik pokrycia zielenią (GCR)	Wysoki	-	(Tsoka i in., 2017; Wong i in., 2010; Y. Yang i in., 2017)
		-	-	-	-
		Znormalizowany różnicowy wskaźnik wegetacji (NDVI)	Wysoki	-	(J. Li i in., 2011; J. Yang i in., 2020; W. Zhou i in., 2011a)
		Globalne albedo jednostki sąsiedzkiej	Zróżnicowane	-	(Giridharan i in., 2005)
		Albedo powierzchni jednostki sąsiedzkiej (WAS)	Zróżnicowane	-	(Giridharan i in., 2005)
		Strumień ciepła antropogenicznego	Niski Średni	-	(Elnahas, 2003)
		Zagęszczenie populacji (PD)	Niskie	Klimat Cfc	(Salvati, Coch, i in., 2017; Vartholomaios, 2017)
		-	-	-	(Ramirez-Aguilar & Lucas Souza, 2019)
		Topo	-	-	-
-	-	-	-		
Odległość od centrum miasta (CBD)	Duża	-	(Azhdari i in., 2018; Erdem i in., 2021; Mathew i in., 2016)		
-	-	-	-		
-	-	-	-		

<i>Rodzaj obiektu</i>	<i>Rodzina parametrów</i>	<i>Parametr</i>	<i>Wytyczna dla stanu wartości i wariantu</i>	<i>Warunek wystąpienia</i>	<i>Podstawa naukowa</i>
Tereny zieleni powierzchniowej	Topo	Obszar	Duży	-	(Imam Syafii i in., 2017; X. Zhou & Chen, 2018; Zhu i in., 2011)
		Kształt	Mały – średni	Gęstość zabudowy budynkami = duża $\wedge$ /V gęstość zabudowy drogami = duża	(Steenefeld i in., 2014; Theeuwes i in., 2013; G. Yang i in., 2020)
			Zwarty, foremny	-	(Du i in., 2016; G. Yang i in., 2020; Zhu i in., 2011)
		Ekspozycja na wiatr	Wysoka	-	(Imam Syafii i in., 2017; Theeuwes i in., 2013; Tominaga i in., 2015)
	Geom	-	-	-	-
		Powierzchnia	Duża	-	(Feyisa i in., 2014; Theeuwes i in., 2013)
	Morfo	Kształt	Mała – średnia	Gęstość zabudowy budynkami = duża $\wedge$ /V gęstość zabudowy drogami = duża	(Coutts i in., 2013; I. Lehmann i in., 2014)
			Równomiernie rozłożony wzór	Gęstość zabudowy budynkami = duża $\wedge$ /V gęstość zabudowy drogami = duża	(Ronchi i in., 2020; W. Zhou i in., 2011b)
		-	Zwarty, okrągły, foremny	-	(Feyisa i in., 2014)
		Procent pokrycia roślinnością	Wysoki	-	(I. Lehmann i in., 2014).
		Typ dominującej zieleni	Drzewa > krzewy	-	(Cheung & Jim, 2019; Cohen i in., 2012; Duncan i in., 2019; I. Lehmann i in., 2014; S. Lehmann, 2014; Potchter i in., 2006; Y. Wang i in., 2015)
		Procent pokrycia drzewami	Zróznicowany	-	(Duncan i in., 2019; Zhang i in., 2013)
	Średni - wysoki		-	(Cao i in., 2010; Chang i in., 2007; Cheung & Jim, 2019; Giridharan i in., 2008; Hamada & Ohta, 2010; Jaganmohan i in., 2016; Klemm i in., 2015; Ng i in.,	

<i>Rodzaj obiektu</i>	<i>Rodzina parametrów</i>	<i>Parametr</i>	<i>Wytyczna dla stanu wartości i wariantu</i>	<i>Warunek wystąpienia</i>	<i>Podstawa naukowa</i>
		Procent pokrycia krzewami	Średni – wysoki	Procent pokrycia drzewami = niski	2012; Peng i in., 2018; Vaz Monteiro i in., 2016; Xiao i in., 2018; G. Yang i in., 2020; Yu i in., 2017, 2018) (Cao i in., 2010; Cheung & Jim, 2019; Giridharan i in., 2008; Jaganmohan i in., 2016; Qiu i in., 2017; Vaz Monteiro i in., 2016)
		Procent pokrycia trawnikiem	Niski – średni	Procent pokrycia krzewami = niski $\wedge$ V procent pokrycia drzewami = niski	(Cao i in., 2010; Giridharan i in., 2008; Ng i in., 2012; Peng i in., 2018; Qiu i in., 2017; Vaz Monteiro i in., 2016; Xiao i in., 2018; G. Yang i in., 2020; Yu i in., 2017, 2018)
		Występowanie obiektów wodnych	Tak	-	(Du i in., 2016; Hathway & Sharples, 2012)
		Procent pokrycia obiektami wodnymi	Wysoki	-	(Cao i in., 2010; X. Chen i in., 2012; Du i in., 2017; Jaganmohan i in., 2016; Xiao i in., 2018; Zoulia i in., 2008)
		Procent pokrycia infrastrukturą	Niski – średni	Powierzchnia nieprzepuszczalnych nawierzchni = mała Woda deszczowa	(Chang i in., 2007; Chang & Li, 2014)
		Obecność systemu nawadniania	Tak		(Coutts i in., 2007; Giles-Corti i in., 2005; Jamei & Tapper, 2019)
		Stopień nasycenia gleby wodą	Średni – wysoki	-	(Broadbent i in., 2018)
Topo	-	Gęstość zabudowy w jednostce sąsiedzkiej	Średnia – wysoka	-	(Jamei & Tapper, 2019; Perini & Magliocco, 2014; Žuvela-Aloise i in., 2016)
		Stopień zacienienia przez otaczającą zabudowę	Niski	-	(Cao i in., 2010; Chang & Li, 2014; Cohen i in., 2012; Oliveira i in., 2011; O'Malley i in., 2015; Shashua-Bar & Hoffman, 2000)

## Bibliografia

- Abreu-Harbich, L. V., Labaki, L. C., & Matzarakis, A. (2014). Thermal bioclimate in idealized urban street canyons in Campinas, Brazil. *Theoretical and Applied Climatology*, *115*(1), 333–340. <https://doi.org/10.1007/s00704-013-0886-0>
- Azhdari, A., Soltani, A., & Alidadi, M. (2018). Urban morphology and landscape structure effect on land surface temperature: Evidence from Shiraz, a semi-arid city. *Sustainable Cities and Society*, *41*, 853–864. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.06.034>
- Broadbent, A. M., Coutts, A. M., Tapper, N. J., & Demuzere, M. (2018). The cooling effect of irrigation on urban microclimate during heatwave conditions. *Urban Climate*, *23*, 309–329. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2017.05.002>
- Cao, X., Onishi, A., Chen, J., & Imura, H. (2010). Quantifying the cool island intensity of urban parks using ASTER and IKONOS data. *Landscape and Urban Planning*, *96*(4), 224–231. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2010.03.008>
- Chang, C.-R., & Li, M.-H. (2014). Effects of urban parks on the local urban thermal environment. *Urban Forestry & Urban Greening*, *13*(4), 672–681. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2014.08.001>
- Chang, C.-R., Li, M.-H., & Chang, S.-D. (2007). A preliminary study on the local cool-island intensity of Taipei city parks. *Landscape and Urban Planning*, *80*(4), 386–395. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2006.09.005>
- Chatzipoulka, C., Nikolopoulou, M., & Watkins, R. (2015, lipiec). The impact of urban geometry on the radiant environment in outdoor spaces. *9th International Conference on Urban Climate*. ICUC9 9th International Conference on Urban Climate, Toulouse. <http://www.meteo.fr/icuc9/>
- Chen, S., Lang, W., Li, X., Shen, C., & Fan, Q. (2018). Determining the Influence of Building Density on Heat Island Effect Using Baidu Map and Remote Sensing. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, *84*(9), 549–558. <https://doi.org/10.14358/PERS.84.9.549>
- Chen, X., Su, Y., Li, D., Huang, G., Chen, W., & Chen, S. (2012). Study on the cooling effects of urban parks on surrounding environments using Landsat TM data: A case study in Guangzhou, southern China. *International Journal of Remote Sensing*, *33*(18), 5889–5914. <https://doi.org/10.1080/01431161.2012.676743>
- Cheung, P. K., & Jim, C. Y. (2019). Differential cooling effects of landscape parameters in humid-subtropical urban parks. *Landscape and Urban Planning*, *192*, 103651. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2019.103651>
- Choi, Y., Lee, S., & Moon, H. (2018). Urban Physical Environments and the Duration of High Air Temperature: Focusing on Solar Radiation Trapping Effects. *Sustainability*, *10*(12), Article 12. <https://doi.org/10.3390/su10124837>

- Chun, B., & Guldmann, J.-M. (2014). Spatial statistical analysis and simulation of the urban heat island in high-density central cities. *Landscape and Urban Planning*, *125*, 76–88. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2014.01.016>
- Cohen, P., Potchter, O., & Matzarakis, A. (2012). Daily and seasonal climatic conditions of green urban open spaces in the Mediterranean climate and their impact on human comfort. *Building and Environment*, *51*, 285–295. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.11.020>
- Coutts, A. M., Beringer, J., & Tapper, N. J. (2007). Impact of increasing urban density on local climate: Spatial and temporal variations in the surface energy balance in Melbourne, Australia. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, *46*(4), 477–493. Scopus. <https://doi.org/10.1175/JAM2462.1>
- Coutts, A. M., Daly, E., Beringer, J., & Tapper, N. J. (2013). Assessing practical measures to reduce urban heat: Green and cool roofs. *Building and Environment*, *70*, 266–276. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.08.021>
- Dirksen, M., Ronda, R. J., Theeuwes, N. E., & Pagani, G. A. (2019). Sky view factor calculations and its application in urban heat island studies. *Urban Climate*, *30*, 100498. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2019.100498>
- Du, H., Cai, W., Xu, Y., Wang, Z., Wang, Y., & Cai, Y. (2017). Quantifying the cool island effects of urban green spaces using remote sensing Data. *Urban Forestry & Urban Greening*, *27*, 24–31. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2017.06.008>
- Du, H., Song, X., Jiang, H., Kan, Z., Wang, Z., & Cai, Y. (2016). Research on the cooling island effects of water body: A case study of Shanghai, China. *Ecological Indicators*, *67*, 31–38. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.02.040>
- Duncan, J. M. A., Boruff, B., Saunders, A., Sun, Q., Hurley, J., & Amati, M. (2019). Turning down the heat: An enhanced understanding of the relationship between urban vegetation and surface temperature at the city scale. *Science of The Total Environment*, *656*, 118–128. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.223>
- Elnahas, M. M. (2003). The Effects of Urban Configuration on Urban Air Temperatures. *Architectural Science Review*, *46*(2), 135–138. <https://doi.org/10.1080/00038628.2003.9696975>
- Erdem, U., Cubukcu, K. M., & Sharifi, A. (2021a). An analysis of urban form factors driving Urban Heat Island: The case of Izmir. *Environment, Development and Sustainability*, *23*(5), Article 5. <https://doi.org/10.1007/s10668-020-00950-4>
- Fahed, J., Kinab, E., Ginestet, S., & Adolphe, L. (2020). Impact of urban heat island mitigation measures on microclimate and pedestrian comfort in a dense urban district of Lebanon. *Sustainable Cities and Society*, *61*, 102375.



- Feyisa, G. L., Dons, K., & Meilby, H. (2014). Efficiency of parks in mitigating urban heat island effect: An example from Addis Ababa. *Landscape and Urban Planning*, 123, 87–95. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2013.12.008>
- Gerçek, D., Güven, İ. T., & Oktay, İ. Ç. (2016). Analysis of the intra-city variation of urban heat island and its relation to land surface/cover parameters. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 3, 123.
- Ghadban, M., Baayoun, A., Lakkis, I., Najem, S., Saliba, N. A., & Shihadeh, A. (2020). A novel method to improve temperature forecast in data-scarce urban environments with application to the Urban Heat Island in Beirut. *Urban Climate*, 33, 100648. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2020.100648>
- Giles-Corti, B., Broomhall, M. H., Knuiaman, M., Collins, C., Douglas, K., Ng, K., Lange, A., & Donovan, R. J. (2005). Increasing walking: How important is distance to, attractiveness, and size of public open space? *American Journal of Preventive Medicine*, 28(2 SUPPL. 2), 169–176. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.amepre.2004.10.018>
- Giridharan, R., Lau, S. S. Y., & Ganesan, S. (2005). Nocturnal heat island effect in urban residential developments of Hong Kong. *Energy and Buildings*, 37(9), 964–971. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2004.12.005>
- Giridharan, R., Lau, S. S. Y., Ganesan, S., & Givoni, B. (2008). Lowering the outdoor temperature in high-rise high-density residential developments of coastal Hong Kong: The vegetation influence. *Building and Environment*, 43(10), 1583–1595. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2007.10.003>
- Ha, J., Lee, S., & Park, C. (2016). Temporal Effects of Environmental Characteristics on Urban Air Temperature: The Influence of the Sky View Factor. *Sustainability*, 8(9), Article 9. <https://doi.org/10.3390/su8090895>
- Hamada, S., & Ohta, T. (2010). Seasonal variations in the cooling effect of urban green areas on surrounding urban areas. *Urban Forestry & Urban Greening - URBAN FOR URBAN GREEN*, 9, 15–24. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2009.10.002>
- Hathway, E. A., & Sharples, S. (2012). The interaction of rivers and urban form in mitigating the Urban Heat Island effect: A UK case study. *Building and Environment*, 58, 14–22. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.06.013>
- He, X., Gao, W., & Wang, R. (2021). Impact of urban morphology on the microclimate around elementary schools: A case study from Japan. *Building and Environment*, 108383. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108383>

- Huang, J.-M., Chang, H.-Y., & Wang, Y.-S. (2020). Spatiotemporal Changes in the Built Environment Characteristics and Urban Heat Island Effect in a Medium-Sized City, Chiayi City, Taiwan. *Sustainability*, *12*(1), Article 1. <https://doi.org/10.3390/su12010365>
- Imam Syafii, N., Ichinose, M., Kumakura, E., Jusuf, S. K., Chigusa, K., & Wong, N. H. (2017). Thermal environment assessment around bodies of water in urban canyons: A scale model study. *Sustainable Cities and Society*, *34*, 79–89. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2017.06.012>
- Jaganmohan, M., Knapp, S., Buchmann, C. M., & Schwarz, N. (2016). The Bigger, the Better? The Influence of Urban Green Space Design on Cooling Effects for Residential Areas. *Journal of Environmental Quality*, *45*(1), 134–145. <https://doi.org/10.2134/jeq2015.01.0062>
- Jamei, E., & Tapper, N. (2019). WSUD and Urban Heat Island Effect Mitigation. W *Approaches to Water Sensitive Urban Design* (s. 381–407). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812843-5.00019-8>
- Jiang, Y., Wu, C., & Teng, M. (2020). Impact of Residential Building Layouts on Microclimate in a High Temperature and High Humidity Region. *Sustainability*, *12*(3), Article 3. <https://doi.org/10.3390/su12031046>
- Klemm, W., Heusinkveld, B. G., Lenzholzer, S., Jacobs, M. H., & Van Hove, B. (2015). Psychological and physical impact of urban green spaces on outdoor thermal comfort during summertime in The Netherlands. *Building and Environment*, *83*, 120–128. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.05.013>
- Lau, K. K.-L., Lindberg, F., Rayner, D., & Thorsson, S. (2015). The effect of urban geometry on mean radiant temperature under future climate change: A study of three European cities. *International Journal of Biometeorology*, *59*(7), 799–814. <https://doi.org/10.1007/s00484-014-0898-1>
- Lehmann, I., Mathey, J., Rößler, S., Bräuer, A., & Goldberg, V. (2014). Urban vegetation structure types as a methodological approach for identifying ecosystem services – Application to the analysis of micro-climatic effects. *Ecological Indicators*, *42*, 58–72. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2014.02.036>
- Lehmann, S. (2014). Low carbon districts: Mitigating the urban heat island with green roof infrastructure. *City, Culture and Society*, *5*(1), 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.ccs.2014.02.002>
- Li, H., Li, Y., Wang, T., Wang, Z., Gao, M., & Shen, H. (2021). Quantifying 3D building form effects on urban land surface temperature and modeling seasonal correlation patterns. *Building and Environment*, *204*, 108132. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108132>

- Li, J., Song, C., Cao, L., Zhu, F., Meng, X., & Wu, J. (2011). Impacts of landscape structure on surface urban heat islands: A case study of Shanghai, China. *Remote Sensing of Environment*, 115(12), 3249–3263. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.07.008>
- Liao, F.-C., Cheng, M.-J., Hwang, R.-L., & Yang, W.-S. (2014). The effect of land cover and land use on urban heat island in Taiwan. *Proceedings of the World SB14, Barcelona, Spain*, 28–30.
- Lin, P., Lau, S. S. Y., Qin, H., & Gou, Z. (2017). Effects of urban planning indicators on urban heat island: A case study of pocket parks in high-rise high-density environment. *Landscape and Urban Planning*, 168, 48–60. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2017.09.024>
- Liu, W., Feddema, J., Hu, L., Zung, A., & Brunsell, N. (2017). Seasonal and Diurnal Characteristics of Land Surface Temperature and Major Explanatory Factors in Harris County, Texas. *Sustainability*, 9(12), Article 12. <https://doi.org/10.3390/su9122324>
- Mathew, A., Khandelwal, S., & Kaul, N. (2016). Spatial and temporal variations of urban heat island effect and the effect of percentage impervious surface area and elevation on land surface temperature: Study of Chandigarh city, India. *Sustainable Cities and Society*, 26, 264–277. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2016.06.018>
- Ng, E., Chen, L., Wang, Y., & Yuan, C. (2012). A study on the cooling effects of greening in a high-density city: An experience from Hong Kong. *Building and Environment*, 47, 256–271. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.07.014>
- Oliveira, S., Andrade, H., & Vaz, T. (2011). The cooling effect of green spaces as a contribution to the mitigation of urban heat: A case study in Lisbon. *Building and Environment*, 46(11), 2186–2194. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.04.034>
- O'Malley, C., Piroozfar, P., Farr, E. R. P., & Pomponi, F. (2015). Urban Heat Island (UHI) mitigating strategies: A case-based comparative analysis. *Sustainable Cities and Society*, 19, 222–235. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2015.05.009>
- Peng, J., Jia, J., Liu, Y., Li, H., & Wu, J. (2018). Seasonal contrast of the dominant factors for spatial distribution of land surface temperature in urban areas. *Remote Sensing of Environment*, 215, 255–267. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.06.010>
- Perini, K., & Magliocco, A. (2014). Effects of vegetation, urban density, building height, and atmospheric conditions on local temperatures and thermal comfort. *Urban Forestry & Urban Greening*, 13(3), Article 3.
- Potchter, O., Cohen, P., & Bitan, A. (2006). Climatic behavior of various urban parks during hot and humid summer in the mediterranean city of Tel Aviv, Israel. *International Journal of Climatology*, 26(12), 1695–1711. <https://doi.org/10.1002/joc.1330>

- Qiu, G. Y., Zou, Z., Li, X., Li, H., Guo, Q., Yan, C., & Tan, S. (2017). Experimental studies on the effects of green space and evapotranspiration on urban heat island in a subtropical megacity in China. *Habitat International*, 68, 30–42. <https://doi.org/10.1016/j.habitatint.2017.07.009>
- Ramírez-Aguilar, E. A., & Lucas Souza, L. C. (2019). Urban form and population density: Influences on Urban Heat Island intensities in Bogotá, Colombia. *Urban Climate*, 29, 100497. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2019.100497>
- Ronchi, S., Salata, S., & Arcidiacono, A. (2020). Which urban design parameters provide climate-proof cities? An application of the Urban Cooling InVEST Model in the city of Milan comparing historical planning morphologies. *Sustainable Cities and Society*, 63, 102459. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102459>
- Salvati, A., Coch, H., & Morganti, M. (2017). Effects of urban compactness on the building energy performance in Mediterranean climate. *Energy Procedia*, 122, 499–504. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.07.303>
- Salvati, A., Palme, M., & Inostroza, L. (2017). Key Parameters for Urban Heat Island Assessment in A Mediterranean Context: A Sensitivity Analysis Using the Urban Weather Generator Model. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 245, 082055. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/245/8/082055>
- Shashua-Bar, L., & Hoffman, M. E. (2000). Vegetation as a climatic component in the design of an urban street: An empirical model for predicting the cooling effect of urban green areas with trees. *Energy and Buildings*, 31(3), 221–235. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(99\)00018-3](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(99)00018-3)
- Shimazaki, Y., Aoki, M., Nitta, J., Okajima, H., & Yoshida, A. (2021). Experimental Determination of Pedestrian Thermal Comfort on Water-Retaining Pavement for UHI Adaptation Strategy. *Atmosphere*, 12(2), Article 2. <https://doi.org/10.3390/atmos12020127>
- Smith, C. L., Webb, A., Levermore, G. J., Lindley, S. J., & Beswick, K. (2011). Fine-scale spatial temperature patterns across a UK conurbation. *Climatic Change*, 109(3), 269–286. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0021-0>
- Steenefeld, G. J., Koopmans, S., Heusinkveld, B. G., & Theeuwes, N. E. (2014). Refreshing the role of open water surfaces on mitigating the maximum urban heat island effect. *Landscape and Urban Planning*, 121, 92–96. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2013.09.001>
- Sun, F., Liu, M., Wang, Y., Wang, H., & Che, Y. (2020). The effects of 3D architectural patterns on the urban surface temperature at a neighborhood scale: Relative contributions and marginal effects. *Journal of Cleaner Production*, 258, 120706. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120706>

- Taleghani, M., Kleerekoper, L., Tenpierik, M., & Dobbelsteen, A. (2014). Outdoor thermal comfort within five different urban forms in The Netherlands. *Building and Environment*, 83. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.03.014>
- Theeuwes, N. E., Solcerová, A., & Steeneveld, G. J. (2013). Modeling the influence of open water surfaces on the summertime temperature and thermal comfort in the city. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118(16), 8881–8896. <https://doi.org/10.1002/jgrd.50704>
- Thorsson, S., Lindberg, F., Björklund, J., Holmer, B., & Rayner, D. (2011). Potential changes in outdoor thermal comfort conditions in Gothenburg, Sweden due to climate change: The influence of urban geometry. *International Journal of Climatology*, 31(2), 324–335. <https://doi.org/10.1002/joc.2231>
- Tominaga, Y., Sato, Y., & Sadohara, S. (2015). CFD simulations of the effect of evaporative cooling from water bodies in a micro-scale urban environment: Validation and application studies. *Sustainable Cities and Society, Complete*(19), 259–270. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2015.03.011>
- Tsoka, S., Tsikaloudaki, K., & Theodosiou, T. (2017). Urban space's morphology and microclimatic analysis: A study for a typical urban district in the Mediterranean city of Thessaloniki, Greece. *Energy and Buildings*, 156, 96–108. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.09.066>
- Vartholomaios, A. (2017). A parametric sensitivity analysis of the influence of urban form on domestic energy consumption for heating and cooling in a Mediterranean city. *Sustainable Cities and Society*, 28, 135–145. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2016.09.006>
- Vaz Monteiro, M., Doick, K. J., Handley, P., & Peace, A. (2016). The impact of greenspace size on the extent of local nocturnal air temperature cooling in London. *Urban Forestry & Urban Greening*, 16, 160–169. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2016.02.008>
- Wang, W., & Ng, E. (2018). Large-eddy simulations of air ventilation in parametric scenarios: Comparative studies of urban form and wind direction. *Architectural Science Review*, 61(4), 215–225. <https://doi.org/10.1080/00038628.2018.1481359>
- Wang, Y., Bakker, F., de Groot, R., Wörtche, H., & Leemans, R. (2015). Effects of urban green infrastructure (UGI) on local outdoor microclimate during the growing season. *Environmental Monitoring and Assessment*, 187(12), 732. <https://doi.org/10.1007/s10661-015-4943-2>
- Weng, Q., Liu, H., Liang, B., & Lu, D. (2008). The Spatial Variations of Urban Land Surface Temperatures: Pertinent Factors, Zoning Effect, and Seasonal Variability. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 1(2), 154–166. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2008.917869>

- Wong, M. S., Nichol, J., & Lee, K.-H. (2010). A Satellite View of Urban Heat Island: Causative Factors and Scenario Analysis. *Korean Journal of Remote Sensing*, 26(6), 617–627.
- Xi, C., Ren, C., Wang, J., Feng, Z., & Cao, S.-J. (2021). Impacts of urban-scale building height diversity on urban climates: A case study of Nanjing, China. *Energy and Buildings*, 251, 111350. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111350>
- Xiao, X. D., Dong, L., Yan, H., Yang, N., & Xiong, Y. (2018). The influence of the spatial characteristics of urban green space on the urban heat island effect in Suzhou Industrial Park. *Sustainable Cities and Society*, 40, 428–439. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.04.002>
- Xu, D., Zhou, D., Wang, Y., Xu, W., & Yang, Y. (2019). Field measurement study on the impacts of urban spatial indicators on urban climate in a Chinese basin and static-wind city. *Building and Environment*, 147, 482–494. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.10.042>
- Yang, F., Lau, S. S. Y., & Qian, F. (2010). Summertime heat island intensities in three high-rise housing quarters in inner-city Shanghai China: Building layout, density and greenery. *Building and Environment*, 45(1), 115–134. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.05.010>
- Yang, F., Lau, S. S. Y., & Qian, F. (2011). Urban design to lower summertime outdoor temperatures: An empirical study on high-rise housing in Shanghai. *Building and Environment*, 46(3), 769–785. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.10.010>
- Yang, G., Yu, Z., Jørgensen, G., & Vejre, H. (2020). How can urban blue-green space be planned for climate adaption in high-latitude cities? A seasonal perspective. *Sustainable Cities and Society*, 53, 101932. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101932>
- Yang, J., Menenti, M., Wu, Z., Wong, M. S., Abbas, S., Xu, Y., & Shi, Q. (2021). Assessing the impact of urban geometry on surface urban heat island using complete and nadir temperatures. *International Journal of Climatology*, 41(S1), E3219–E3238. <https://doi.org/10.1002/joc.6919>
- Yang, J., Shi, Q., Menenti, M., Wong, M. S., Wu, Z., Zhao, Q., Abbas, S., & Xu, Y. (2021). Observing the impact of urban morphology and building geometry on thermal environment by high spatial resolution thermal images. *Urban Climate*, 39, 100937. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2021.100937>
- Yang, J., Zhan, Y., Xiao, X., Xia, J. C., Sun, W., & Li, X. (2020). Investigating the diversity of land surface temperature characteristics in different scale cities based on local climate zones. *Urban Climate*, 34, 100700. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2020.100700>

- Yang, S., Zhou, D., Wang, Y., & Li, P. (2020). Comparing impact of multi-factor planning layouts in residential areas on summer thermal comfort based on orthogonal design of experiments (ODOE). *Building and Environment*, 182, 107145. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107145>
- Yang, X., & Li, Y. (2015). The impact of building density and building height heterogeneity on average urban albedo and street surface temperature. *Building and Environment*, 90, 146–156. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.03.037>
- Yang, Y., Zhang, X., Lu, X., Hu, J., Pan, X., Zhu, Q., & Su, W. (2017). Effects of Building Design Elements on Residential Thermal Environment. *Sustainability*, 10(1), 1–15.
- Yu, Z., Guo, X., Jørgensen, G., & Vejre, H. (2017). How can urban green spaces be planned for climate adaptation in subtropical cities? *Ecological Indicators*, 82, 152–162. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.07.002>
- Yu, Z., Xu, S., Zhang, Y., Jørgensen, G., & Vejre, H. (2018). Strong contributions of local background climate to the cooling effect of urban green vegetation. *Scientific Reports*, 8(1), Article 1. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-25296-w>
- Yuan, C., & Ng, E. (2012). Building porosity for better urban ventilation in high-density cities – A computational parametric study. *Building and Environment*, 50, 176–189. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.10.023>
- Zhang, Z., Lv, Y., & Pan, H. (2013). Cooling and humidifying effect of plant communities in subtropical urban parks. *Urban Forestry & Urban Greening*, 12(3), 323–329. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2013.03.010>
- Zhou, W., Huang, G., & Cadenasso, M. L. (2011a). Does spatial configuration matter? Understanding the effects of land cover pattern on land surface temperature in urban landscapes. *Landscape and Urban Planning*, 102(1), Article 1. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2011.03.009>
- Zhou, W., Huang, G., & Cadenasso, M. L. (2011b). Does spatial configuration matter? Understanding the effects of land cover pattern on land surface temperature in urban landscapes. *Landscape and Urban Planning*, 102(1), 54–63. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2011.03.009>
- Zhou, X., & Chen, H. (2018). Impact of urbanization-related land use land cover changes and urban morphology changes on the urban heat island phenomenon. *Science of The Total Environment*, 635, 1467–1476. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.04.091>

- Zhu, C., Li, S., Ji, P., Ren, B., & Li, X. (2011). Effects of the different width of urban green belts on the temperature and humidity. *Shengtai Xuebao/ Acta Ecologica Sinica*, *31*, 383–394.
- Zouliá, I., Santamouris, M., & Dimoudi, A. (2008). Monitoring the effect of urban green areas on the heat island in Athens. *Environmental Monitoring and Assessment*, *156*(1), 275. <https://doi.org/10.1007/s10661-008-0483-3>
- Žuvela-Aloise, M., Koch, R., Buchholz, S., & Früh, B. (2016). Modelling the potential of green and blue infrastructure to reduce urban heat load in the city of Vienna. *Climatic Change*, *135*(3), 425–438. <https://doi.org/10.1007/s10584-016-1596-2>



**Załącznik 6.**

**A6. Ograniczenia optymalizacyjne środowiska termicznego ekosystemu miejskiego wynikające z polskich aktów prawnych**  
(źródło: opracowanie własne)

<i>Rodzaj obiektu</i>	<i>Obszar ingerencji</i>	<i>Działanie</i>	<i>Warunek</i>	<i>Wymiar</i>	<i>Warunek</i>	<i>Podstawa prawna</i>
Tereny zieleni powierzchniowej	-	-	-	-	-	-
	Sieć telekomunikacyjna	-	-	-	-	-
		Lokalizacja czoła pnia drzewa w stosunku do fundamentu sieci telekomunikacyjnej	Odległość	<2.00 m	-	Zał. Nr 1. (Rozporządzenie 4, 2005)
		Lokalizacja korzeni krzewów w stosunku do sieci telekomunikacyjnej dla krzewów posadzonych na trawniku	Głębokość	>0.70 m	-	Zał. Nr 1. (Rozporządzenie 4, 2005)
		Lokalizacja korzeni krzewów w stosunku do sieci telekomunikacyjnej dla krzewów posadzonych w pasie drzew przydrożnych	Głębokość	>0.80 m	-	Zał. Nr 1. (Rozporządzenie 4, 2005)
	Sieć gazowa	-	-	-	-	-
		Lokalizacja pnia drzewa w stosunku do gazociągów o średnicy do DN 300	Odległość	<2.00 m	-	Art 10. 4 i Art 20. 1. (Rozporządzenie 1, 2013)
		Lokalizacja pnia drzewa w stosunku do gazociągów powyżej średnicy do DN 300	Odległość	<3.00 m	-	Art 10. 4 i Art 20. 1. (Rozporządzenie 1, 2013)
		Lokalizacja pni drzew i krzewów w stosunku do gazociągu ułożonego w lesie	Odległość	<2.00 m	-	Art 10. 4 i Art 20. 1. (Rozporządzenie 1, 2013)
	Wał przeciwpowodziowy	-	-	-	-	-
		Lokalizacja pnia drzewa i krzewów w stosunku do podnóża nasypu	Odległość	<3,00 m	-	Art. 176. 1. (Ustawa 2, 2017)

<i>Rodzaj obiektu</i>	<i>Obszar ingerencji</i>	<i>Działanie</i>	<i>Warunek</i>	<i>Wymiar</i>	<i>Warunek</i>	<i>Podstawa prawna</i>
Zieleń uliczna	-	-	-	-	-	-
	Sieć telekomunikacyjna	-	-	-	-	-
		Lokalizacja czoła pnia drzewa w stosunku do fundamentu sieci telekomunikacyjnej	Odległość	<2.00 m	-	Załącznik Nr 1. (Rozporządzenie 4, 2005)
		Lokalizacja korzeni krzewów nad siecią telekomunikacyjną dla krzewów posadzonych w pasie drzew przydrożnych	Głębokość	>0.80 m	-	Załącznik Nr 1. (Rozporządzenie 4, 2005)
	Budynek	-	-	-	-	-
		Lokalizacja drzew	-	-	-	-
		Lokalizacja krawędzi korony dorosłych drzew w stosunku do przewodów spalinowych i rur dymnych	Odległość	<6.00 m	-	Art. 265. 4. (Obwieszczenie 1, 2022)
		Lokalizacja drzew i krzewów pomiędzy drogą pożarową a budynkiem o wysokości powyżej 12 m lub powyżej trzech nadziemnych kondygnacji	Wysokość	>3.00 m	W zależności od szczególnych warunków przeciwpożarowych	Art. 2. (Rozporządzenie 5, 2009)
		Lokalizacja drzewa względem budynku wysokości w przypadku obiektów sklasyfikowanych jako zagrożenie dla człowieka	Zakres odległości	8.60-18.60 m	Wysokość roślin >3,00 m	Art. 2. (Rozporządzenie 5, 2009)
		Lokalizacja drzewa względem budynku dla pozostałych obiektów	Zakres odległości	8.60-28.60 m	Wysokość roślin <3,00 m	Art. 2. (Rozporządzenie 5, 2009)
	Tory kolejowe	-	-	-	-	-
		Lokalizacja względem zewnętrznego toru drzew i krzewów rosnących w pobliżu linii kolejowej	Odległość	<15.00 m	-	Art 1. (Rozporządzenie 2, 2008)

<i>Rodzaj obiektu</i>	<i>Obszar ingerencji</i>	<i>Działanie</i>	<i>Warunek</i>	<i>Wymiar</i>	<i>Warunek</i>	<i>Podstawa prawna</i>
		Miąższość żywopłotu z pasem ziemi do jego obsługi	Szerokość	2.00-3.00 m	-	Art 1. (Rozporządzenie 2, 2008)
		Rozłożenie drzew i krzewów w żywopłotach ochronnych	Zakres odległości	0.50-1.00 m	-	Art 1. (Rozporządzenie 2, 2008)
		Lokalizacja drzew i krzewów w żywopłotach ochronnych na obszarach szczególnie narażonych na zamiecie, w stosunku do zewnętrznej krawędzi pasów przeznaczonych do ich pielęgnacji	Zakres odległości	6.00-10.00 m	-	Art 1. (Rozporządzenie 2, 2008)
		Lokalizacja roślin jednorocznych, bylin i krzewów w trójkątach widoczności	Wysokość	>1.00 m	-	Art 1. (Rozporządzenie 2, 2008)
	Droga i torowisko tramwajowe, chodnik	-	-	-	-	-
		Położenie podstawy korony nad drogą klasy A (autostrada) lub S (ekspresowa)	Wysokość	<5,00 m	-	Art. 72. 2. (Rozporządzenie 3, 2022)
		Położenie podstawy korony nad drogą GP (ruch przyspieszony), G (główna), Z (zbiorowa), L (lokalna) lub D (dojazdowa)	Wysokość	<4,50 m	-	Art. 72. 2. (Rozporządzenie 3, 2022)
		Położenie podstawy korony drzewa nad chodnikiem, ścieżką rowerową lub ścieżką pieszo-rowerową	Wysokość	<2,50 m	-	Art. 72. 2. (Rozporządzenie 3, 2022)
		Położenie podstawy korony drzewa nad konstrukcją tramwaju,	Wysokość	<5,00 m	Z uwzględnieniem powiększenia wynikającego z warunków tramwaju na łuku pionowym	Art. 72. 2. (Rozporządzenie 3, 2022)

<i>Rodzaj obiektu</i>	<i>Obszar ingerencji</i>	<i>Działanie</i>	<i>Warunek</i>	<i>Wymiar</i>	<i>Warunek</i>	<i>Podstawa prawna</i>
		Położenie podstawy korony drzewa nad pasem technologicznym	Wysokość	<4,00 m	-	Art. 72. 2. (Rozporządzenie 3, 2022)
		Położenie podstawy korony drzewa nad chodnikiem do obsługi	Wysokość	<1,90 m		Art. 72. 2. (Rozporządzenie 3, 2022)
		Położenie pnia drzewa w stosunku do skrajni drogi			Jeżeli poprzeczne nachylenie części drogi jest większe niż 2.5 %, szerokość skrajni poszerza się po stronie dolnej krawędzi jezdni zgodnie z wartością tego nachylenia	Art. 72. 2. (Rozporządzenie 3, 2022)
		Położenia pnia drzewa w stosunku do skrajni drogi dla rowerów lub pieszych i rowerów (szerokość pasa bezpieczeństwa skrajni ścieżki rowerowej lub ścieżki pieszej i rowerowej).	Odległość	<0,50 m	Po wewnętrznej stronie odcinka łuku w planie zwiększa się w celu uwzględnienia warunków łuku, wielkości promienia łuku i prędkości konstrukcyjnej	Art. 72. 2. (Rozporządzenie 3, 2022)
		Położenie pnia drzewa w stosunku do chodnika	Odległość	<0,00 m	-	Art. 72. 2. (Rozporządzenie 3, 2022)
		Lokalizacja roślin jednorocznych, bylin i krzewów w trójkątach widoczności	Wysokość	>1,00 m	-	Art. 16. 2. (Rozporządzenie 3, 2022)
Obiekty wodne	-	-	-	-	-	-
	Wał przeciwpowodziowy	-	-	-	-	-

<i>Rodzaj obiektu</i>	<i>Obszar ingerencji</i>	<i>Działanie</i>	<i>Warunek</i>	<i>Wymiar</i>	<i>Warunek</i>	<i>Podstawa prawna</i>
		Lokalizacja stawu, dołu i rowu względem podnóża wału przeciwpowodziowego	Odległość	<50,00 m	-	Art. 176. 1. (Ustawa 2, 2017)
	Staw, ciek wodny, obiekty retencyjne i towarzysząca infrastruktura	-	-	-	-	-
		Budowa obiektów wodnych, tj. urządzeń lub konstrukcji wykorzystywanych do kształtowania lub wykorzystywania zasobów wodnych, w tym piętrzenia, ochrony przeciwpowodziowej oraz urządzeń lub konstrukcji regulacyjnych, kanałów i rowów, urządzeń ujęć wód powierzchniowych i podziemnych	-	-	Pozwolenie wodnoprawne	Art. 389 (Ustawa 2, 2017)
		Regulacja wód, rozwinięcie potoków górskich i kształtowanie nowych koryt naturalnych cieków wodnych	-	-	Pozwolenie wodnoprawne	Art. 389 (Ustawa 2, 2017)
		Zmiana terenu na terenach przyległych do wód , mająca wpływ na warunki przepływu wody	-	-	Pozwolenie wodnoprawne	Art. 389 (Ustawa 2, 2017)
		Przecinanie płynących wód powierzchniowych i wałów przeciwpowodziowych	-	-	Pozwolenie wodnoprawne	Art. 389 (Ustawa 2, 2017)
		Budowa platformy	Szerokość	>3,00 m	Zgłoszenie wodnoprawne	Art. 394. 1. (Ustawa 2, 2017)
			Długość	>25,00 m	Zgłoszenie wodnoprawne	Art. 394. 1. (Ustawa 2, 2017)
		Budowa kąpielisk lub wyznaczenie alternatywnego terenu kąpielowego, w tym w obrębie morza terytorialnego	-	-	Zgłoszenie wodnoprawne	Art. 394. 1. (Ustawa 2, 2017)

<i>Rodzaj obiektu</i>	<i>Obszar ingerencji</i>	<i>Działanie</i>	<i>Warunek</i>	<i>Wymiar</i>	<i>Warunek</i>	<i>Podstawa prawna</i>
		Budowa stawów, które nie są wypełnione w ramach usług wodnych, a jedynie wodami opadowymi lub roztopowymi, lub wodami podziemnymi o powierzchni o zasięgu oddziaływania nie wykraczającym poza granice terenu będącego własnością zakładu, lub grunty w zasięgu oddziaływania, w przypadku gdy zakład posiada pisemną zgodę właścicieli dotkniętego terenu	Powierzchnia	>5000,00 m <sup>2</sup>	Zgłoszenie wodnoprawne	Art. 394. 1. (Ustawa 2, 2017)
			Głębokość	>3,00 m	Zgłoszenie wodnoprawne	Art. 394. 1. (Ustawa 2, 2017)
		Przebudowa rowu polegająca na wykonaniu przepustu lub innego przekroju zamkniętego	Długość	> 10,00 m	Zgłoszenie wodnoprawne	Art. 394. 1. (Ustawa 2, 2017)
		Przebudowa urządzeń melioracyjnych znajdujących się w pasie drogowym dróg publicznych, terenów kolejowych, lotnisk lub lądowisk	-	-	Zgłoszenie wodnoprawne	Art. 394. 1. (Ustawa 2, 2017)
		Retencja wody w rowach, dla których zasięg oddziaływania nie wykracza poza granice gruntów będących własnością zakładu lub gruntów na obszarze dotkniętym klęską, jeżeli posiada się pisemną zgodę właścicieli dotkniętych gruntów na zatrzymywanie wody w rowach	-	-	Nie jest wymagane zezwolenie ani zgłoszenie wodnoprawne	Art. 395. (Ustawa 2, 2017)
		Zahamowanie spływu z urządzeń odwadniających, w przypadku gdy zakres	-	-	Nie jest wymagane zezwolenie ani	Art. 395. (Ustawa 2, 2017)

<i>Rodzaj obiektu</i>	<i>Obszar ingerencji</i>	<i>Działanie</i>	<i>Warunek</i>	<i>Wymiar</i>	<i>Warunek</i>	<i>Podstawa prawna</i>
		oddziaływania nie wykracza poza granice terenu będącego własnością zakładu lub obszaru na obszarze dotkniętym klęską, na którym zakład posiada pisemną zgodę właścicieli gruntów na zahamowanie odpływu z urządzeń odwadniających			zgłoszenie wodnoprawne	
		Przekształcenie rowów w celu retencji wody, w przypadku gdy zasięg oddziaływania nie wykracza poza granice terenu będącego własnością obiektu lub gruntu na obszarze dotkniętym klęską, jeżeli uzyskano pisemną zgodę właścicieli gruntów na przekształcenie rowów w celu retencji wody	-	-	Nie jest wymagane zezwolenie ani zgłoszenie wodnoprawne	Art. 395. (Ustawa 2, 2017)
		Modernizacja urządzeń odwadniających w celu powstrzymania odpływu, w przypadku gdy zasięg oddziaływania nie wykracza poza granice terenu będącego własnością zakładu lub gruntu na dotkniętym obszarze, w przypadku gdy zakład posiada pisemną zgodę zainteresowanych właścicieli gruntów na przebudowę urządzeń odwadniających w celu powstrzymania odpływu	-	-	Nie jest wymagane zezwolenie ani zgłoszenie wodnoprawne	Art. 395. (Ustawa 2, 2017)
		Budowa oczyszczalni ścieków	Wydajność na dobę	>7,50 m <sup>3</sup>	Zgłoszenie zamiaru budowy	Art. 29. 1. (Ustawa 1, 1994)
		Budowa pomostu	Łączna długość	>25,00 m	Zgłoszenie zamiaru budowy	Art. 29. 1. (Ustawa 1, 1994)

<i>Rodzaj obiektu</i>	<i>Obszar ingerencji</i>	<i>Działanie</i>	<i>Warunek</i>	<i>Wymiar</i>	<i>Warunek</i>	<i>Podstawa prawna</i>
			Wysokość liczona od korony pomostu do dna zbiornika	>2,50 m	Zgłoszenie zamiaru budowy	Art. 29. 1. (Ustawa 1, 1994)
		Budowa budowli spiętrzających i wentylacyjnych poza śródlądowymi drogami wodnymi oraz na terenie parków narodowych, rezerwatów przyrody i parków oraz ich otuliny	Wysokość piętrzenia	>1,00 m	Zgłoszenie zamiaru budowy	Art. 29. 1. (Ustawa 1, 1994)
		Budowa stawów i zbiorników wodnych położonych w całości na użytkach rolnych	Zakres powierzchni	1000,00 – 5000,00 m <sup>2</sup>	Zgłoszenie zamiaru budowy	Art. 29. 1. (Ustawa 1, 1994)
			Głębokość	>3,00 m	Zgłoszenie zamiaru budowy	Art. 29. 1. (Ustawa 1, 1994)
		Budowa stawów i zbiorników wodnych przeznaczonych wyłącznie do celów gospodarki leśnej i położonych na gruntach leśnych Skarbu Państwa, położonych na obszarze Natura 2000	Powierzchni a	>500,00 m <sup>2</sup>	Zgłoszenie zamiaru budowy	Art. 29. 1. (Ustawa 1, 1994)
			Głębokość od naturalnej powierzchni terenu	>2,00 m	Zgłoszenie zamiaru budowy	Art. 29. 1. (Ustawa 1, 1994)
		Budowa przydomowych basenów i stawów	Powierzchni a	>50,00 m <sup>2</sup>	Nie jest wymagane pozwolenie na budowę ani zgłoszenie zamiaru budowy	Art. 29. 1. (Ustawa 1, 1994)
		Budowa obiektów stanowiących urządzenia do odprowadzania wody	-	-	Nie jest wymagane pozwolenie na	Art. 29. 2. (Ustawa 1, 1994)



<i>Rodzaj obiektu</i>	<i>Obszar ingerencji</i>	<i>Działanie</i>	<i>Warunek</i>	<i>Wymiar</i>	<i>Warunek</i>	<i>Podstawa prawna</i>
		Budowa zapór i innych sztucznych, powierzchniowych lub liniowych wzmocnień brzegów rzek i potoków górskich oraz brzegu morza, brzegu morskich wód wewnętrznych, niestanowiących budowli oporowych	-	-	budowę ani zgłoszenie zamiaru budowy  Nie jest wymagane pozwolenie na budowę ani zgłoszenie zamiaru budowy	Art. 29. 2. (Ustawa 1, 1994)
		Budowa stawów i zbiorników wodnych położonych w całości na użytkach rolnych	Powierzchnia	>1000,00 m <sup>2</sup>	Nie jest wymagane pozwolenie na budowę ani zgłoszenie zamiaru budowy	Art. 29. 2. (Ustawa 1, 1994)
			Głębokość	>3,00 m	Nie jest wymagane pozwolenie na budowę ani zgłoszenie zamiaru budowy	Art. 29. 2. (Ustawa 1, 1994)
Dachy zielone	-	-	-	-	-	-
	Dach budynku	-	-	-	-	-
		Przebudowa przegród zewnętrznych i elementów konstrukcyjnych budynków mieszkalnych jednorodzinnych, chyba że prowadzi to do zwiększenia powierzchni oddziaływania obiektu poza działkę, na której znajduje się budynek	-	-	Powiadomienie o budowie	Art. 29. 3. (Ustawa 1, 1994)
		Montaż w obiektach budowlanych – stanowiący lub niestanowiący całości	Wysokość	<3,00 m	Powiadomienie o budowie	Art. 29. 3. (Ustawa 1, 1994)

<i>Rodzaj obiektu</i>	<i>Obszar ingerencji</i>	<i>Działanie</i>	<i>Warunek</i>	<i>Wymiar</i>	<i>Warunek</i>	<i>Podstawa prawna</i>
		<p>techniczno-funkcjonalnej – urządzenia, a także związane z nimi akcesoria i urządzenia zasilające</p> <p>Przeprowadzenie robót budowlanych przy zabytku wpisanym do rejestru, umieszczenie w zabytku wpisanym do rejestru urządzeń technicznych oraz podjęcie innych działań, które mogłyby doprowadzić do naruszenia treści lub zmiany wyglądu zabytku wpisanego do rejestru</p>	-	-	Zezwolenie wojewódzkiego konserwatora zabytków	Art. 36.1. (Ustawa 3, 2003)
		<p>Montaż w obiektach budowlanych – stanowiący lub niestanowiący całości techniczno-funkcjonalnej – sprzęt, a także związane z nim akcesoria i urządzenia zasilające</p>	Wysokość	>3,00 m	Nie jest wymagane pozwolenie na budowę ani zgłoszenie zamiaru budowy	Art. 29. 4. (Ustawa 1, 1994)
Ściany zielone	-	-	-	-	-	-
	Ściana budynku	-	-	-	-	-
		<p>Przebudowa przegród zewnętrznych i elementów konstrukcyjnych budynków mieszkalnych jednorodzinnych, chyba że prowadzi to do zwiększenia powierzchni oddziaływania obiektu poza działkę, na której znajduje się budynek</p> <p>Montaż w obiektach budowlanych – stanowiący lub niestanowiący całości techniczno-funkcjonalnej – urządzenia, a także związane z</p>	-	-	Powiadomienie o budowie	Art. 29. 3. (Ustawa 1, 1994)
		<p>Montaż w obiektach budowlanych – stanowiący lub niestanowiący całości techniczno-funkcjonalnej – urządzenia, a także związane z</p>	Wysokość	<3,00 m	Powiadomienie o budowie	Art. 29. 3. (Ustawa 1, 1994)

<i>Rodzaj obiektu</i>	<i>Obszar ingerencji</i>	<i>Działanie</i>	<i>Warunek</i>	<i>Wymiar</i>	<i>Warunek</i>	<i>Podstawa prawna</i>
		nimi akcesoria i urządzenia zasilające Przeprowadzenie robót budowlanych przy zabytku wpisanym do rejestru, umieszczenie w zabytku wpisanym do rejestru urządzeń technicznych oraz podjęcie innych działań, które mogłyby doprowadzić do naruszenia treści lub zmiany wyglądu zabytku wpisanego do rejestru	-	-	Zezwolenie wojewódzkiego konserwatora zabytków	Art. 36.1. (Ustawa 3, 2003)
		Montaż w obiektach budowlanych – stanowiący lub niestanowiący całości techniczno-funkcjonalnej – sprzęt, a także związane z nim akcesoria i urządzenia zasilające	Wysokość	>3,00 m	Nie jest wymagane pozwolenie na budowę ani zgłoszenie zamiaru budowy	Art. 29. 4. (Ustawa 1, 1994)

### Bibliografia

- Obwieszczenie 1. Obwieszczenie Ministra Rozwoju i Technologii z dnia 15 kwietnia 2022 r. W sprawie ogłoszenia jednolitego tekstu rozporządzenia Ministra Infrastruktury w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie. (2022). Pobrano 27 marzec 2023, z <https://isap.sejm.gov.pl/isap.nsf/DocDetails.xsp?id=WDU20220001225>
- Rozporządzenie 1. Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 26 kwietnia 2013 r. W sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać sieci gazowe i ich usytuowanie. (2013). Pobrano 6 czerwiec 2023, z <https://isap.sejm.gov.pl/isap.nsf/DocDetails.xsp?id=WDU20130000640>
- Rozporządzenie 2. Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 7 sierpnia 2008 r. W sprawie wymagań w zakresie odległości i warunków dopuszczających usytuowanie drzew i krzewów, elementów ochrony akustycznej i wykonywania robót ziemnych w sąsiedztwie linii kolejowej, a także sposobu urządzania i utrzymywania zasłon odśnieżnych oraz pasów przeciwpożarowych. (2008). Pobrano 6 czerwiec 2023, z <https://isap.sejm.gov.pl/isap.nsf/DocDetails.xsp?id=WDU20081530955>

- Rozporządzenie 3. Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 24 czerwca 2022 r. W sprawie przepisów techniczno-budowlanych dotyczących dróg publicznych. (2022). Pobrano 6 czerwiec 2023, z <https://isap.sejm.gov.pl/isap.nsf/DocDetails.xsp?id=WDU20220001518>
- Rozporządzenie 4. Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 26 października 2005 r. W sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać telekomunikacyjne obiekty budowlane i ich usytuowanie. (2005). Pobrano 6 czerwiec 2023, z <https://isap.sejm.gov.pl/isap.nsf/DocDetails.xsp?id=WDU20052191864>
- Rozporządzenie 5. Rozporządzenie Ministra Spraw Wewnętrznych i Administracji z dnia 24 lipca 2009 r. W sprawie przeciwpożarowego zaopatrzenia w wodę oraz dróg pożarowych. (2009). Pobrano 6 czerwiec 2023, z <https://isap.sejm.gov.pl/isap.nsf/DocDetails.xsp?id=WDU20091241030>
- Ustawa 1. Ustawa z dnia 7 lipca 1994 r. - Prawo budowlane. (1994). Pobrano 6 czerwiec 2023, z <https://isap.sejm.gov.pl/isap.nsf/DocDetails.xsp?id=wdu19940890414>
- Ustawa 2. Ustawa z dnia 20 lipca 2017 r. - Prawo wodne. (2017). Pobrano 27 marzec 2023, z <https://isap.sejm.gov.pl/isap.nsf/DocDetails.xsp?id=WDU20170001566>
- Ustawa 3. Ustawa z dnia 23 lipca 2003 r. O ochronie zabytków i opiece nad zabytkami. (2003). Pobrano 27 marzec 2023, z <https://isap.sejm.gov.pl/isap.nsf/DocDetails.xsp?id=wdu20031621568>

Fragment rozprawy zastrzeżony