



**POLITECHNIKA
GDAŃSKA**

Wydział Architektury

Imię i nazwisko autora rozprawy: Justyna Janiak

Dyscyplina naukowa: architektura i urbanistyka

ROZPRAWA DOKTORSKA

Tytuł rozprawy w języku polskim: Architektura zintegrowana z zielenią. Szpalery drzew liściastych jako ochrona przeciwsłoneczna budynków

Tytuł rozprawy w języku angielskim: Architecture integrated with greenery. Rows of deciduous trees as a sun protection for buildings

Promotor

podpis

dr hab. inż. arch. Katarzyna Zielonko-Jung, profesor Politechniki Gdańskiej

Gdańsk, rok 2021





OŚWIADCZENIE

Autor rozprawy doktorskiej: Justyna Janiak

Ja, niżej podpisany(a), wyrażam zgodę na bezpłatne korzystanie z mojej rozprawy doktorskiej zatytułowanej:

Architektura zintegrowana z zielenią. Szpalery drzew liściastych jako ochrona przeciwsłoneczna budynków do celów naukowych lub dydaktycznych.¹

Gdańsk, dnia

.....
podpis doktoranta

Świadomy(a) odpowiedzialności karnej z tytułu naruszenia przepisów ustawy z dnia 4 lutego 1994 r. o prawie autorskim i prawach pokrewnych (Dz. U. z 2006 r., nr 90, poz. 631) i konsekwencji dyscyplinarnych określonych w ustawie Prawo o szkolnictwie wyższym (Dz. U. z 2012 r., poz. 572 z późn. zm.),² a także odpowiedzialności cywilno-prawnej oświadczam, że przedkładana rozprawa doktorska została napisana przeze mnie samodzielnie.

Oświadczam, że treść rozprawy opracowana została na podstawie wyników badań prowadzonych pod kierunkiem i w ścisłej współpracy z promotorem dr hab. inż. arch. Katarzyną Zielonko-Jung, profesorem Politechniki Gdańskiej.

Niniejsza rozprawa doktorska nie była wcześniej podstawą żadnej innej urzędowej procedury związanej z nadaniem stopnia doktora.

Wszystkie informacje umieszczone w ww. rozprawie uzyskane ze źródeł pisanych i elektronicznych, zostały udokumentowane w wykazie literatury odpowiednimi odnośnikami zgodnie z art. 34 ustawy o prawie autorskim i prawach pokrewnych.

Potwierdzam zgodność niniejszej wersji pracy doktorskiej z załączoną wersją elektroniczną.

Gdańsk, dnia

.....
podpis doktoranta

Ja, niżej podpisany(a), wyrażam zgodę na umieszczenie ww. rozprawy doktorskiej w wersji elektronicznej w otwartym, cyfrowym repozytorium instytucjonalnym Politechniki Gdańskiej, Pomorskiej Bibliotece Cyfrowej oraz poddawania jej procesom weryfikacji i ochrony przed przywłaszczeniem jej autorstwa.

Gdańsk, dnia

.....
podpis doktoranta

¹ Zarządzenie Rektora Politechniki Gdańskiej nr 34/2009 z 9 listopada 2009 r., załącznik nr 8 do instrukcji archiwalnej PG.

² Ustawa z dnia 27 lipca 2005 r. Prawo o szkolnictwie wyższym: Rozdział 7 Odpowiedzialność dyscyplinarna doktorantów, Art. 226.







OPIS ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

Autor rozprawy doktorskiej: Justyna Janiak

Tytuł rozprawy doktorskiej w języku polskim: Architektura zintegrowana z zielenią. Szpalery drzew liściastych jako ochrona przeciwsłoneczna budynków

Tytuł rozprawy w języku angielskim: Architecture integrated with greenery. Rows of deciduous trees as a sun protection for buildings

Język rozprawy doktorskiej: polski

Promotor rozprawy doktorskiej: dr hab. inż. arch. Katarzyna Zielonko-Jung, profesor Politechniki Gdańskiej

Data obrony:

Słowa kluczowe rozprawy doktorskiej w języku polski: ulica, drzewa, ochrona przeciwsłoneczna, rozwiązania zacieniające, nasłonecznienie

Słowa kluczowe rozprawy doktorskiej w języku angielskim: street, trees, sun protection, shading, solar radiation

Streszczenie rozprawy w języku polskim: Praca dotyczy integracji drzew i architektury jako formy ochrony przeciwsłonecznej budynku w zabudowie miejskiej. Wykorzystanie zieleni wysokiej jako elementu zacieniającego zabudowę zbadano na przykładzie wybranego układu, tj. ulicy wraz ze szpalerem drzew liściastych wzdłuż każdej z pierzei przy uwarunkowaniach wilgotnego klimatu kontynentalnego. W analizie nasłonecznienia elewacji osłoniętej przez roślinne elementy zacieniające uwzględniono różne warianty odległości zadrzewień od ścian w modelach ulicy o orientacji wschód-zachód i północ-południe oraz o parametrach proporcji H/W równych: 0,2; 0,4; 0,6; 1 i 2. Badania układu wykonano w oparciu o numeryczne metody symulacyjne z wykorzystaniem komponentu godzin nasłonecznienia, który jest dostępny w nakładce Ladybug Tools programu Rhinoceros® 6. Na podstawie otrzymanych wyników stwierdzono, że szpalery drzew liściastych (o badanych parametrach) mogą pełnić rolę rozwiązania alternatywnego bądź uzupełniającego do systemów zacieniających zintegrowanych z budynkami. Skuteczność zieleni w tym zakresie zależy od relacji geometrycznych między zabudową a drzewami oraz od geometrii i orientacji tego modelu względem świata. W pracy przedstawiono również metodę modelowania oraz oceny układów roślinno-architektonicznych z drzewami pod kątem ochrony przeciwsłonecznej zabudowy, którą można wykorzystać jako narzędzie wspomagające projektowanie.

Streszczenie rozprawy w języku angielskim: This work refers to the integration of trees with architecture as a form of sun protection for buildings in the city. The use of trees as a shading element was examined on the example of street with a row of deciduous trees along each frontage under the conditions of a humid continental climate. In the analysis of the insolation of the façade trees were located at different distances in street models oriented along east-west and north-south axis and with ratio parameters H/W: 0,2; 0,4; 0,6; 1 and 2. The research was carried out on the basis of numerical simulation methods using the sun hours component,



which is available in the Ladybug Tools in the Rhinoceros® 6 programme. The obtained results have shown that the rows of deciduous trees (with the tested parameters) may be an alternative or a complementary solution to shading systems integrated with buildings. The effectiveness of greenery as a sun protection of frontage depends on the geometric relations between buildings and trees, as well as on the geometry and orientation of this model. The study also presents the method of modelling and evaluation of greenery-architecture systems with trees in terms of sun protection for buildings, which can be used as a design tool.

Spis treści

Rozdział 1. Wstęp	9
1.1. Wprowadzenie w problematykę pracy	9
1.2. Przedmiot i obszar badań	18
1.3. Problem badawczy.....	19
1.3.1. Praktyczny wymiar problemu badawczego	20
1.4. Aktualny stan badań nad przedmiotową problematyką.....	21
1.4.1. Podjęty temat jako oryginalny i aktualny problem badawczy.....	25
1.5. Cele naukowe pracy	27
1.6. Teza pracy	27
1.7. Konstrukcja pracy i zastosowane metody badawcze.....	28
1.8. Wyjaśnienie kluczowych dla pracy pojęć.....	32
Rozdział 2. Drzewa jako elementy zacieniające w przestrzeni miejskiej	34
2.1. Przepuszczalność promieniowania słonecznego przez drzewa.....	34
2.2. Czynniki wpływające na potencjał zieleni wysokiej.....	38
2.2.1. Uwarunkowania klimatyczne lokalizacji oraz pogoda	39
2.2.2. Parametry drzew	40
2.2.3. Zabudowa.....	44
2.3. Możliwości lokalizacji drzew względem budynku.....	45
2.4. Korzyści i ograniczenia wykorzystania drzew.....	50
2.4.1. Ograniczenia wykorzystania drzew.....	61
Rozdział 3. Drzewa jako elementy ulicy	66
3.1. Warunki insolacji w przestrzeni ulicy	66
3.1.1. Geometria ulicy miejskiej	67
3.1.2. Orientacja względem stron świata	72
3.2. Drzewa w ulicy miejskiej	74
3.2.1. Rola drzew	74
3.2.2. Lokalizacja drzew w ulicy miejskiej. Uwarunkowania współczesne	83
Rozdział 4. Założenia i metoda badawcza	94
4.1. Metoda badań nad stopniem zacieniania elewacji budynków przez drzewa w przestrzeni ulicy.....	94
4.2. Założenia badawcze	96
4.2.1. Zabudowa.....	96
4.2.2. Zieleń	98
4.2.3. Lokalizacja oraz czas.....	99

4.3. Narzędzie badawcze.....	102
4.3.1. Dostosowanie narzędzia do badań.....	106
4.3.2. Model zabudowy.....	109
4.3.3. Model zieleni.....	110
Rozdział 5. Wynik badań własnych.....	119
5.1. Modele referencyjne.....	120
5.1.1. Zacienienie elewacji przez zabudowę.....	120
5.2. Modele ulicy z drzewami jako elementami zacieniającymi elewacje.....	125
5.2.1. Drzewa w modelu ulicy na osi wschód–zachód.....	125
5.2.2. Modele ulicy na osi północ–południe.....	133
Rozdział 6. Wnioski i podsumowanie.....	149
6.1. Szpalery drzew liściastych jako system zacieniający elewacje pierzei ulicznych. Ocena możliwości.....	149
6.1.1. Dyskusja.....	160
6.1.2. Zalecenia rozplanowania szpalerów drzew liściastych jako elementów zacieniających pierzeje uliczne sformułowane na podstawie badań własnych.....	163
6.2. Opracowana metoda badań.....	168
6.3. Podsumowanie pracy.....	170
Bibliografia.....	173
Spis rysunków.....	182
Spis schematów.....	188
Spis fotografii.....	188
Spis tabel.....	190
Załączniki.....	193

Rozdział 1. Wstęp

1.1. Wprowadzenie w problematykę pracy

Promieniowanie słoneczne znacząco wpływa na wszystkie procesy fizyczne zachodzące w przyziemnej warstwie powietrza, jak również na wzajemne relacje transportu ciepła, wilgoci i zanieczyszczeń w dolnej troposferze (Lewińska, 2000). Z uwagi na działanie fotochemiczne, termiczne i bakteriobójcze jest także czynnikiem biometeorologicznym o pierwszorzędym znaczeniu³ (Tyczka, 1976; Holick, 1998; Wacker i Holick, 2013). Od tysiącleci energia słoneczna wykorzystywana była w sposób pasywny przy projektowaniu budynków oraz miast⁴ (Wehle-Strzelecka, 2008). Rozwijano metody, które pozwalały na doświetlenie pomieszczeń oraz czerpanie zysków cieplnych z energii słońca do ogrzewania budynków w zimie. Znane są przykłady rozplanowania zabudowy w miastach starożytnych, m.in. Olintu, Priene, z uwzględnieniem warunków klimatycznych lokalizacji, w tym nasłonecznienia, np. przez otwarcie budynków mieszkalnych od strony południowej (Wehle-Strzelecka, 2008). Na przestrzeni wieków udoskonalano sposoby pozyskiwania, magazynowania i dystrybucji ciepła słonecznego wewnątrz budynku, m.in. poprzez odpowiednią orientację i formę zabudowy, przeszklenia solarne czy właściwe rozplanowanie pomieszczeń. Współcześnie architektura wzbogacona została o nowe możliwości materiałowo-konstrukcyjne i łączy metody pasywne z aktywnymi systemami pozyskiwania energii słonecznej, przykładowo przez wykorzystanie kolektorów słonecznych. Wyżej wymienione rozwiązania dotyczące architektury słonecznej zyskują na znaczeniu w szczególności w regionach o bardziej łagodnym klimacie, gdzie dostęp do światła⁵ i ciepła słonecznego jest pożądanym zwłaszcza w sezonie zimowym. Natomiast w okresie letnim oraz w strefach o dużym nasłonecznieniu i wysokich rocznych temperaturach powietrza priorytetem jest ograniczenie oddziaływania promieniowania słonecznego we wnętrzach i w otoczeniu wyeksponowanych na słońce budynków. Optymalizacja warunków nasłonecznienia jest ważnym wyzwaniem, szczególnie w środowisku współczesnych miast. Problem stanowi zapewnienie dostępu do światła słonecznego na terenach z dużą intensywnością zabudowy⁶ (Brach i Stępiak, 2016; Łukaszewicz, 2019) oraz potrzeba

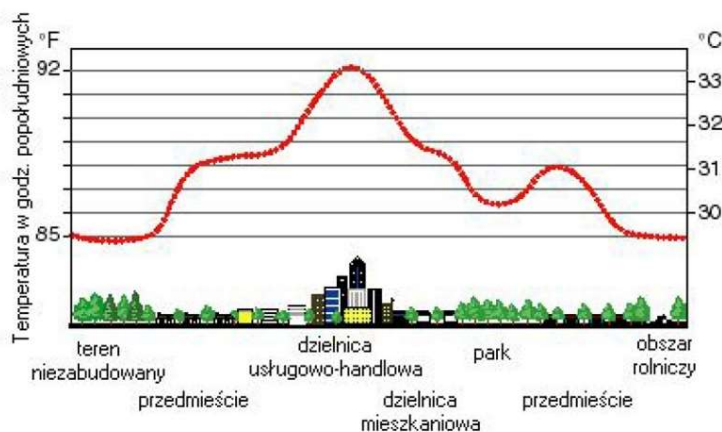
³ Kąpiele słoneczne wykorzystywane są w celach leczniczych i w profilaktyce zdrowotnej m.in. ze względu na wpływ światła słonecznego na syntezę skórnej witaminy D₃ (Tyczka, 1976).

⁴ Informacje o wykorzystaniu energii promieniowania słonecznego w architekturze datowane są na trzecie tysiąclecie p.n.e. Wiele rozwiązań pojawiało się na terenie Bliskiego Wschodu oraz we wschodnim rejonie Morza Śródziemnego (Wehle-Strzelecka, 2008).

⁵ Zapewnienie światła słonecznego w ciągu dnia w pomieszczeniach przeznaczonych na pobyt ludzi jest uregulowane prawnie (Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 22 kwietnia 2002 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie, dział III, rozdział 2).

⁶ Obecnie obserwuje się tendencje do zagęszczania zabudowy wewnątrz miast, co może prowadzić do pogorszenia warunków świetlnych w budynkach (Dąbrowska-Milewska, 2010; Bartnicka, 2010; Łukaszewicz, 2019).

sezonowej ochrony przeciwsłonecznej budynków i terenu. Otwarte przestrzenie publiczne, jak place, skwery, oraz szerokie trakty komunikacyjne, przystosowane m.in. do rosnącego ruchu kołowego czy szynowego, sprzyjają intensywnemu nasłonecznieniu strefy pieszych oraz zabudowy. W okresie letnim może to prowadzić do dyskomfortu termicznego przechodniów oraz użytkowników pomieszczeń, nagranych z powodu ekspozycji słonecznej. W konsekwencji dla zapewnienia optymalnej temperatury we wnętrzu stosowane są chłodzące rozwiązania instalacyjne, najczęściej jednostki klimatyzacyjne, które generują znaczne koszty środowiskowe i ekonomiczne⁷. Ponadto wystawione na działanie promieni słonecznych ściany i dachy budynków oraz utwardzone podłoża, np. ulic czy placów miejskich, akumulując ciepło, przyczyniają się do rozwoju zjawiska tzw. miejskiej wyspy ciepła (Landsberg, 1981; Givoni, 1998). Zjawisko to powoduje wzrost średnich rocznych wartości temperatury powietrza na terenach zurbanizowanych i jest uznawane za negatywne⁸ w klimacie miasta (Lewińska, 2000) (rys. 1).



Rysunek 1. Zjawisko miejskiej wyspy ciepła. Przykład rozkładu temperatury według *Environmental Science. Publisher for Everybody around the Earth*

Źródło: Szczepanowska (2014: 1).

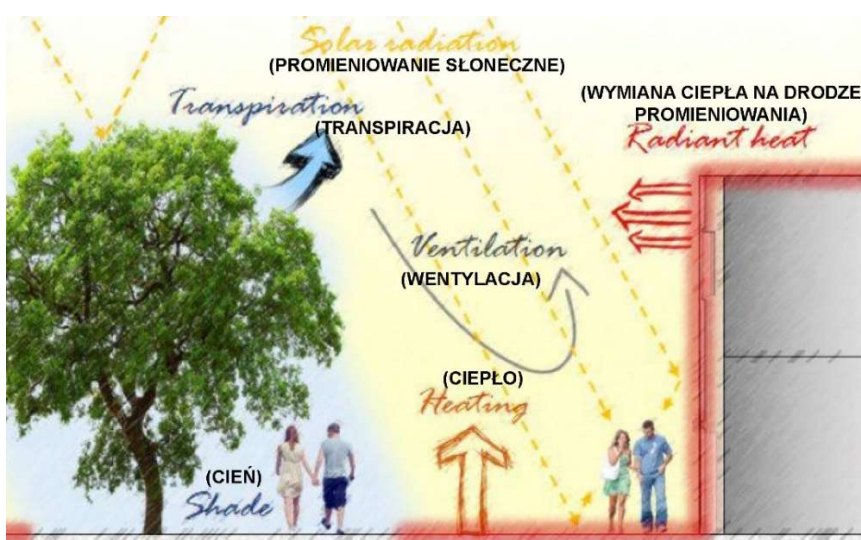
Oddziaływanie miejskiej wyspy ciepła prowadzi do dyskomfortu termicznego ludzi, deficytu tlenu czy wzrostu uczucia parności (Laskowski, 1987; Lewińska, 2000). Ocieplenie terenów zurbanizowanych ma także swoje ekonomiczne konsekwencje, wynikające m.in. ze wzrostu zużycia energii przez różnego rodzaju rozwiązania instalacyjne, jak wentylatory czy klimatyzatory. Przykładowo oszacowano, że w Los Angeles zjawisko miejskiej wyspy ciepła przyczynia się do zwiększenia zapotrzebowania na energię o 1,5 GW, o szacowanej wartości 100 milionów USD rocznie (Akbari i in., 2001). Zjawisko to wpływa również

⁷ Odnotowano 10-procentowy wzrost zapotrzebowania na klimatyzację budynków w ciągu ostatnich 40 lat (Akbari, 2002).

⁸ Poza tym zjawisko miejskiej wyspy ciepła ma również pozytywne oddziaływanie, m.in. sprzyja wzbudzeniu lokalnej cyrkulacji powietrza – bryzy miejskiej czy wpływa na mniejsze zużycie energii cieplnej do ogrzewania budynków w miastach (Akbari, 2002).

negatywnie na zdrowie i życie mieszkańców miast, przyczyniając się do wyższej śmiertelności w okresie letnich fali upałów⁹ (Doick i Hutchings, 2013).

W okresach intensywnej insolacji w przestrzeniach miejskich, niejednokrotnie pozbawionych zieleni i powierzchni biologicznie czynnych, ludzie wyeksponowani na działanie bezpośredniego promieniowania słonecznego narażeni są na stres termiczny¹⁰. Co więcej, efekt ten jest potęgowany przez nagrzane powierzchnie ścian budynków czy utwardzonego terenu, które emitując ciepło na drodze promieniowania, przyczyniają się do wzrostu temperatury ciała człowieka znajdującego się w pobliżu (rys. 2) (Armson, 2012).



Rysunek 2. Najważniejsze czynniki wpływające na komfort termiczny człowieka w przestrzeni miejskiej, np. ulica z drzewami w ciągu dnia

Źródło: Coutts i Tapper (2017: 8).

Na skutek postępującej urbanizacji oraz zmian klimatycznych problemy związane z długotrwałą insolacją przestrzeni miejskich w okresach letnich mogą być z biegiem czasu coraz bardziej odczuwalne dla społeczeństwa i środowiska. Według badań (m.in.: Ballester i in., 2010; Lindberg i Grimmond, 2011; Lee i in., 2016) prognozowany jest wzrost częstotliwości i czasu trwania okresów charakteryzujących się ekstremalnie wysokimi temperaturami. Na terenie centralnej Europy przewiduje się wzrost średniej temperatury w okresie letnim o 2-3°C, co podwoi częstotliwość występowania tzw. fali upałów (Lindberg i Grimmond, 2011). Prognozowany jest również wzrost temperatury powierzchni w zakresie 0,5°C do 6,5°C w ciągu kolejnych 100 lat (Lindberg i Grimmond, 2011). Problem nie ogranicza się wyłącznie do miast zlokalizowanych w klimatach gorących i tropikalnych, ale coraz wyraźniej dotyka również mieszkańców stref umiarkowanych. Według opracowania *Wpływ klimatu na stan zdrowia w Polsce: stan aktualny oraz prognoza do 2100 roku*

⁹ W związku ze zjawiskiem miejskiej wyspy ciepła odnotowano na terenie Wielkiej Brytanii około 1100 przedwczesnych zgonów rocznie (Doick i Hutchings, 2013).

¹⁰ Stres termiczny pojawia się, gdy ciało nie jest w stanie utrzymać swojej wewnętrznej temperatury 37°C (Hacker i Holmes, 2007: 101).

(Błażejczyk i in., 2015) przewiduje się stopniowy wzrost rocznych sum całkowitego promieniowania słonecznego w XXI wieku na terenie Polski¹¹.

Mając powyższe na względzie, w kształtowaniu środowiska życia człowieka wskazane jest poszukiwanie nie tylko sposobów pozwalających na wykorzystanie energii słonecznej, ale i rozwiązań w zakresie osłony terenu i zabudowy przed promieniowaniem słonecznym w okresach intensywnego nasłonecznienia (tab. 1). Przy czym różne metody ochrony przeciwsłonecznej nie powinny ograniczać możliwości korzystania z energii słońca w efektywny ekonomicznie sposób (Olgyay i Olgyay, 1976). W strefach umiarkowanych szerokości geograficznych istotne jest, by stosować rozwiązania zacieniające elewacje w sposób, który pozwoli osłonić ściany przed długotrwałą ekspozycją słoneczną w okresie letnim, a jednocześnie nie ograniczy dostępu promieniowania słonecznego do wnętrza budynku w sezonie grzewczym¹².

Tabela 1. Rozwiązania architektoniczno-urbanistyczne w zakresie ochrony przeciwsłonecznej zabudowy i terenu

Rozwiązania w zakresie ochrony przeciwsłonecznej zabudowy	Rozwiązania w zakresie ochrony przeciwsłonecznej terenu
<ul style="list-style-type: none"> • odpowiednia orientacja budynku względem stron świata • optymalny udział przeszkleń w elewacji • właściwa forma budynku • wewnętrzne i zewnętrzne systemy zacieniające przegrody transparentne • rozwiązania materiałowe transparentnych przegród elewacyjnych 	<ul style="list-style-type: none"> • odpowiednie relacje geometryczne pomiędzy budynkami w przestrzeniach miejskich • właściwa orientacja układów zabudowy względem stron świata • odpowiednia forma budynków • stosowanie elementów zacieniających

Źródło: Opracowanie własne.

Głównym celem wymienionych w tabeli 1 rozwiązań jest zacienienie elewacji budynków i utwardzonych powierzchni terenu, przy czym w przypadku zabudowy największe znaczenie ma ochrona przeszkleń¹³, które najbardziej narażają wnętrza na przegrzewanie. Zacienienie przeszkleń można uzyskać przez właściwe uformowanie bryły budynku i jego elementów. Wskazane jest uzyskiwanie efektu „samozacieniania” fragmentów budynku wymagających ochrony przeciwsłonecznej, np. przez pochylanie ścian „od słońca” (fot. 1) czy właściwe rozrzeźbienie ścian (podcienie, uskoki, gzymsy, okapy dachu itp.) (fot. 2 i 3) (Marchwiński i Zielonko-Jung, 2012).

¹¹ Według prognoz Błażejczyk i in. (2015) sumy promieniowania w Polsce w okresie letnim mogą wzrosnąć z 1676-1678 MJ·m⁻² w latach 2021-2030 do 1730-1737 MJ·m⁻² w ostatniej dekadzie wieku.

¹² „Sezon grzewczy to okres, w którym warunki atmosferyczne powodują konieczność ciągłego dostarczania ciepła w celu ogrzewania obiektów” (definicja zawarta w Rozporządzeniu Ministra Gospodarki z dnia 15 stycznia 2007 r. w sprawie szczegółowych warunków funkcjonowania systemów ciepłowniczych, § 2, pkt 20). W odniesieniu do klimatu Polski można przyjąć, że jest to zazwyczaj okres, który zaczyna się na przełomie października i listopada i trwa do marca bądź kwietnia.

¹³ Zdaniem Krigger i Dorsi (2004) szyba w oknie może przepuścić od 20% do 80% ciepła słonecznego w zależności od rodzaju szkła (za: Misni, 2012).





Fot. 1. Pochylenie ścian elewacyjnych obiektu „The Crystal” (Wilkinson Eyre Architects z Arup Group Limited i z Townshend Landscape Architects) pozwala na zacienianie cieniem własnym budynku różnych fragmentów elewacji w ciągu dnia

Źródło: S. Neumyer, *10 futuristic eco-buildings from around the world*, From the Grapevine, 10.06.2014, <https://www.fromthegrapevine.com/innovation/10-futuristic-eco-buildings-around-world> (dostęp: 10.08.2020).



Fot. 2



Fot. 3

Fot. 2. Mocno wysunięty dach budynku Centrum Rehabilitacji Beit-Halochem (Kimmel-Eshkolot Architects) ogranicza dostęp promieniowania słonecznego do wnętrza obiektu

Źródło: *Beit-Halochem Rehabilitation Center / Kimmel-Eshkolot Architects*, ArchDaily, 10.04.2011, https://www.archdaily.com/126119/beit-halochem-rehabilitation-center-kimmel-eshkolot-architects?ad_medium=gallery (dostęp: 10.08.2020).

Fot. 3. Elewacja z wyraźnie cofniętymi przeszkleniami oraz zamontowanymi osłonami przeciwsłonecznymi w budynku biblioteki The Leo i Dottie Kolligian Uniwersytetu Merced w Kalifornii (Skidmore, Owings & Merrill)
Źródło: *Shading Devices*, 2030 Palette, <http://www.2030palette.org/shading-devices/> (dostęp: 10.08.2020).

Kolejną metodą jest wykorzystanie zewnętrznych lub wewnętrznych systemów zacieniających przeszklenia na elewacji. Przykładowo okiennice, markizy, półki słoneczne stosowane są na zewnątrz budynku (fot. 4 i 5), a zasłony, rolety czy żaluzje wewnątrz pomieszczeń. Innym rozwiązaniem jest użycie w przegrodach transparentnych szkła, które w sposób selektywny reguluje dostęp promieniowania słonecznego do pomieszczeń,

np. szkła dwufunkcyjnego z powłokami typu *solar-control*¹⁴ czy szkła przeciwsłonecznego¹⁵ (Marchwiński i Zielonko-Jung, 2012).



Fot. 4



Fot. 5

Fot. 4. Składające się w poziomie półprzezroczyste drzwi hangarowe z poliwęglanu jako ochrona przeciwsłoneczna elewacji budynku mieszkalnego – autorstwa KieranTimberlake Associates

Źródło: *A House Among and Within the Loblolly Pines*, Pinterest.com, <https://pl.pinterest.com/pin/430164201905870708/> (dostęp: 10.08.2020)

Fot. 5. Zewnętrzne ruchome drewniane okiennice z modrzewia osłaniające przeszklone ściany budynku Politechniki w Aalen (mgf architekten)

Źródło: *Shading device*, IN SITU, 21.03.2011, <https://insituarchitecture.wordpress.com/tag/shading-device/> (dostęp: 10.08.2020).

Projektowanie rozwiązań zacieniających wnętrza budynków wiąże się z umiejętnym wyborem rozwiązań architektonicznych z technologiami budowlanymi o różnym stopniu zaawansowania. Ponadto wymaga ono równoważenia celów ochrony przeciwsłonecznej z możliwie najpełniejszym dostępem pomieszczeń do światła dziennego oraz z otwartością na połączenia widokowe między wnętrzem a otoczeniem. Najbardziej komfortowe rozwiązania umożliwiają dostosowanie pozycji elementów zacieniających do różnych uwarunkowań pogodowych oraz potrzeb ich użytkowników, przez co na ogół są one złożone technologicznie i kosztowne.

W miastach ważnym elementem osłony terenu i budynków przed bezpośrednim promieniowaniem słonecznym są inne budynki. Ich kształt, wysokość, orientacja względem stron świata oraz relacje geometryczne pomiędzy zabudową w istotnym stopniu kształtują

¹⁴ Tego rodzaju szkło przepuszcza promieniowanie widzialne (światło) do pomieszczenia, z kolei promieniowanie podczerwone (ciepło) jest odbijane, co pozwala na ochronę wnętrza przed przegrzaniem (Marchwiński i Zielonko-Jung, 2012).

¹⁵ Z powłokami refleksyjnymi w postaci tlenków metali (Marchwiński i Zielonko-Jung, 2012).

poziom zacienienia na obszarach zurbanizowanych (Lam, 2000 za: Brach i Stępiak, 2016). W przestrzeni miejskiej dodatkową osłonę przed intensywnym nasłonecznieniem mogą zapewnić także przemyślane i zaplanowane rozwiązania, m.in. w formie podcień czy galerii w poziomie parteru budynków (fot. 6), a także różnego rodzaju wolnostojące elementy zacieniające, jak np. parasole lub konstrukcje przekryć dziedzińców, ulic itp. (fot. 7). Niektóre formy ochrony przeciwsłonecznej spotykane w przestrzeniach publicznych mogą być również efektem spontanicznych działań ich użytkowników (fot. 8).



Fot. 6



Fot. 7



Fot. 8

Fot. 6. Podcień jako forma ochrony przeciwsłonecznej w przestrzeni miejskiej
Źródło: *Free Image on Pixabay - Architecture, Arcade, Building*, Pinterest.com, <https://pl.pinterest.com/pin/102668066495318736/> (dostęp: 10.08.2020).

Fot. 7. Zadaszenie części Bulwaru Nadmorskiego w Gdyni
Źródło: Fot. J. Janiak, 2020 r.

Fot. 8. Spontaniczne rozwiązania ochrony przeciwsłonecznej na ulicach Kairu
Źródło: Mahgoub i Hamza, 2020: 3

Większość wymienionych rozwiązań umożliwiających zacienienie przestrzeni miejskich oraz zabudowy wiąże się z koniecznością celowego formowania budynków i ich układów oraz wprowadzenia elementów infrastruktury technicznej. Ponadto wystawione na działanie słońca elementy ochrony przeciwsłonecznej w przestrzeni miejskiej same się nagrzewają i oddają ciepło, przez co przyczyniają się do wzrostu temperatury powietrza¹⁶. Poza tym często bazują na materiałach zaawansowanych technologicznie, niejednokrotnie wymagają zasilania, a także stałej konserwacji, w związku z czym generują koszty – nie tylko ekonomiczne, ale i środowiskowe, w postaci śladu węglowego.

Tymczasem znaczne korzyści w zakresie ochrony przed intensywną insolacją budynku i jego otoczenia w środowisku zabudowanym może przynieść wykorzystanie zieleni, zwłaszcza drzew. Roślinność w architekturze pełni rozmaite role, począwszy od stricte dekoracyjnej po funkcje techniczne, związane z ochroną budynku przed różnymi czynnikami, w tym klimatycznymi. Zieleń sprawdza się jako izolacja akustyczna (Orzeszkowa, 1972; Czarnecki i Sławińska, 1984; Azkorra i in., 2015), osłona przeciwwiatrowa (Ptaszycka, 1950; Orzeszkowa, 1972; Lewińska, 2000; Haber i Urbański, 2010) czy jako dodatkowa warstwa izolacji termicznej obiektu (Perini i Rosasco, 2013), a także pełni istotną rolę w cyklu hydrologicznym (Ellis i in., 2006; Szczepanowska, 2010; Armson, 2012; Januchta-Szostak, 2019). Wykorzystanie elementów tzw. zielonej infrastruktury¹⁷ miasta w rozwiązaniach architektoniczno-urbanistycznych wzmacnia i wspiera korzyści płynące z usług ekosystemowych¹⁸, a także jest istotnym elementem w kształtowaniu przyjaznej dla człowieka przestrzeni miejskiej (Szczepanowska, 2014). Przywołane funkcje zieleni, określane w literaturze przedmiotu mianem „fitosanitarnych” (Chmielewski, 1996), pełnią podobną rolę jak infrastruktura techniczna w mieście. Przy czym, jak zauważa Szczepanowska (2010), zieleń może wspomóc infrastrukturę techniczną, która jest jednofunkcyjna, tym samym pozwalając na częściowe uniezależnienie się od niej. Ponadto drzewa na terenach miejskich pomagają ograniczyć wysokie koszty związane z budową i utrzymaniem tzw. szarej infrastruktury¹⁹ (Łukaszewicz, 2019).

Do osłony powierzchni przed bezpośrednim promieniowaniem słonecznym projektanci mogą zastosować różne rodzaje i formy zieleni. Wykorzystanie elementów roślinnych w skali

¹⁶ W badaniach Steca i in. (2005) odnotowano temperaturę żaluzji zewnętrznych przekraczającą 55°C.

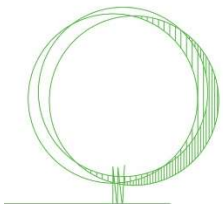
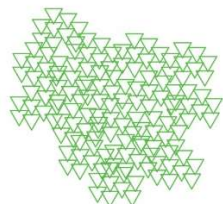

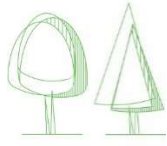

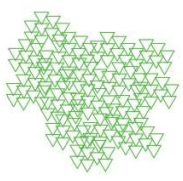

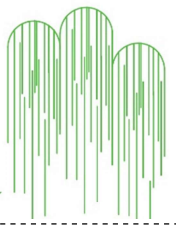
¹⁷ „Zielona infrastruktura to strategicznie zaplanowana sieć obszarów naturalnych i pół-naturalnych z innymi cechami środowiska, zaprojektowana i zarządzana w sposób mający zapewnić szeroką gamę usług ekosystemowych. Obejmuje ona obszary zielone (lub niebieskie w przypadku ekosystemów wodnych) oraz inne cechy fizyczne obszarów lądowych przybrzeżnych oraz morskich” (Szczepanowska, b.d.).

¹⁸ „Usługi ekosystemowe to korzyści, których środowisko dostarcza społeczeństwu i gospodarce”. Wyróżnić można cztery główne typy usług ekosystemów: produkcyjne, regulujące, podtrzymujące i kulturowe (Szczepanowska, b.d.).

¹⁹ „Szara infrastruktura to strefy miasta zajęte przez obiekty inżynierskie i rozwiązania techniczne ograniczające lub uniemożliwiające infiltrację i retencję w gruncie wód opadowych, m.in. budynki, budowle, obszary pokryte nawierzchniami, w tym: place, drogi i in. ulice, chodniki, parkingi i in.” (Łukaszewicz, 2019: 59).

architektonicznej prowadzi do zawiązania się systemów roślinno-architektonicznych. Mianem tym Wacław Celadyn w swojej monografii *Architektura a systemy roślinne. Studium relacji między elementami architektonicznymi a roślinnymi* (1992) określa elementy architektoniczne oraz zieleni znajdujące się blisko siebie, które pozostają w ścisłej relacji oraz oddziałują na siebie w różnym stopniu. W ramach tego studium opracowano systematykę odnoszącą się do przestrzennego charakteru systemów roślinnych oraz ich przestrzennej zależności od elementów architektonicznych. Każdy przedstawiony w tabeli poniżej (tab. 2) system zieleni może zostać wykorzystany jako element ochrony przeciwsłonecznej budynku.

Tabela 2. Systematyka zieleni odnosząca się do przestrzennego charakteru roślin i ich przestrzennej zależności od elementów architektonicznych

				
Systemy brytowe		Systemy powierzchniowe		Systemy punktowo-powierzchniowe
				
drzewa liściaste, iglaste	krzewy	systemy pionowe, tj. pnącza	systemy poziome, np. trawniki	rośliny zwisające

Źródło: Opracowanie własne na podstawie: Celadyn (1992).

Niniejsza praca poświęcona jest wykorzystaniu systemów brytowych, a konkretnie drzew liściastych, do sezonowej ochrony przeciwsłonecznej zabudowy w przestrzeni miasta. Drzewa w odniesieniu do innych typów roślinności są najbardziej efektywnymi elementami przyrodniczymi w mieście pod względem świadczonych usług dla środowiska z uwagi m.in. na duże rozmiary i długowieczność (Szczepanowska, 2014). Zieleń wysoka w większym stopniu niż pozostałe rozwiązania z wykorzystaniem roślin, tj. zielone dachy czy tzw. żyjące ściany, oddziałuje na mikroklimat otoczenia (obniża temperaturę powietrza) i komfort termiczny ludzi (Bochenek i Klemm, 2020). Ponadto w porównaniu do niektórych systemów powierzchniowych²⁰ zieleni wysoka nie wymaga specjalnych rozwiązań, jak np. konstrukcji wsporczych, pozwalających na wykorzystanie roślin jako osłony przeciwsłonecznej ścian budynku. Wiele badań naukowych (np. McPherson i Simpson, 2003; Donovan i Butry, 2009; Pandit i Laband, 2010; Szczepanowska i Sitarski, 2015; Hwang i in., 2016) wskazuje na

²⁰ Z wyłączeniem roślin pnących bezpośrednio porastających ściany budynków.

potencjał drzew jako elementów zacieniających elewacje, a nawet dachy budynków oraz teren. Opracowania naukowe podkreślają znaczenie zacieniającej roli zieleni wysokiej dla zmniejszenia zapotrzebowania na energię do chłodzenia wnętrz wyeksponowanych na słońce budynków w okresach intensywnego nasłonecznienia. Ponadto cień rzucany przez drzewa w porównaniu do zacienienia przez zabudowę wpływa korzystniej na komfort termiczny²¹ użytkowników przestrzeni miejskiej, ponieważ utrzymuje się przez dłuższy czas²² (Armson, 2012; Lee i in., 2013 za: Rahman i Ennos, 2016).

1.2. Przedmiot i obszar badań

Przedmiotem badań jest integracja drzew i architektury jako forma ochrony przeciwsłonecznej budynku w zabudowie miejskiej. Integracja ta polega na właściwym doborze drzew i ich usytuowaniu względem zabudowy w sposób umożliwiający wykorzystanie ich funkcji użytkowych. W pracy odniesiono się do możliwości drzew w zakresie zacieniania budynków. Podjęto rozważania nad kwestią, czy odpowiednio dobrane i usytuowane względem zabudowy drzewa mogą stanowić alternatywne lub uzupełniające rozwiązania w stosunku do innych, znanych metod z wykorzystaniem opisanych wcześniej elementów architektonicznych i budowlanych.

Do badań wybrano ulicę – jako jedną z najbardziej reprezentatywnych i najczęściej spotykanych oraz użytkowanych przestrzeni publicznych we współczesnych miastach (Pluta, 2014). Ponadto zdaniem Shishegar (2013) ulice odgrywają ważną rolę w kształtowaniu klimatu terenów zurbanizowanych²³, m.in. znacząco oddziałują na warunki cieplne w mieście (Lewińska, 2000).

Do obsadzenia ulic wytypowano zieleni wysoką w formie uregulowanych ciągów w postaci szpaleru. Szpaler uliczny to „rzędowe regularne nasadzenia drzew, usytuowane wzdłuż pierzei architektonicznych, często bezpośrednio w strefie ruchu pieszego (w chodniku)” (Fortuna-Antoszkiewicz, 2019: 64). Szpalery uliczne są charakterystyczną formą zadrzewień²⁴ w przestrzeni miejskiej, utrwaloną z czasów historycznych, o dużym znaczeniu kompozycyjnym i krajobrazowym (Fortuna-Antoszkiewicz, 2019). Mogą występować w postaci formowanej jako drzewa cięte lub nieformowanej o zgeometryzowanym lub naturalnym, nieregularnym pokroju korony (Fortuna-Antoszkiewicz, 2019).

²¹ „Komfort cieplny człowieka to stan zadowolenia z warunków cieplnych otoczenia taki, w którym zachowana jest równowaga cieplna organizmu ludzkiego” (Lis, 2015: 183).

²² Badania Lee i in. (2013) przeprowadzone we Freiburgu w Niemczech podczas letnich dni w latach 2007 i 2008 wykazały, że gęstość strumienia promieniowania krótkofalowego w cieniu drzew i zabudowy jest podobna, przy czym zacienienie przez drzewa utrzymuje się dłużej.

²³ Ze względu m.in. na to, że zazwyczaj ponad jedną czwartą obszaru miejskiego zajmują ulice (Shishegar, 2013).

²⁴ „Zadrzewienia to pojedyncze drzewa lub krzewy lub ich skupiska, niestanowiące zbiorowisk leśnych ani terenów zieleni” (Karg, 2009 za: Ziemiańska i Dworniczak, 2014).

W badaniach przyjęto uwarunkowania wilgotnego klimatu kontynentalnego. W strefie tej z uwagi na obserwowane i prognozowane warunki insolacji wskazane jest sięganie po różnego rodzaju sezonowe rozwiązania ograniczające dostęp promieni słońca do wnętrza budynków czy do powierzchni terenu. W tej strefie klimatycznej wytypowane do badań drzewa liściaste są szczególnie wartościowe, gdyż zapewniają okresową ochronę w czasie intensywnego natężenia promieniowania słonecznego, nie ograniczając dostępu do energii słonecznej w sezonie grzewczym.

Wybrany model ulicy wraz ze szpalerami drzew wzdłuż pierzei przy zakładanych uwarunkowaniach klimatycznych ma posłużyć jako przykładowy układ do analizy tych elementów, które są ważne w procesie projektowania architektonicznego bądź urbanistycznego dla wykorzystania zieleni wysokiej do ochrony przeciwsłonecznej elewacji. Jest to przede wszystkim relacja geometryczna pomiędzy wybranymi drzewami a osłanianą zabudową, zależna od geometrii i funkcji rozpatrywanego układu oraz jego orientacji względem stron świata. Praca ma charakter interdyscyplinarny, poruszane są w niej zagadnienia związane z architekturą (geometria obiektów), urbanistyką (układy zabudowy), jak i z architekturą krajobrazu (formy i wybrane parametry zieleni). W toku pracy konsultowano się z architektami krajobrazu z Wydziału Architektury Politechniki Gdańskiej oraz Politechniki Warszawskiej.

1.3. Problem badawczy

Problem badawczy dotyczy poszukiwania najbardziej racjonalnych układów roślinno-architektonicznych z zielenią wysoką z punktu widzenia ochrony budynków przed bezpośrednim promieniowaniem słonecznym w przestrzeni zurbanizowanej w okresach intensywnego nasłonecznienia.

W toku pracy konieczne jest rozważenie poniższych pytań:

- Jakie są możliwości i ograniczenia w wykorzystaniu drzew jako rozwiązań zacieniających zabudowę tworzącą pierzeje ulicy?
- Jak kształtować relację geometryczną pomiędzy drzewami a osłanianą zabudową w przestrzeni ulicy, by zapewnić skuteczną ochronę przed bezpośrednim promieniowaniem słonecznym przy różnej orientacji i geometrii tego układu?
- Czy sformułowane wnioski mogą uzupełnić lub uszczegółowić dotychczasowe wytyczne odnośnie do wykorzystania przez projektantów i planistów drzew jako elementów zacieniających elewacje budynków w zwartej tkance miejskiej?
- Czy możliwe jest wypracowanie metody modelowania układów zwartej zabudowy z zielenią wysoką oraz oceny rozwiązań pod kątem ochrony przeciwsłonecznej budynków w celu wsparcia decyzji w procesie projektowania bądź planowania?

1.3.1. Praktyczny wymiar problemu badawczego

Niniejsza praca wpisuje się w nurty proekologiczne i ideę zrównoważenia we współczesnej architekturze. W obliczu konsekwentnie pogarszających się warunków życia ludzi w miastach (m.in. smog, zanieczyszczone powietrze, fale upałów itp.) na znaczeniu zyskują rozwiązania architektoniczno-urbanistyczne z wykorzystaniem zieleni. Projektanci coraz częściej sięgają po różne formy roślin, w tym drzewa, doceniając nie tylko walory estetyczne, ale i funkcje techniczne związane z ochroną budynku przed różnymi czynnikami, także klimatycznymi. W świetle narastających problemów wynikających z długotrwałej insolacji zabudowy i przestrzeni miejskich w okresach letnich coraz bardziej istotne stają się zagadnienia dotyczące sezonowej ochrony przeciwsłonecznej²⁵. Pomimo rozwoju rozwiązań architektonicznych i technologicznych umożliwiających ochronę przeciwsłoneczną budynków należy rozważyć uzupełniające wykorzystanie drzew liściastych w tej roli. W świetle problemów środowiskowych współczesnych miast ta forma zieleni o symultanicznych funkcjach²⁶ jest nieodłącznym i niezastąpionym elementem miasta XXI wieku. Ważne jest zatem, by maksymalizować korzyści płynące z obecności tych roślin w miastach, w tym celowo dobierać gatunki drzew czy kształtować relacje geometryczne między nimi a budynkami tak, by mogły chronić zabudowę przed nadmiarem słońca.

Podjęty problem badawczy dotyczy dwóch odmiennych elementów, tych pochodzących ze środowiska naturalnego (drzewa) oraz sztucznego (zabudowa), które zintegrowane są w całość jako układ roślinno-architektoniczny. Dotychczas architekci, urbaniści oraz architekci krajobrazu skupiali się przede wszystkim na kompozycyjnych aspektach całości, podczas gdy w niniejszej pracy uwagę zwrócono na środowiskowy wymiar tej relacji. Poruszone w pracy zagadnienia problemowe wpisują się w nurt zrównoważonych rozwiązań w architekturze, które w obliczu postępującej degradacji środowiska życia człowieka zyskują na znaczeniu. Informacje zawarte w niniejszym opracowaniu mogą przyczynić się do promocji proekologicznych metod ochrony przeciwsłonecznej zabudowy w mieście oraz upowszechnić, m.in. wśród projektantów, ideę wykorzystania roślinnych elementów zacieniających. Wnioski z pracy – zarówno w zakresie konkretnych wytycznych, jak też metody samodzielnych badań – mogą być pomocne w procesie projektowania oraz planowania, w tym w opracowywaniu dokumentów planistycznych²⁷, m.in. przy kształtowaniu

²⁵ Zwłaszcza w lokalizacjach – m.in. w strefie wilgotnego klimatu kontynentalnego – gdzie oprócz ograniczenia dostępu promieni słonecznych w okresie letnim istotne jest pozyskiwanie energii słonecznej w sezonie grzewczym.

²⁶ Mowa tutaj o funkcjach klimatycznych, higieniczno-zdrowotnych, hydrologicznych i społecznych. Szczegółowo to zagadnienie zostało przedstawione w rozdziale drugim niniejszej pracy.

²⁷ Ze względu na zmiany klimatyczne i pogarszające się warunki życia w przestrzeniach zurbanizowanych władze miast są zainteresowani i pracują nad strategiami klimatycznymi, które pozwolą przeciwdziałać zjawisku miejskiej wyspy ciepła, m.in. za pomocą zieleni, w tym drzew oraz powierzchni biologicznie czynnych.



konkretnych zapisów regulujących geometrię zabudowy i lokalizację szpalerów drzew. Informacje zawarte w analizach przedstawionych w niniejszej pracy mogą zostać wykorzystane również w mniejszej skali, np. przy planowaniu dzielnic w strefach śródmiejskich.

1.4. Aktualny stan badań nad przedmiotową problematyką

Liczne badania nad wykorzystaniem drzew do ochrony terenu i zabudowy przed bezpośrednim promieniowaniem słonecznym zapoczątkowano w latach 70. XX wieku. Impulsem do naukowego zainteresowania zielenią wysoką jako elementem zacieniającym budynki był kryzys naftowy w USA, na skutek którego poszukiwano metod ograniczenia zużycia energii.

Publikacje poświęcone zacieniającej roli drzew obejmują różne zagadnienia, które można przyporządkować do dwóch grup: pierwszej – związanej z wykorzystaniem zieleni zlokalizowanej w bezpośrednim sąsiedztwie budynku wolnostojącego (najczęściej mieszkalnego jednorodzinne) lub drugiej – obejmującej badania w przestrzeni miejskiej, np. ulicy, placu, dziedzińca (tab. 3). Cel i przedmiot tych opracowań jest różny, poruszane są głównie zagadnienia związane ze zużyciem energii na chłodzenie i ogrzewanie wewnątrz budynków czy dotyczące komfortu cieplnego pieszych.

Pierwsza grupa publikacji poświęcona jest przede wszystkim wymiernym finansowym i środowiskowym korzyściom wynikającym z wykorzystania drzew do zacieniania wolnostojących budynków, głównie mieszkalnych, w zabudowie rezydencjonalnej. W opracowaniach²⁸ badano przede wszystkim wpływ lokalizacji drzew przy różnej odległości od elewacji i warunkach jej ekspozycji słonecznej na obniżenie zapotrzebowania na energię do klimatyzacji pomieszczeń w okresach intensywnego nasłonecznienia o różnych porach dnia. W ramach tych prac porównywano temperaturę powietrza wewnątrz budynków w pełnym słońcu i tych zacienionych przez zielenią wysoką (np. Akbari i in., 1997). Zwracano również uwagę na zmiany w temperaturze powierzchni zewnętrznych ścian budynku po wprowadzeniu drzew jako osłony przeciwsłonecznej (np. Meier, 1990). W niektórych badaniach sprawdzano wpływ wybranych rozwiązań z wykorzystaniem zieleni wysokiej na zapotrzebowanie na energię do ogrzewania pomieszczeń (Hwang i in., 2016). Poruszano problem potencjalnych zysków słonecznych w okresach grzewczych przy zacienianiu elewacji południowej drzewami liściastymi (np. Heisler, 1986a). Przedmiotem badań był również wpływ zacienienia budynku przez zielenią wysoką na zużycie energii elektrycznej do

Przykładowo w Seattle (USA) planuje się zwiększyć powierzchnię koron miejskich z 23% do 30% względem całkowitej powierzchni miasta (Florberg i in., 2013 za: Łukaszewicz, 2019).

²⁸ M.in. Heisler (1986a), Huang i in. (1987), Akbari (2002), McPherson i Simpson (2003), Donovan i Butry (2009), Pandit i Laband (2010), Misni (2012), Hwang i in. (2016).

oświetlenia pomieszczeń światłem sztucznym (Donovan i Butry, 2009). Nieliczne publikacje poświęcono oddziaływaniu drzew osłaniających elewacje w okresach intensywnego nasłonecznienia na komfort termiczny ludzi wewnątrz budynku (Szkordilis i Kiss, 2015). Badania prowadzono w różnych strefach klimatycznych, przy czym znaczna część zagranicznych opracowań w tej grupie dotyczy lokalizacji na terenie USA²⁹ (Simpson i McPherson, 1996; Pandit i Laband, 2010; Hwang i in., 2016; McPherson, 2007). Część badań oparto na symulacjach komputerowych (np. Thayer i in., 1985; Donovan i Butry, 2009; Hwang i in., 2016) lub przeprowadzono je za pomocą pomiarów w terenie, wykorzystując istniejącą zielen i architekturę lub zbudowane na potrzeby pracy modele (np. McPherson i in., 1988; Akbari i in., 1997).

Tabela 3. Główne zagadnienia poruszane w badaniach dotyczących zacieniającej roli drzew

Badana relacja	Drzewo a wolnostojący budynek	Drzewa w przestrzeni miejskiej
Lokalizacja drzew	dzielnice rezydencjonalne	przestrzeń publiczna, głównie ulice i place
Cel badań	<ul style="list-style-type: none"> • zużycie energii na chłodzenie i ogrzewanie pomieszczeń • wpływ na energię elektryczną przeznaczoną do oświetlenia wewnątrz budynku światłem sztucznym • wpływ na mikroklimat wokół budynku • oddziaływanie na komfort termiczny wewnątrz budynku 	<ul style="list-style-type: none"> • wpływ na komfort cieplny ludzi w przestrzeni ulicy • wpływ na mikroklimat przestrzeni miejskiej
Główne badane zagadnienia	<ul style="list-style-type: none"> • zużycie energii elektrycznej na chłodzenie lub ogrzewanie budynków w skali dnia, roku, w czasie godzin szczytu [kWh] • oszczędności z tytułu mniejszego zapotrzebowania na energię do chłodzenia pomieszczeń [USD, zł itp.] • temperatura powierzchni zewnętrznych ścian budynku • temperatura powietrza wewnątrz i na zewnątrz budynku 	<ul style="list-style-type: none"> • temperatura powierzchni terenu i elewacji budynków • temperatura powietrza w przestrzeni miejskiej • wskaźnik PET* • średnia temperatura radiacyjna** • indeks stresu termicznego

* Z ang. *physiological equivalent temperature*, określa „temperaturę powietrza, w której w typowych warunkach wewnętrznych (bez wiatru i promieniowania słonecznego) bilans cieplny ludzkiego ciała jest zrównoważony z taką samą temperaturą skóry i ciała jak w złożonych warunkach zewnętrznych, które mają być poddane ocenie” (Deb i Ramachandraiah, 2010: 2826 – tłum. własne).

** Definiuje się jako „jednolitą temperaturę hipotetycznej obudowy (środowiska), w której człowiek wymienia przez promieniowanie taką samą ilość ciepła jak w niejednorodnym środowisku (obudowie)” (Hui, 2016 – tłum. własne).

Źródło: Opracowanie własne.

Druga część publikacji, dotycząca zacieniającej roli drzew w przestrzeniach publicznych ulic i placów, skupia się przede wszystkim na zagadnieniach związanych z oddziaływaniem zieleni na komfort termiczny ludzi oraz na mikroklimat otoczenia. W opracowaniach na temat komfortu termicznego badano przede wszystkim wpływ zacieniania terenu i zabudowy przez

²⁹ Przykładowo liczne prace autorstwa McPhersona i Simpsona dotyczą obszaru Kalifornii, który wyróżnia bardzo zróżnicowany klimat, umożliwiając przeprowadzenie badań przy m.in. różnych warunkach nasłonecznienia.

zieleń na: wskaźnik PET, średnią temperaturę radiacyjną otoczenia oraz powietrza w układach o różnej orientacji względem stron świata (np. Ali-Toudert i Mayer, 2005, 2006; Emmanuel i in., 2007; Shashua-Bar i in., 2011; Sanusi i in., 2015; Klemm i in., 2015; Lee i in., 2016). Zwracano także uwagę na znaczenie dla komfortu cieplnego funkcji ewapotranspiracji roślinnych elementów zacieniających (Kong i in., 2017). W niektórych badaniach (m.in. Ali-Toudert i Mayer, 2005, 2006) przedstawiano wartość bezpośredniego natężenia promieniowania słonecznego na powierzchniach poziomych i długofalowego promieniowania emitowanego przez teren w ulicach z drzewami i bez.

W pracach dotyczących zacienienia przestrzeni miejskiej zielenią badano także jej wpływ na mikroklimat najbliższego otoczenia, jak wnętrza ulicy, dziedzińca (Shashua-Bar i Hoffman, 2000; Dimoudi i Nikolopoulou, 2003; Shashua-Bar i in., 2010; Bochenek i Klemm, 2020). Opracowania te skupiają się na chłodzącym efekcie zieleni w danym otoczeniu. Są to złożone zagadnienia, w których oprócz zacieniającej roli zieleni uwzględnia się także funkcję transpiracji roślin. W pracach przedstawiany jest najczęściej wpływ drzew na temperaturę powietrza w danym układzie (np. Shashua-Bar i in., 2010). Badania prowadzono w oparciu o symulacje komputerowe (np. Dimoudi i Nikolopoulou, 2003) lub na podstawie pomiarów z terenu (np. Shashua-Bar i Hoffman, 2000).

Odrębną grupę od przedstawionych powyżej publikacji stanowią opracowania poświęcone samym możliwościom zacieniającym zieleni wysokiej. Prace te są związane z badaniami nad stopniem przepuszczalności promieni słonecznych przez korony drzew liściastych (m.in. Armson i in., 2013; Konarska i in., 2014; Balakrishnan i Jakubiec, 2016; Takács i in., 2016). Badania obejmują analizę m.in. wartości promieniowania całkowitego, bezpośredniego na powierzchniach osłoniętych przez zieleń zarówno w okresie wegetacyjnym, jak i w stanie bez ulistnienia. Przedmiotem badań są także parametry drzew, które mają wpływ na efektywność zieleni w zacienianiu. W niektórych badaniach rozważano skuteczność drzew w osłonie przed promieniowaniem słonecznym w zależności od ich gatunku (Armson i in., 2013).

Niewiele publikacji poświęconych jest stricte metodzie badań i oceny drzew jako elementów zacieniających w układach urbanistycznych. Przykładowo Thayer i in. (1985) przedstawili metodę opracowaną na potrzeby badań dotyczących oceny wpływu zacienienia zieleni wysokiej na zużycie energii do ogrzewania i chłodzenia w wolnostojącym budynku mieszkalnym w oparciu o symulację komputerową. Z kolei publikacja autorstwa Hes i in. (2011) poświęcona jest zagadnieniom dotyczącym opracowania modelu drzewa, który można wykorzystać w symulacji zużycia energii w budynku mieszkalnym z zastosowaniem programu komputerowego.

Informacje o znaczeniu zacieniającej roli drzew w środowisku miejskim odnaleźć można w publikacjach dotyczących klimatu miasta autorów takich jak np. Róžański (1959),

Laskowski (1987), Lewińska i in. (1990), Lewińska (2000), Zimny (2005). Temat zacieniającej roli zieleni wysokiej i jej znaczenia dla klimatu miasta poruszali w swoich publikacjach w kontekście ograniczenia i przeciwdziałania zjawisku miejskiej wyspy ciepła m.in.: Souch i Souch (1993), Kurn i in. (1994), Dimoudi i Nikolopoulou (2003), Szczepanowska (2014), Bochenek i Klemm (2020). Zagadnienia związane z ochroną przeciwsłoneczną terenu i zabudowy przez drzewa w przestrzeniach zurbanizowanych pojawiają się również w opracowaniach dotyczących zieleni miejskiej, piszą o tym np. Ptaszycka (1950), Orzeszkowa (1972), Chmielewski (1996), Czerwień i Lewińska (2000), Szczepanowska (2001, 2012), Gawłowska (2004), Bartnicka i Ullman (2009), Haber i Urbański (2010), Szulc (2013), Kosmala (2016), Rosłon-Szeryńska (2019), Łukaszewicz (2019). Wiele publikacji dotyczących tematu tzw. zielonej infrastruktury odwołuje się do korzyści płynących z obecności drzew w przestrzeniach zurbanizowanych, w tym m.in. związanych z zacieńjącą rolą zieleni, m.in. Gill i in. (2007), Kowalski (2010), Szumacher (2011a), Doick i Hutchings (2013), Szczepanowska (2015), Cole i in. (2017), Grochulska-Salak i in. (2018), Szulczewska (2018).

Środowiskowe funkcje zieleni, w tym także zacieńjącą rolę drzew, obejmują również prace związane z ideą zrównoważonego rozwoju w architekturze i urbanistyce np. takich autorów jak Givoni (1998), Marchwiński i Zielonko-Jung (2012), Zielonko-Jung (2013), Stangel (2013), Bać (2016). Tematyka ta poruszana jest także w publikacjach poświęconych zagadnieniom dotyczącym integracji form roślinnych z architekturą przez m.in. Celadyna (1992), Dudzińską-Jarmolińską (2010), Zinowiec-Cieplik (2017a) oraz Schröpfera i in. (2019).

Niektóre z przytoczonych powyżej publikacji prezentowane były w ramach międzynarodowych konferencji naukowych (m.in. Ali-Toudert i Mayer, 2005; Szkordilis i Kiss, 2015; Balakrishnan i Jakubiec, 2016), co wskazuje, że przedmiotowy temat porusza aktualny i istotny problem, który budzi zainteresowanie świata nauki.

W Polsce tematykę związaną z wykorzystaniem drzew do zacieńnienia terenu i zabudowy w przestrzeni miejskiej wielokrotnie porusza w swoich publikacjach prof. dr hab. Halina Barbara Szczepanowska³⁰. W ramach badań prowadzonych z zespołem IGPiM na terenie dzielnicy Praga-Północ w Warszawie (w latach 2011-2013) wyceniono wartość usług świadczonych przez drzewa dla miasta, w tym oszczędności z tytułu zmniejszonego zużycia energii elektrycznej. Zagadnienia te zostały ujęte także w opracowaniach m.in. dr. Jakuba Kronenberga (Uniwersytet Łódzki), który podjął badania m.in. nad wyceną drzew przyulicznych w centrum Łodzi (Giergiczny i Kronenberg, 2012). Temat zacieńjącą rolę drzew w środowisku miejskim poruszany jest w publikacjach odnoszących się do koncepcji

³⁰ Wraz z zespołem badawczym Instytutu Gospodarki Przestrzennej i Mieszkalnictwa (IGPiM obecnie Krajowy Instytut Polityki Przestrzennej i Mieszkalnictwa) oraz Szkoły Głównej Gospodarstwa Wiejskiego prof. H.B. Szczepanowska opracowała metodę wyceny wartości drzew na terenach miejskich dla warunków polskich opublikowaną w latach 2008-2009.

usług ekosystemowych w pracach takich autorów jak m.in. Solon (2008), Szumacher (2011b), Zinowiec-Cieplik (2017b) czy Boćkowski i Rogowski (2018).

Pomocne przy wyborze drzew jako elementów ochrony przeciwsłonecznej w przestrzeni miejskiej są opracowania dendrologiczne, w których odnaleźć można informacje odnośnie do odmian i gatunków roślin odpowiednich do różnego rodzaju nasadzeń miejskich, w tym przyulicznych, np. autorstwa Senety i Dolatowskiego (2001), Łukasiewicza (2011), Borowskiego i Latochy (2006). Rekomendacje co do gatunków drzew odpowiednich do przestrzeni intensywnie zurbanizowanej zamieszczane są także w strategiach kształtowania zieleni dla miast, m.in. dla Warszawy autorstwa Borowskiego i in. (2016) czy dla Łodzi opracowane przez Stowarzyszenie Architektury Krajobrazu (Drozda i in., 2018).

Opracowania dotyczące zieleni miejskiej, w tym zacierającej roli zadrzewień, publikowane są również na stronach internetowych Stowarzyszenia Architektury Krajobrazu³¹ czy Fundacji Sendzimira³², która zajmuje się m.in. promocją proekologicznych działań oraz ochroną i poprawą stanu środowiska naturalnego.

Informacje co do możliwych form kształtowania zieleni wysokiej do osłony przeciwsłonecznej zabudowy w przestrzeniach zurbanizowanych zawarte są przede wszystkim w pracach dotyczących kompozycji zieleni w mieście autorstwa m.in. Tołwińskiego (1963), Bogdanowskiego (1976), Orzeszek-Gajewskiej (1984), Wejcherta (1974), Gzella (1996), Oleksyn (2011), Sobczyńskiej (2014), Rybak-Niedziółki (2018), Fortuny-Antoszkiewicz (2019), Łukaszkiwicz (2019). Publikacje te wskazują w szczególności na znaczenie i rolę drzew w przestrzeniach publicznych (Pluta, 2014), dla krajobrazu współczesnego miasta (Nyka, 2012), a także przedstawiają zasady kompozycji najbardziej popularnych form nasadzeń ulicznych, tj. szpalerów i alei drzew.

1.4.1. Podjęty temat jako oryginalny i aktualny problem badawczy

Wśród wielu publikacji³³ dotyczących problemu wykorzystania drzew do zacieniania wolnostojących budynków, głównie mieszalnych, przeważają opracowania związane z architekturą krajobrazu i klimatologią. Brakuje jednak prac o charakterze interdyscyplinarnym przedstawiających temat z perspektywy architekta i urbanisty. Mowa tu o zagadnieniach związanych z wpływem elementów architektonicznych i urbanistycznych na skuteczność zastosowania zieleni wysokiej jako zacieniającego elementu w przestrzeni intensywnie zabudowanej. W szczególności chodzi o tematykę znaczenia geometrii zabudowy przestrzeni miejskich oraz orientacji układu względem stron świata dla

³¹ <https://sak.org.pl/> (dostęp: 15.09.2020).

³² <https://sendzimir.org.pl/> (dostęp: 15.09.2020).

³³ M.in. Akbari i in. (1997), McPherson i Simpson (2003), Donovan i Butry (2009), Laband i Sophocleus (2009), Pandit i Laband (2010), Hwang i in. (2016).

wykorzystania zacieniającej roli zieleni w okresach intensywnego natężenia promieniowania słonecznego.

W literaturze przedmiotu poruszany jest temat relacji przestrzennych pomiędzy zielenią wysoką a pojedynczym budynkiem, jednak żadna z publikacji nie przedstawia tego zagadnienia w dostatecznie szeroki i szczegółowy sposób w odniesieniu do lokalizacji w przestrzeni ulicy. Opracowania skupiają się na możliwym usytuowaniu drzew w obrębie linii rozgraniczających teren ulicy bez odniesienia do możliwej powierzchni zacienienia otoczenia czy ścian budynków (np. Borowski i Pstrągowska, 2009). Brakuje informacji i wytycznych dla projektantów i planistów, jak stosować roślinne elementy zacieniające jako sezonową osłonę wyeksponowanych na słońce elewacji budynków tworzących zwartą pierzeję ulicy przy różnych uwarunkowaniach (geometrii układu, orientacji ścian względem stron świata). Żadna z prac nie zawiera szczegółowej analizy i porównania zacienionych powierzchni ścian w rozmaitych wariantach lokalizacji osłaniających ich drzew we wnętrzu ulicy w różnych warunkach insolacji. Tymczasem takie badania pozwoliłyby projektantom zweryfikować możliwość zastosowania zieleni wysokiej w danych układach, w tym rodzaj i rozmiar roślinnych elementów zacieniających. Dodatkowo szczegółowa analiza umożliwiłaby ocenę, czy proponowana forma ochrony przeciwsłonecznej elewacji z wykorzystaniem drzew wymaga dodatkowych rozwiązań, np. na wyższych częściach elewacji.

Zauważalny jest również brak opracowań poświęconych stricte analizie stopnia zacienienia elewacji budynków tworzących pierzeję ulicy przez drzewa przy różnych uwarunkowaniach dotyczących:

- geometrii otaczającej zabudowy,
- orientacji układu względem stron świata,
- relacji geometrycznych pomiędzy roślinami a budynkiem.

Publikacje skupiają się przede wszystkim na wymiernych korzyściach wynikających z zacieniania powierzchni przez drzewa, tj. na wpływie m.in. na zapotrzebowanie na energię do klimatyzacji lub ogrzewania pomieszczeń czy na spadek temperatury powierzchni osłoniętych ścian. Z racji istnienia niewielu opracowań, szczególnie w zakresie architektury i urbanistyki, poruszających stricte problem „współpracy” budynków z zielenią na potrzeby sezonowej ochrony zabudowy przed bezpośrednim promieniowaniem niniejsza praca może uzupełnić lukę w tym obszarze wiedzy.

Niewiele prac poświęconych jest metodom badań układów zabudowy z drzewami w zakresie oceny stopnia zacienienia elewacji przez zieleń w oparciu o numeryczne metody symulacyjne. Przedstawione metody bazują na specjalistycznym oprogramowaniu, które nie jest przeznaczone do szybkich analiz. Brakuje informacji o prostych narzędziach, które mogą być wykorzystane przez architektów lub urbanistów w procesie projektowania i planowania

do oceny układów roślinno-architektonicznych z zielenią wysoką pod kątem ochrony przeciwsłonecznej zabudowy.

1.5. Cele naukowe pracy

Niniejsza praca ma kilka celów, które w sposób holistyczny pozwolą spojrzeć na wybrany układ roślinno-architektoniczny przez pryzmat jego technicznych i środowiskowych funkcji. Praca ma wykazać możliwości pełniejszego wykorzystania potencjału użytkowego drzew, szczególnie przez architektów i urbanistów. Przełożyć się to może na zwiększenie świadomości ekologicznej w projektowaniu i planowaniu oraz na lepsze zrozumienie konieczności ochrony drzew istniejących oraz terenów, na których można sadzić nowe drzewa.

Pierwszym celem jest określenie możliwych sposobów kształtowania układów roślinno-architektonicznych z zielenią wysoką w przestrzeni miejskich ulic do ochrony przeciwsłonecznej elewacji budynków w okresach intensywnego nasłonecznienia w warunkach wilgotnego klimatu kontynentalnego. Pozwoli to rozeznaczyć potencjał wykorzystania drzew do zacieniania pierzei w zależności od geometrii układu, jego orientacji względem stron świata oraz relacji przestrzennych między roślinami a architekturą.

Kolejnym zadaniem jest zbadanie możliwości opracowania bardziej szczegółowych niż dotychczas znane wytycznych oraz sformułowanie wniosków, które można będzie odnieść do występujących w mieście układów roślinno-architektonicznych jako sezonowej osłony zabudowy przed promieniami słońca. Wskazania te mogą mieć znaczenie dla kształtowania przestrzeni miejskich takich jak ulice, place, dziedzińce, w których drzewa będą świadomie zastosowane jako pełnowartościowy element ochrony przeciwsłonecznej budynków.

Celem jest także opracowanie metody badań układów zabudowy z drzewami jako formy ochrony przeciwsłonecznej budynku. W założeniu ma być ona przeznaczona dla architektów bądź urbanistów jako narzędzie wspomagające proces projektowania i planowania dzięki wykorzystaniu przystępnego programu przeznaczonego dla projektantów. Wypracowana metoda ma wspomóc ocenę i weryfikację przyjętych rozwiązań zacieniających elewację z wykorzystaniem zieleni wysokiej w przestrzeniach miejskich. Zamiarem jest także sprawdzenie zaproponowanej metody badań oraz oceny jej aplikacyjności w projektowaniu i planowaniu.

1.6. Teza pracy

Obecnie, gdy postępująca urbanizacja przyczynia się do gwałtownej degradacji środowiska życia człowieka, wzrasta ekologiczna rola zieleni. Produkcja tlenu, regulacja zanieczyszczeń w atmosferze, sekwestracja dwutlenku węgla, normowanie cyklu

hydrologicznego oraz inne funkcje czynią drzewa niezbędną częścią tkanki miejskiej, która znacznie przyczynia się do poprawy jakości życia człowieka. Obecność zieleni w przestrzeni zurbanizowanej może być także wykorzystana do ochrony zabudowy przed oddziaływaniem czynników klimatycznych, szczególnie promieniowania słonecznego. Drzewa mogą sprawdzać się jako element zacieniający, skutecznie blokując dostęp bezpośredniego promieniowania słonecznego do osłanianych powierzchni. Potencjał zieleni wysokiej w zakresie zacieniania przy zastanych uwarunkowaniach lokalizacyjnych (w tym klimatycznych, pogodowych itp.) zależy od różnych elementów³⁴, które dotyczą zagadnień z zakresu architektury i urbanistyki, ale i dendrologii czy arborystyki. Architekt, urbanista lub architekt krajobrazu w procesie projektowania i planowania może wpłynąć na racjonalne zastosowanie zieleni wysokiej do zacieniania zabudowy. Niniejsza praca poświęcona jest tym aspektom architektonicznym i urbanistycznym, które są istotne dla skutecznego wykorzystania drzew do osłony elewacji przed bezpośrednim promieniowaniem słonecznym w przestrzeni ulicy. W związku z tym sformułowano następującą tezę:

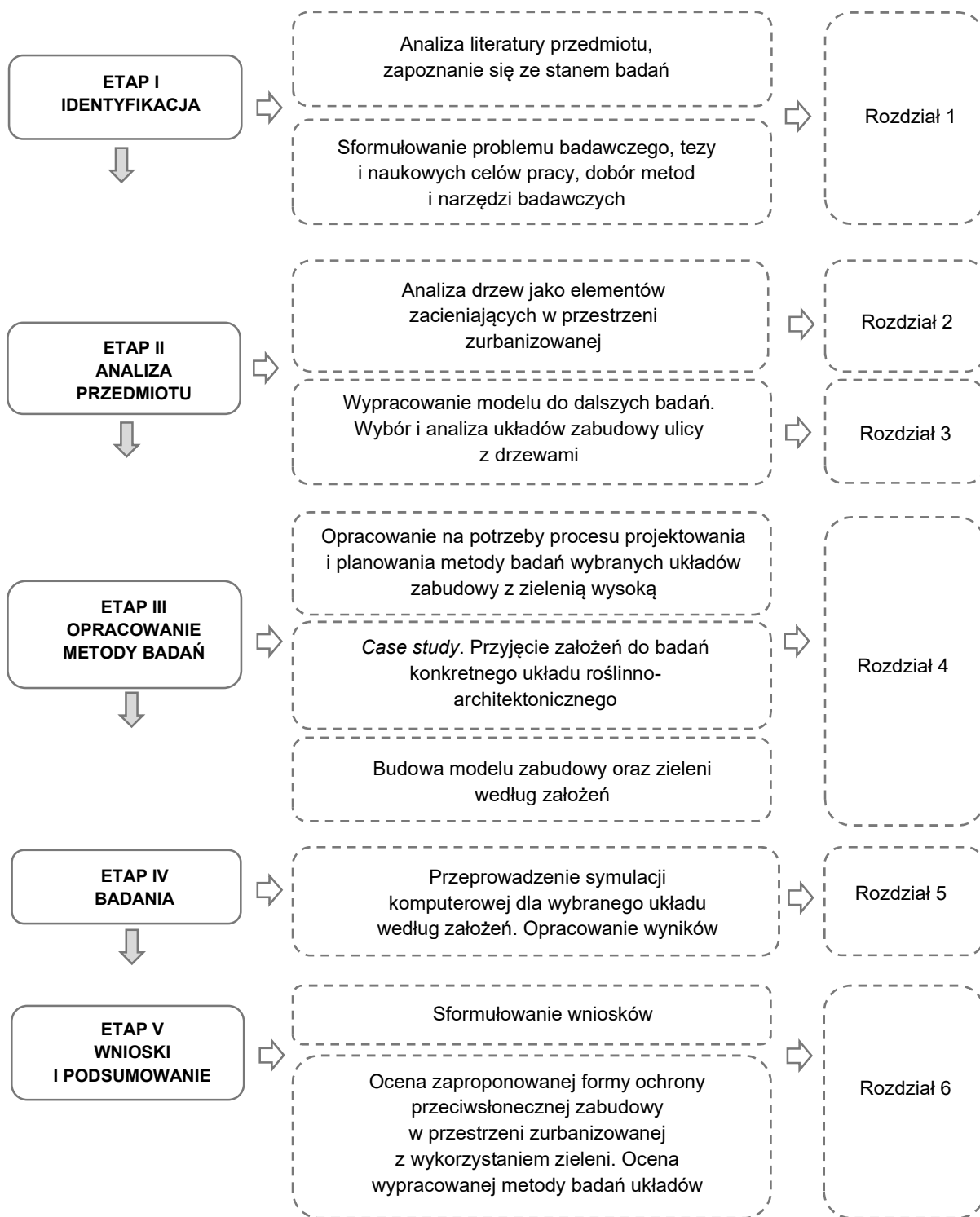
W wilgotnym klimacie kontynentalnym szpalery drzew liściastych lokalizowane wzdłuż ulic mogą pełnić rolę ochrony przeciwsłonecznej dla pierzei elewacyjnych, tworząc alternatywę dla systemów zacieniających zintegrowanych z budynkami. Zakres powierzchni i czas zacieniania zależą od relacji geometrycznych między zabudową a drzewami oraz od geometrii i orientacji tego układu względem stron świata.

Dostępne współcześnie metody symulacyjne można wykorzystać jako narzędzie wspomagające podejmowanie racjonalnych decyzji projektowych w zakresie możliwości wykorzystania drzew liściastych jako formy ochrony przeciwsłonecznej budynku.

1.7. Konstrukcja pracy i zastosowane metody badawcze

Praca składa się z pięciu głównych etapów, które prowadzą do realizacji przyjętych na wstępie naukowych celów pracy. Poniższy schemat (schemat 1) przedstawia etapy, a w nich kolejne kroki podejmowanych działań oraz ogólną strukturę pracy.

³⁴ Czynniki wpływające na efektywność zieleni wysokiej w zakresie zacieniania zabudowy zostały przedstawione w rozdziale drugim niniejszej pracy.



Schemat 1. Poszczególne etapy wraz z kolejnymi krokami podejmowanych działań oraz ogólna struktura pracy
Źródło: opracowanie własne.

Etap pierwszy pracy dotyczy identyfikacji problemu badawczego. Odpowiada on rozdziałowi pierwszemu, w którym zawarto niniejszy wstęp poświęcony wprowadzeniu w problematykę badań, a także przedstawiono główne zagadnienia problemowe. W tej

części zaprezentowano również cele pracy oraz tezę, której dowód przeprowadzono w kolejnych rozdziałach, a także podstawową terminologię.

Etap drugi dotyczy analizy przedmiotu badań. Analizę potencjału i możliwości wykorzystania drzew liściastych jako elementów zacieniających elewacje budynków w przestrzeniach zurbanizowanych przedstawiono w rozdziale drugim. W tym miejscu opisano czynniki wpływające na skuteczność zieleni wysokiej w osłonie powierzchni przed bezpośrednim promieniowaniem słonecznym oraz korzyści płynące z takich rozwiązań. Przedstawiono także systematykę rozwiązań ochrony przeciwsłonecznej zabudowy z zastosowaniem drzew.

Na tym etapie dokonano też wyboru i analizy modelu do dalszych badań, tj. ulicy ze zlokalizowanymi w jej wnętrzu drzewami, który opisano w rozdziale trzecim. Pierwsza część tego rozdziału poświęcona jest najważniejszym czynnikom, które kształtują warunki nasłonecznienia wytypowanego modelu. Z kolei druga zawiera analizę możliwości i ograniczeń w lokalizowaniu drzew jako elementów osłony przeciwsłonecznej pierzei ulicy ze względu na: rozplanowanie układu drogowego, podstawy prawne i główne wytyczne regulujące sytuowanie zieleni przyulicznej. Zaprezentowano także schematy rozwiązań lokalizacji drzew o podstawowych typach wielkości w trzech wybranych modelach ulic, które w praktyce są obsadzone tymi roślinami w mieście.

Etapy trzeci, czwarty i piąty związane są z pracą nad badaniami własnymi. Pierwszy z wymienionych odpowiada rozdziałowi czwartemu, w którym przedłożono opracowaną przez autorkę metodę badań nad stopniem zacieniania elewacji pierzei ulicy osłoniętych przez drzewa. Opisano także przyjęte założenia badawcze oraz szczegółowo zaprezentowano zastosowane narzędzie badawcze. Przedstawiono ponadto zbudowane na potrzeby symulacji komputerowej modele zabudowy oraz zieleni według przyjętych wytycznych.

Kolejny, czwarty etap poświęcono przeprowadzeniu symulacji komputerowej dla wybranego modelu według przyjętych założeń. Wyniki badań układów referencyjnych, tj. bez drzew, jak i rozpatrywanych wariantów modelu roślinno-architektonicznego zaprezentowano w rozdziale piątym.

Etap piąty obejmuje konkluzje z przeprowadzonych badań. W rozdziale szóstym zawarto wnioski ogólne dotyczące wyników badań oraz ocenę wykorzystanej metody i narzędzia badawczego. Sformułowano wytyczne w zakresie wykorzystania drzew jako elementów zacieniających elewacje pierzei ulicy oraz potwierdzono przyjętą w pracy tezę.

W celu realizacji postawionych w pracy celów oraz aby uzasadnić słuszność sformułowanej tezy, dobrano kilka metod naukowych³⁵ na różnych etapach pracy (tab. 4).

Tabela 4. Metody badań zastosowane na różnych etapach pracy

Etap pracy	Wykorzystane w pracy metody badawcze	Zastosowanie
Etap I	• metoda intuicyjna	• nakreślenie problemu badawczego
	• metoda konstrukcyjna	• opracowanie planu i struktury pracy, jak i wybór metody realizacji postawionych celów
	• metoda kwerendy dostępnej literatury, w tym specjalistycznych artykułów naukowych	• określenie stanu dotychczasowej wiedzy, jak i jej braków
	• analiza i krytyka zebranego piśmiennictwa	• rozeznanie współczesnych metod badawczych stosowanych w obszarach związanych z tematem pracy
Etap I	• obserwacje własne	• identyfikacja problemów w przestrzeniach miejskich wynikających z długotrwałej ekspozycji słonecznej w okresach intensywnego nasłonecznienia
		• zapoznanie się z rozwiązaniami z wykorzystaniem zieleni, w tym drzew, do sezonowej ochrony przeciwsłonecznej w przestrzeni zurbanizowanej
Etap II	• analiza	• analiza potencjału i możliwości wykorzystania drzew do zacieniania budynków w przestrzeniach zurbanizowanych
Etap II		• analiza wariantów lokalizacji drzew w różnego rodzaju modelach ulic
		• analiza tych elementów architektonicznych i urbanistycznych, które mają wpływ na efektywność rozwiązań wykorzystujących potencjał drzew liściastych w zacienianiu osłanianych budynków w przestrzeni ulicy
Etap III	• metoda konstrukcyjna	• opracowanie metody badań wybranego układu zabudowy wraz z drzewami
Etap III		• budowa modelu zabudowy i zieleni według założeń
Etap IV	• numeryczne metody symulacyjne	• przeprowadzenie badań wybranego modelu roślinno-architektonicznego w różnych wariantach lokalizacji zieleni, geometrii układu i warunkach nasłonecznienia
Etap V	• metoda porównawcza	• porównanie wyników symulacji wybranych konfiguracji układów referencyjnych z modelami z zielenią
	• analiza • synteza	• ocena i wskazanie najbardziej racjonalnych rozwiązań w zakresie wykorzystania drzew do zacieniania pierzei
Etap V		• sformułowanie wniosków i wytycznych
		• ocena opracowanej metody badań nad stopniem zacieniania elewacji pierzei przez zieleń wysoką

Źródło: Opracowanie własne.

³⁵ Powołano się na systematykę metod badawczych zaproponowaną przez Józefa Pietera (1967) w książce *Ogólna metodologia pracy naukowej*, Zakład im. Ossolińskich, Wydawnictwo Polskiej Akademii Nauk, Wrocław–Warszawa–Kraków.

1.8. Wyjaśnienie kluczowych dla pracy pojęć

Terminologia zastosowana w pracy wywodzi się z literatury naukowej, w tym również zagranicznej (angielskojęzycznej). W celu uniknięcia rozbieżności w interpretacji tekstu oraz dla jasnego i dokładnego zrozumienia przedstawionych w pracy analiz i wniosków poniżej przedstawiono najważniejsze i najczęściej używane terminy:

- układ roślinno-architektoniczny – w niniejszej pracy rozumiany jest jako układ budynek–drzewo, w którym wzajemnie powiązane elementy zieleni oraz architektury pozostają względem siebie w pewnej relacji geometrycznej. Podobnego określenia używa W. Celadyn w swojej monografii *Architektura a systemy roślinne. Studium relacji między elementami architektonicznymi a roślinnymi* (Politechnika Krakowska im. Tadeusza Kościuszki, Kraków 1992). Pojęcie „układ” według internetowego słownika języka polskiego PWN³⁶ rozumiane jest jako „całość składająca się z powiązanych wzajemnie elementów”. Wykorzystanie tego terminu w odniesieniu do badanego modelu drzew zacieniających elewacje pierzei wskazuje na integralną całość architektury i zieleni, które tworzą formę ochrony przeciwsłonecznej, oraz na łączące ich relacje przestrzenne;
- integracja zieleni z budynkiem – na potrzeby pracy definiowana jako powiązanie funkcjonalne i przestrzenne drzew z architekturą w celu stworzenia formy ochrony przeciwsłonecznej zabudowy;
- pierzeja – ciąg frontowych elewacji budynków ustawionych w szeregu po jednej stronie ulicy lub placu³⁷. W niniejszej pracy termin ten odnosi się do zabudowy o charakterze zwartym, w której poszczególne budynki tworzą układ szeregowy, zajmując całą szerokość frontu działki budowlanej;
- insolacja – inaczej nasłonecznienie, określana jest jako stosunek energii promieniowania słonecznego padającego na daną powierzchnię poziomą (w jednostce czasu) do wielkości tej powierzchni [J/m^2s]³⁸;
- okres intensywnego nasłonecznienia – w pracy odnosi się do miesięcy w półroczu letnim: maja, czerwca, lipca i sierpnia, kiedy to całkowite natężenie promieniowania słonecznego na powierzchnię poziomą w miesiącu wynosi ponad $100\ 000\ W/m^2$ ⁽³⁹⁾, a średnia wartość usłonecznienia jest w tym okresie największa⁴⁰;

³⁶ *Układ*, Słownik języka polskiego PWN, <https://sjp.pwn.pl/sjp/uklad;2532331.html> (dostęp: 08.08.2020).

³⁷ Definicja według: *Pierzeja*, Wikipedia, <https://pl.wikipedia.org/wiki/Pierzeja> (dostęp: 09.08.2020).

³⁸ Definicja według: *Nasłonecznienie*, Encyklopedia PWN, <https://encyklopedia.pwn.pl/encyklopedia/nas%C5%82onecznienie.html> (dostęp: 09.08.2020).

³⁹ Według informacji udostępnionych przez Ministerstwo Inwestycji i Rozwoju dotyczących typowych lat meteorologicznych i statystycznych danych klimatycznych do obliczeń energetycznych dla wybranej lokalizacji. Źródło: www.gov.pl/web/inwestycje-rozwoj/dane-do-obliczen-energetycznych-budynkow (dostęp: 10.01.2019).

⁴⁰ Na podstawie danych dla Płocka- miasta, które zostało wybrane do badań, średnia wartość godzin słonecznych w latach 2000-2008 jest najwyższa w miesiącu maju, czerwcu, lipcu i sierpniu w roku meteorologicznym. WeatherOnline,

- natężenie promieniowania słonecznego – to „gęstość mocy promieniowania padającego na powierzchnię, tj. iloraz strumienia promieniowania padającego na powierzchnię i pola tej powierzchni lub ilość w jednostce czasu energii promieniowania padającego na jednostkowe pole tej powierzchni [W/m^2]” (Chwieduk, 2004 za: Matuszko, 2010);
- ochrona przeciwsłoneczna – osłona powierzchni przed promieniowaniem słonecznym przez różne elementy, obiekty wolnostojące, w tym zieleni wysoką. W niniejszych badaniach ochrona przeciwsłoneczna elewacji przez drzewa obejmuje osłonę przed bezpośrednim promieniowaniem słonecznym;
- ekspozycja słoneczna elewacji – oznacza wystawienie elewacji na działanie promieniowania słonecznego, tj. ściany zewnętrzne budynku pozostają całkowicie lub częściowo nieosłonięte przed padającymi na nie promieniami słońca;
- łączna powierzchnia zacieniania – w przypadku prowadzonych badań jest to powierzchnia elewacji, która znalazła się w cieniu drzew uwzględniając cały badany przedział czasowy, tj. 9 godzin.

Rozdział 2. Drzewa jako elementy zacieniające w przestrzeni miejskiej

2.1. Przepuszczalność promieniowania słonecznego przez drzewa

Drzewa stanowią skuteczną osłonę przed bezpośrednim promieniowaniem słonecznym⁴¹ zarówno dla powierzchni wertykalnych, jak i pionowych (Szczepanowska, 2010; Armson i in., 2013; Abdel-Aziz, 2014; Szkordilis i Kiss, 2015). Preferowane są drzewa liściaste, które można wykorzystać do sezonowej ochrony przeciwsłonecznej – w okresie letnim zapewniają zacienienie, podczas gdy w sezonie grzewczym umożliwiają dostęp promieni słońca do wnętrza osłanianego budynku (Abdel-Aziz, 2014). Zdaniem Kong i in. (2017) zacienienie przez zielenią wysoką może znacznie ograniczyć ilość promieniowania słonecznego docierającą do osłanianych powierzchni dzięki koronie, w której ulistnienie częściowo (rys. 3):

- odbija promieniowanie krótkofalowe⁴²,
- absorbuje promieniowanie słoneczne, potrzebne do wzrostu i funkcji biologicznych rośliny, takich jak np. fotosynteza, respiracja, transpiracja.

Natomiast tylko w niewielkim stopniu liście pozwala na przeniknięcie promieniowania słonecznego do głębszych warstw korony, zatem i do osłanianych powierzchni. Zielenią charakteryzuje się również niską pojemnością cieplną i wykorzystuje znaczną część padającego na jej powierzchnię promieniowania słonecznego.

Potencjał zacieniania drzew jest często określony na podstawie wartości przepuszczalności promieniowania słonecznego przez koronę (Takács i in., 2016). W odniesieniu do drzew jako elementów ochrony przeciwsłonecznej stosowany jest również współczynnik zacieniania korony drzewa SC (Dougherty, 1958; Hes i in., 2011). Wartość tego parametru zawiera się między 0 a 1, gdzie 1,0 oznacza pełne przepuszczenie promieniowania słonecznego, a 0,0 całkowite zacienienie.

⁴¹ W cieniu drzew obniżone jest nie tylko promieniowanie krótkofalowe, ale również i długofalowe (Konarska i in., 2014; Akbari i in., 2001). Według badań Kong i in. (2017) obniżenie promieniowania słonecznego i długofalowego przez drzewa może być na podobnym poziomie.

⁴² Albedo (tj. stosunek ilości promieniowania słonecznego odbitego do ilości promieniowania padającego na powierzchnię) zieleni wynosi średnio 0,15 do 0,25, tj. niewiele więcej niż materiałów takich jak cegła czy beton (0,10 do 0,15) (Oke, 1978 za: Rahman i Ennos, 2016). Jednak uwzględniając ewapotranspirację, albedo powierzchni biologicznie czynnych oszacowano na 0,40, co odpowiada wartościom reprezentatywnym dla jasnych powierzchni (Kurn i in., 1994).

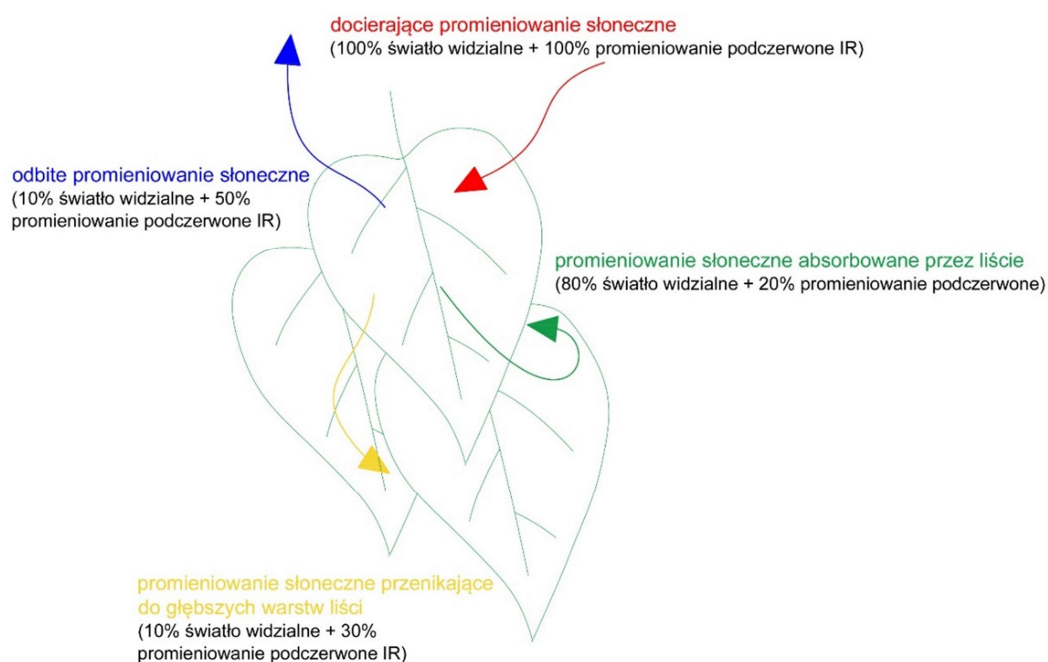
Przepuszczalność promieniowania słonecznego liczona jest jako stosunek (Takács i in., 2016):

$$IG/IR$$

gdzie

IG – całkowite natężenie promieniowania słonecznego w cieniu wybranego do badań drzewa [W/m²],

IR – rzeczywista wartość natężenia promieniowania słonecznego mierzona w lokalizacji odniesienia, tj. miejskiej stacji pogodowej, gdzie niebo nie jest zasłonięte przez stałe elementy otoczenia [W/m²]⁴³.



Rysunek 3. Promieniowanie słoneczne, które jest absorbowane, odbijane i częściowo przenika do głębszych warstw liści

Źródło: Opracowanie własne na podstawie: Kong i in. (2017).

Stopień przepuszczalności promieni słońca przez drzewa związany jest z parametrami charakterystycznymi dla danego gatunku⁴⁴ oraz z cechami indywidualnymi drzew, wynikającymi m.in. z wieku roślin, etapu ich rozwoju i kondycji (tab. 5) (Abreu i Labaki, 2008).

⁴³ Dane potrzebne do ustalenia wartości tego parametru można uzyskać za pomocą pomiarów natężenia promieniowania słonecznego w terenie przy wykorzystaniu solarymetru (Konarska i in., 2014) albo stosując metody fotograficzne (Balakrishnan i Jakubiec, 2016).

⁴⁴ W badaniach, które przeprowadzili Takács i in. (2016) w ciągu dwóch dni 29 i 30 września 2014 roku w Segedynie (Węgry), odnotowano wartość przepuszczania promieni słońca w zakresie: od 0 do max. 0,5 dla lipy drobnolistnej (*Tilia cordata*), od 0,1 do max. 0,5 dla perełkowca japońskiego (*Sophora japonica*), między 0 a 0,4 dla wiązowca zachodniego (*Celtis occidentalis*) oraz od 0,1 do 0,9 dla kasztanowca pospolitego (*Aesculus hippocastanum*).

Tabela 5. Parametry drzew wpływające na wartość przepuszczalności promieniowania słonecznego

Parametry charakterystyczne dla danego gatunku	Cechy indywidualne drzew
<ul style="list-style-type: none"> • pokrój* • parametry liści takie jak: kształt, kolor, kąt nachylenia, możliwy do osiągnięcia rozmiar • sezonowa obecność owoców, kwiatów • możliwa do osiągnięcia wysokość drzewa 	<ul style="list-style-type: none"> • gęstość i struktura korony • parametry związane z listowiem: rozmiar, kąt nachylenia • kształt korony • liczba owoców i kwiatów • budowa morfologiczna związana z etapem rozwoju, kondycją i lokalizacją

* „Pokrój, czyli wysokość i charakterystyczna forma bryłowa rośliny uzyskana w warunkach nieskrępowanej przestrzeni” (Fortuna-Antoszkiewicz, 2019: 47).

Źródło: Opracowanie własne.

Wpływ na przepuszczalność korony ma również charakterystyka promieniowania słonecznego, przy czym w badaniach Konarskiej i in. (2014) zauważono, że związek pomiędzy wysokością słońca a przepuszczalnością promieni słonecznych w ciągu dnia jest bardzo mały. Wartość przepuszczalności bezpośredniego promieniowania słonecznego przez korony drzew w czasie dnia kształtuje się na podobnym poziomie⁴⁵.

Natomiast w ciągu roku przepuszczalność korony drzew wykazuje duże zróżnicowanie. Według różnych źródeł wysoka zieleń liściasta może zminimalizować bezpośrednie promieniowanie słoneczne na osłanianych powierzchniach do około 80-90% w sezonie letnim i do 40-60% w okresie, gdy rośliny są bezlistne (m.in.: Thayer i in., 1985; Heisler, 1986a, 1986b; Armson i in., 2013; Abdel-Aziz, 2014; Konarska i in., 2014; Takács i in., 2016). W tabeli 6 zestawiono wyniki przykładowych prac dotyczących przepuszczalności promieni słońca przez koronę wybranych gatunków drzew.

Tabela 6. Wyniki wybranych badań dotyczących przepuszczalności promieniowania słonecznego przez korony drzew

Badania	Opis zieleni	Ograniczenie promieniowania słonecznego w okresie letnim	Ograniczenie promieniowania słonecznego przy bezlistnej zieleni
G.M. Heisler, 1986. <i>Effects of individual trees on the solar radiation climate of small buildings</i> . „Urban Ecology”, 9(3), s.337-359	<ul style="list-style-type: none"> • dwa klony cukrowe (<i>Acer saccharum</i> Marsh.) • podobnej wielkości platan klonolistny (<i>Platanus acerifolia</i>) • klon zwyczajny (<i>Acer platanoides</i>) • drzewa osłaniające budynek mieszkalny jednorodzinny w lokalizacji State College w Pensylwanii, USA, w dni 21 lipca i 21 stycznia 	<ul style="list-style-type: none"> • w bezchmurnym dniu odnotowano na południowej elewacji obniżenie wartości promieniowania słonecznego o około 80% • przy bezchmurnym niebie drzewa średnio obniżyły wartości promieniowania słonecznego na elewacji południowej od 65% do 85% • w centralnej części cienia obniżenie wartości promieniowania słonecznego sięgało od 72 do 90% 	<ul style="list-style-type: none"> • przy bezchmurnym niebie drzewa średnio obniżyły wartości promieniowania słonecznego na elewacji południowej od 30% do 34%

⁴⁵ Pozwala to na przyjęcie stałej wartości współczynnika zacienienia w badaniach z udziałem zieleni wysokiej jako elementu ochrony przeciwsłonecznej.

Badania	Opis zieleni	Ograniczenie promieniowania słonecznego w okresie letnim	Ograniczenie promieniowania słonecznego przy bezlistnej zieleni
<p>J. Konarska, F. Lindberg, A. Larsson, S. Thorsson, B. Holmer, 2014. <i>Transmissivity of solar radiation through crowns of single urban trees – application for outdoor thermal comfort modelling</i>. „Theoretical and Applied Climatology”, 117(3-4), s. 363-376</p>	<ul style="list-style-type: none"> • zbadano 4 dorosłe drzewa liściaste: kasztanowiec (<i>Aesculus hippocastanum</i>), lipę drobnolistną (<i>Tilia cordata</i>), brzozę brodawkowatą (<i>Betula pendula</i>), wiśnię (<i>Prunus</i>) • lokalizacja na terenie miasta Göteborg, dane zebrane w ciągu 9 bezchmurnych dni o różnej porze roku w latach 2011 i 2012 	<ul style="list-style-type: none"> • drzewa ograniczyły 95-99% bezpośredniego promieniowania słonecznego, a 85% do 92% całkowitego na powierzchni terenu 	<ul style="list-style-type: none"> • drzewa ograniczyły średnio 48-60% bezpośredniego promieniowania słonecznego na powierzchni terenu
<p>D.M. Abdel-Aziz, 2014. <i>Effects of Tree Shading on Building's Energy Consumption</i>. „Architectural Engineering Technology”, 3(4), s. 1-7</p>	<ul style="list-style-type: none"> • drzewa: albicja jedwabista (<i>Albizia julibrissin</i>), płomień Afryki (<i>Delonix regia</i>) i figowiec pospolity (<i>Ficus carica</i>) • lokalizacja na terenie miasta Amman w Jordanii, badania w dniach 21 lipca oraz 21 września 	<ul style="list-style-type: none"> • obniżenie wartości promieniowania słonecznego przez zielen na elewacjach o ponad 70%: wschodniej o 72,94%, a zachodniej o 73,30% między 8.00 a 16.00 w badanym dniu 	<ul style="list-style-type: none"> • nie dotyczy
<p>F. Szkordilisz, M. Kiss, 2015. <i>Shading Effect of Alley Trees and Their Impact on Indoor Comfort</i>. ICUC 9 Międzynarodowa Konferencja na temat klimatu miejskiego z sympozjum na temat środowiska miejskiego. 20-24 lipca 2015, Tuluza, Francja</p>	<ul style="list-style-type: none"> • drzewa dorosłe: wiązowiec zachodni (<i>Celtis occidentalis</i>), perełkowiec japoński (<i>Sophora japonica</i>), lipa drobnolistna (<i>Tilia cordata</i>) • zieleń zlokalizowana od strony południowo-zachodniej budynku • symulacja przeprowadzona dla lokalizacji w Segedynie (Węgry) dla dnia 16 lipca 	<ul style="list-style-type: none"> • wiązowiec zachodni obniżył wartości bezpośredniego promieniowania słonecznego na południowo-zachodniej elewacji o 60%, perełkowiec japoński o 19,30%, a lipa o 24,80% 	<ul style="list-style-type: none"> • nie dotyczy
<p>L. Kong, K. Ka-Lun Lau, Ch. Yuan, Y. Chen, Y. Xu, Ch. Ren, 2017. <i>Regulation of outdoor thermal comfort by trees in Hong Kong</i>. „Sustainable Cities and Society”, 31, s. 12-25</p>	<ul style="list-style-type: none"> • zbadano 12 różnych gatunków drzew: akacja (<i>Acacia confusa</i>), tung molukański (<i>Aleurites moluccana</i>), <i>Bauhinia Blakeana</i>, welniak azjatycki (<i>Bombax malabaricum</i>), rzewnia skrzypolistna (<i>Casuarina equisetifolia</i>), płomień Afryki (<i>Delonix regia</i>), figowiec tępy (<i>Ficus microcarpa</i>), liwistona chińska (<i>Livistona chinensis</i>), <i>Macaranga tanarius</i>, <i>Melaleuca leucadendron</i>, peltoforum oskrzydłone (<i>Peltophorum pterocarpum</i>), rojstona królewska (<i>Roystonea regia</i>) 	<ul style="list-style-type: none"> • największe obniżenie wartości promieniowania krótkofalowego o 78% odnotowano dla drzewa peltoforum oskrzydłone (<i>Peltophorum pterocarpum</i>) przy SVF= 0,8 • 8 z 12 badanych gatunków drzew obniżyło średnio wartość promieniowania słonecznego ponad 50% niezależnie od SVF w układach 	<ul style="list-style-type: none"> • nie dotyczy

Badania	Opis zieleni	Ograniczenie promieniowania słonecznego w okresie letnim	Ograniczenie promieniowania słonecznego przy bezlistnej zieleni
	<ul style="list-style-type: none"> zieleni znajdowała się w układach o różnych współczynnikach widoczności nieba SVF (<i>sky view factor</i>), wynoszących 0,2 i 0,8 w lokalizacji w Hongkongu w okresie od czerwca do sierpnia 2009 r. 		

Źródło: Opracowanie własne na podstawie prac: Heislera (1986a), Konarskiej i in. (2014), Abdela-Aziza (2014), Szkordilis i Kissa (2015), Kong i in. (2017).

2.2. Czynniki wpływające na potencjał zieleni wysokiej

Drzewa mogą pełnić rolę skutecznych elementów osłony zabudowy przed promieniowaniem słonecznym, o ile uwzględnione zostaną różnego rodzaju czynniki, które mają wpływ na: powierzchnię, czas trwania i pojawienia się zacienienia. W systemach roślinno-architektonicznych są one związane z poszczególnymi elementami tego układu, a więc z zielenią, zabudową oraz warunkami klimatycznymi i pogodowymi panującymi w danej lokalizacji (schemat 2). Jak wskazano w tabeli 7 większą część z nich (m.in. liczbę nasadzeń, ich lokalizację względem zabudowy) można zaplanować lub modyfikować, wpływając w ten sposób na skuteczność zaproponowanych rozwiązań przeciwsłonecznych z wykorzystaniem drzew.

Tabela 7. Czynniki mające wpływ na powierzchnię, czas zacienienia zabudowy przez drzewa. Symbol T oznacza tak, N – nie, a C – częściowo

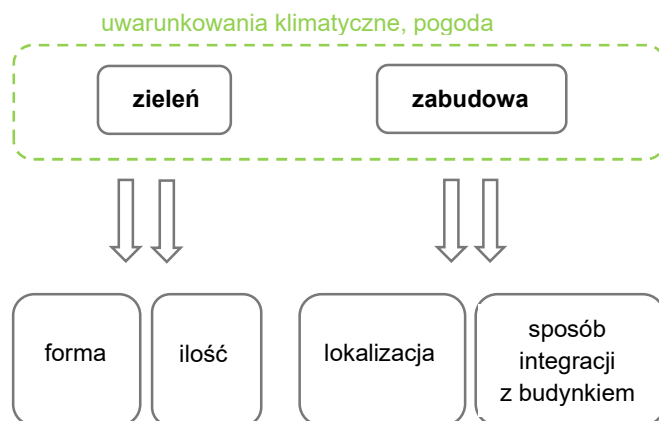
Czynniki związane z drzewami	Czynniki, które można planować	Czynniki, które można modyfikować
<ul style="list-style-type: none"> • morfologia drzewa • wiek • parametry korony, w tym gęstość, pokrój • parametry ulistnienia • kondycja drzewa • pielęgnacja, formowanie drzewa • liczba drzew 	<ul style="list-style-type: none"> T* T C** C** N C T 	<ul style="list-style-type: none"> C N C N T T T
Czynniki niezwiązane z drzewami		
uwarunkowania zewnętrzne lokalizacji		
<ul style="list-style-type: none"> • lokalizacja – szerokość geograficzna • pora roku, dnia • pogoda – stopień zachmurzenia nieba 	<ul style="list-style-type: none"> C N N 	<ul style="list-style-type: none"> N N N
zabudowa		
<ul style="list-style-type: none"> • relacje geometryczne między drzewami a zabudową • orientacja względem stron świata układu roślinno-architektonicznego • geometria zabudowy otaczająca zieleni 	<ul style="list-style-type: none"> T T T 	<ul style="list-style-type: none"> C C C

* Wybór gatunku drzewa wpływa na decyzję o jego pokroju.

** Związane są z wybranym gatunkiem drzewa.

Źródło: Opracowanie własne.

W układach roślinno-architektonicznych mnogość parametrów związanych z cechami gatunkowymi i jednostkowymi drzew, a także różnych rozwiązań w zakresie usytuowania i sposobu integracji zieleni wysokiej z budynkiem pozwala dobrać odpowiedni sposób ochrony przeciwsłonecznej dla zabudowy w danej lokalizacji (schemat 2).

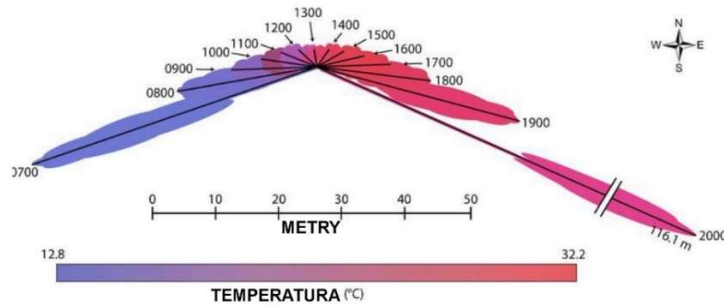


Schemat 2. Parametry wpływające na różnorodność rozwiązań wykorzystujących drzewa do ochrony przeciwsłonecznej zabudowy
Źródło: Opracowanie własne.

2.2.1. Uwarunkowania klimatyczne lokalizacji oraz pogoda

W zależności od uwarunkowań klimatycznych lokalizacji różne są cele w zakresie ochrony przeciwsłonecznej zabudowy. Na obszarach o klimacie gorącym bądź tropikalnym priorytetem jest osłona przed intensywnym nasłonecznieniem w ciągu roku. W tym przypadku drzewa powinny zapewnić jak największe zacienienie terenu i budynków. Z kolei w klimatach umiarkowanych i chłodnych wskazana jest sezonowa ochrona przeciwsłoneczna zabudowy. Zieleń wysoka powinna zapewnić zacienienie w okresach letnich, zwłaszcza w godzinach o największym natężeniu promieniowania słonecznego, nie ograniczając dościa promieni słońca do wnętrza budynków w sezonie grzewczym. Ponadto w strefach tych ważnym zagadnieniem związanym z ochroną przeciwsłoneczną zabudowy jest dostęp do światła dziennego.

Skuteczność drzew w osłonie przeciwsłonecznej zależy od wysokości słońca nad horyzontem, która zmienia się wraz z szerokością geograficzną, porami roku i dnia. Szerokość geograficzna wpływa na zakres rzucanego przez zielen cienia (Heisler, 1986a; Doick i Hutchings, 2013). Zmiany w powierzchni zacienienia widoczne są również w ciągu dnia. W okolicach wschodu i zachodu słońca, gdy jest ono nisko na nieboskłonie, cień ulega znacznemu wydłużeniu (rys. 4).



Rysunek 4. Zacienienie przez 9,1-metrowe drzewo w mieście Sacramento w Kalifornii w dniu 15 lipca 2007 roku w godzinach 7.00-20.00

Źródło: Donovan i Butry (2009: 665).




Wpływ na przepuszczalność promieniowania słonecznego przez drzewa ma również pogoda. Skuteczność drzew w osłonie powierzchni przed promieniami słońca jest większa przy bezchmurnym niż przy zachmurzonym lub pochmurnym niebie, kiedy udział promieniowania odbitego i rozproszonego jest większy. W dni pochmurne, zwłaszcza w przypadku pojedynczych drzew, promieniowanie rozproszone i odbite częściowo dociera do osłanianych powierzchni nie tylko przez liście, ale z różnych stron otoczenia (Konarska i in., 2014). W tym wypadku jedynie zieleń wysoka zlokalizowana bardzo blisko zabudowy może stanowić częściową ochronę dla ścian przed rozproszonym promieniowaniem słonecznym (Thayer i in., 1985).

2.2.2. Parametry drzew

Ali-Toudert i Mayer (2005) za najważniejszy parametr wpływający na rozmiar zacienionej powierzchni uznają pokrój i objętość korony drzewa. Wyróżnić można pięć podstawowych pokrojów drzew (tab. 8) (Szopińska i Zygmunt-Rubaszek, 2010).

Tabela 8. Pokrój drzew

Podstawowe typy pokroju drzew	Schemat
kulisty	
owalny	

Podstawowe typy pokroju drzew	Schemat
kolumnowy	
stożkowaty	
rozłożysty (parasolowaty)	

Źródło: Opracowanie własne na podstawie Szopińska i Zygmunt-Rubaszek (2010).

Formę korony można określić także przez współczynnik kształtu liczony jako stosunek pionowego do poziomego promienia korony (Szopińska i Zygmunt-Rubaszek, 2010). Zieleń o wysokim współczynniku kształtu to drzewa wysokie o wąskich koronach (fot. 9), podczas gdy te o niskim parametrze są mniejsze i mają bardziej rozłożyste korony (Szopińska i Zygmunt-Rubaszek, 2010) (fot. 10).



Fot. 9



Fot. 10

Fot. 9. Topola czarna (*Populus nigra*)

Źródło: <http://2.bp.blogspot.com/-XAAobCg-FXQ/UvT9-VSMa5I/AAAAAAAAABio/CHvUhYllvbo/s1600/Populus+Nigra+-+Lombardy+Poplar+03.jpg> (dostęp: 25.08.2020).

Fot. 10. Surmia bignoniowa (*Catalpa bignonioides*)

Źródło: Fot. J. Janiak, 2020 r.

Pokrój i objętość korony w kontekście zacieniającej roli zieleni mogą być kluczowe, ponieważ zmienność sezonowa jej średnicy (np. z 4 m do 16 m) jest większa niż gęstość (60% do 90%) (Ali-Toudert i Mayer, 2005). W tej samej lokalizacji wysokie drzewo o wąskiej i gęstej koronie zapewni mniej zacinienia niż to o rozłożystej i luźnej (Simpson i McPherson, 1996). Z kolei cień rzucany przez drzewo wysokie i o bardziej eliptycznym pokroju może być dużo większy niż powierzchnia jego korony⁴⁶ (Armson, 2012). Zwłaszcza kiedy słońce jest nisko na nieboskłonie, np. w ciągu dnia w okolicach wschodu i zachodu, zacinienie przez drzewo o wysokim współczynniku kształtu może być większe niż przez zieleń niższą z rozłożystą koroną (Armson i in., 2013). Na podstawie pomiarów morfologicznych korony drzew, uwzględniając kąt słońca, można obliczyć powierzchnię cienia rzucanego przez zieleń (A_n) według formuły (Monteith i Unsworth, 1990 za: Armson, 2012):

$$A_n = \pi b^2 \left\{ 1 + \frac{a^2}{b^2 \tan^2 \beta} \right\}^{0.5}$$

gdzie

- a – pionowy promień korony drzewa,
- b – poziomy promień korony drzewa,
- β – kąt padania promieni słońca.

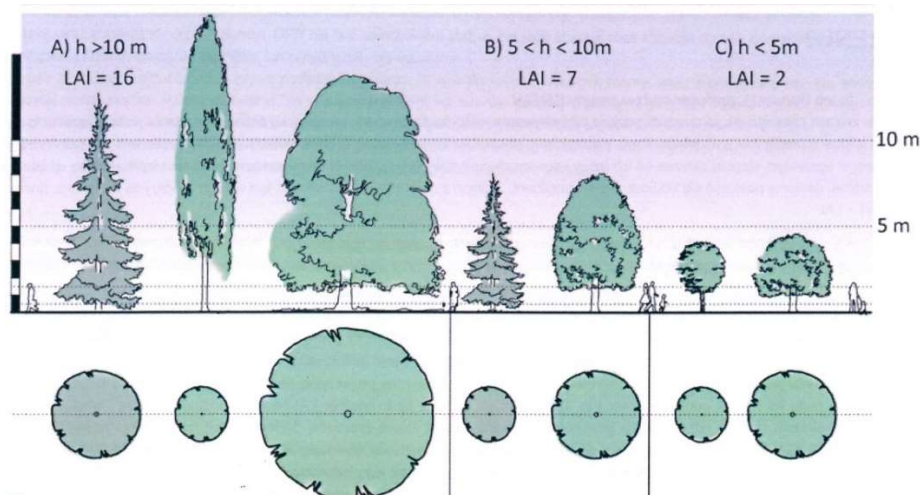
Budowa drzewa wpływa także na czas trwania zacinienia. Armson i in. (2013) zauważyli, że zieleń o niskim współczynniku kształtu może zapewnić ochronę przeciwsłoneczną dla osłanianych powierzchni dłużej niż ta o wysokim współczynniku. W konsekwencji zieleń o takim pokroju może prowadzić do większego obniżenia zapotrzebowania na energię do chłodzenia budynku w porównaniu do wysokich i wąskich drzew. Jednak, jak wskazują badania, wysokość korony, jej rozpiętość i powierzchnia oraz współczynnik kształtu drzewa nie mają wpływu na obniżenie temperatury powietrza przez zieleń (Armson, 2012).

Oprócz pokroju korony istotna w badaniach nad zacięciem jest jej gęstość, która wpływa na wspomniany stopień przepuszczalności promieniowania słonecznego. Gęstość ulistnienia można ocenić za pomocą wskaźnika pokrycia liściowego LAI (*leaf area index*). Parametr ten jest definiowany jako stosunek powierzchni liści rośliny do powierzchni gruntu, jaką ona zajmuje, i wyrażony jest jednostką m^2 listowia/ m^2 podłoża (Łukasiewicz i Łukasiewicz, 2016). Rysunek 5 przedstawia wskaźnik LAI dla drzew o różnej wysokości (Borowski i Pstrągowska, 2015). Przy czym parametr ten jest zmienny w ciągu roku w zależności od okresu wegetacyjnego roślin. LAI ma wpływ przede wszystkim na temperaturę powierzchni zaciętej przez drzewa, mianowicie im wyższy parametr, tym

⁴⁶ Przykładowo odnotowano, że cień rzucany przez jarząb Arnolda (*Sorbus arnoldiana*) był około 43% większy niż powierzchnia jego korony (Armson, 2012).



cień jest bardziej gęsty, co przekłada się na większy spadek temperatury powierzchni osłoniętej przez zielen⁴⁷ (Armson i in., 2013).



Rysunek 5. Wskaźnik LAI w zależności od wysokości drzew

Źródło: Borowski (2016).

Inne parametry ulistnienia, które mogą mieć wpływ na powierzchnię zacieniania, to kolor, faktura i wiek liści, od których zależy ilość absorbowanego promieniowania słonecznego⁴⁸ (Susorova i in., 2013). Znaczenie może mieć również współczynnik tłumienia promieniowania, na który wpływa kąt położenia liści⁴⁹ (Susorova i in., 2013).

Istotny jest także odpowiedni dobór gatunku pod kątem wymagań glebowo-klimatycznych. Może on zwiększyć szansę młodego drzewa na osiągnięcie wieku dojrzałego, w którym ukształtowana korona decyduje o większej skuteczności w zacienianiu zabudowy. Zapewnienie właściwych warunków do rozwoju, m.in. poprzez regularną pielęgnację, sprzyja długości życia drzew w miastach, tym samym wydłużając czas funkcjonowania tych zielonych elementów zacieniających. Ponadto koronę drzewa można kształtować poprzez jej przycinanie, co pozwala wykorzystać zielen w miarę jej wzrostu w niewielkich przestrzeniach, nie ograniczając dostępu światła dziennego oraz promieniowania słonecznego w sezonie grzewczym do wnętrza osłanianej zabudowy. Z uwagi na ochronę przeciwsłoneczną przez zielen wysoką istotna jest również liczba nasadzeń. Ali-Toudert i Mayer (2005) uważają, że dwa drzewa są około pięciu razy bardziej efektywne w zacienianiu niż pojedyncze. Przy czym efektywność pojedynczego drzewa sadzonego w grupach jest mniejsza jako elementu

⁴⁷ Przykładowo w początkowym okresie lata (25 maja i 3 czerwca) 4-5-letni głóg dwuszyjkowy (*Crataegus laevigata*) o średnim LAI równym około 2,8 może obniżyć temperaturę powierzchni o blisko 17°C, z kolei jarzab Arnolda (*Sorbus arnoldiana*) o średnim LAI wynoszącym 1,7 – o około 9°C (Armson i in., 2013).

⁴⁸ Dla większości szerokich liści parametr absorbowania promieniowania słonecznego średnio wynosi 0,34-0,44 przy słońcu nisko na nieboskłonie, a przy wysokim: 0,48-0,56 (Susorova i in., 2013).

⁴⁹ Niższe wartości tego współczynnika, tj. w zakresie 0,3-0,5, mają liście znajdujące się w położeniu bardziej wertykalnym, tj. o kącie mniejszym niż 45°, natomiast dla tych o kącie większym niż 45° wartości zawierają się w przedziale 0,7-1 (Susorova i in., 2013).

zaczynającego z uwagi na niewielką powierzchnię zacielenia przypadającą na jednostkę powierzchni korony⁵⁰ (Armson, 2012). Skuteczność zadrzewień w zacieleniu osłanianych powierzchni zależy także od rozstawu pomiędzy poszczególnymi drzewami, który wpływa na zwarcie koron drzew. Czynniki te oddziałują m.in. na ilość promieniowania słonecznego, które może dotrzeć pod korony drzew. Stopień zwarzia⁵¹ może być określony za pomocą 5-stopniowej skali cyfrowej, gdzie zwarcie pełne, równe 100%, wyrażone jest przez wartość 1,0 (Łukaszkiwicz, 2019). Poza tym wyróżnić można: zwarcie silne, gdy korony drzew stykają się lub zachodzą na siebie (0,80-1,0), zwarcie rozluźnione, kiedy między koronami występują wąskie, wolne przestrzenie (0,60-0,80), zwarcie luźne, z szerokimi przerwami między koronami (0,40-0,60), oraz zwarcie słabe, gdy przerwy między koronami są na tyle duże, że drzewa nie mają wzajemnego wpływu na siebie (Łukaszkiwicz, 2019).

2.2.3. Zabudowa

Drzewa mogą pełnić funkcję skutecznych elementów zacielenia⁵² zarówno na terenie otwartym, jak i gęsto zabudowanym (Kong i in., 2017). W badaniach, które przeprowadzili Kong i in. (2017), odnotowano, że różnica w obniżeniu wartości promieniowania słonecznego przez badaną zielenią pomiędzy obszarami o różnej intensyfikacji zabudowy jest niewielka i nie przekracza 5% (Kong i in., 2017). Wpływ na wykorzystanie drzew do ochrony przeciwsłonecznej elewacji ma z kolei geometria otaczającej zabudowy. Wysokość, kształt oraz orientacja budynków względem stron świata istotnie wpływają na warunki insolacji w środowisku miejskim (Brach i Stępnia, 2016).

W porównaniu do elementów ochrony przeciwsłonecznej z możliwością sterowania ich położeniem, np. żaluzji, rolet, drzewa pozbawione są możliwości bieżącej regulacji stopnia zacielenia w zależności od panujących warunków insolacji. Stąd istotną przy doborze rozwiązań z zielenią jest jej odpowiednia lokalizacja względem osłanianej zabudowy, wpływająca na skuteczność roślin w ochronie przeciwsłonecznej (Abdel-Aziz, 2014). Relacje geometryczne pomiędzy drzewami a budynkiem mają istotne znaczenie dla wielkości, czasu trwania i pojawienia się zacielenia (Simpson i McPherson, 1996; Donovan i Butry, 2009; Abdel-Aziz, 2014). Usytuowanie zieleni w otoczeniu zabudowy można strategicznie zaplanować w celu zmaksymalizowania powierzchni osłoniętej przed bezpośrednim promieniowaniem, co z kolei może mieć wpływ na użytkowanie budynku w zakresie:

⁵⁰ Wynika to z „nakładania się” zacielenia od każdego drzewa w grupie.

⁵¹ „Stopień zwarzia jest to inaczej stopień wykorzystania przestrzeni w nadziemnej części zadrzewień przez korony drzew” (Łukaszkiwicz, 2019: 82).

⁵² Kong i in. (2017) wykazali w badaniach, że 8 z 12 badanych drzew różnych gatunków jest w stanie ograniczyć promieniowanie słoneczne w ciągu dnia o ponad 50% na terenie otwartym, jak i gęsto zabudowanym.

- zużycia energii do klimatyzacji i ogrzewania pomieszczeń,
- dostępności światła naturalnego w pomieszczeniach.

Zachowanie właściwej odległości pomiędzy zielenią wysoką a zabudową jest ściśle związane z orientacją osłanianej elewacji względem stron świata. Simpson i McPherson (1996) uważają, że drzewo zlokalizowane od strony zachodniej lub południowo-zachodniej może zapewnić największą powierzchnię zacienienia elewacji. Ponadto wpływ powierzchni zacienionej przez drzewo osłaniające zachodnią część budynku ma większe znaczenie dla zużycia energii potrzebnej do klimatyzacji wnętrza budynku niż zieleń wysoka osłaniająca wschodnie ściany⁵³. Przy wyborze odpowiedniej lokalizacji drzew liściastych do ochrony przeciwsłonecznej zabudowy istotne jest również uwzględnienie potencjalnych zysków słonecznych w sezonie grzewczym, zwłaszcza w przypadku południowych ścian (Simpson i McPherson, 1996; McPherson i Simpson, 2003; Donovan i Butry, 2009)⁵⁴. Kwestią sporną jest ustalenie, na ile zyski energetyczne wynikające z zacienienia latem równoważą pewne straty wywołane ograniczeniem pozyskiwania energii słonecznej zimą⁵⁵. Heisler (1986a) twierdzi, że w przypadku budynków bez klimatyzacji dążenie do jak największego zacienienia elewacji w okresie letnim może być ważniejsze niż potencjalne zyski słoneczne zimą⁵⁶. Rozwiązaniem w przypadku sytuowania zieleni blisko południowej strony zabudowy jest wykorzystanie drzew tzw. *solar friendly*⁵⁷, które dzięki wysokiemu pnium nie ograniczają w znaczącym stopniu dostępu promieni słonecznych do przeszkleń w zimie (Simpson i McPherson, 1996).

2.3. Możliwości lokalizacji drzew względem budynku

W ramach systemów roślinno-architektonicznych drzewa mogą być zintegrowane z budynkiem w różnym stopniu. Celadyn (1992) wyróżnia trzy podstawowe rodzaje wzajemnej konfiguracji zieleni i zabudowy w zależności od ich wzajemnego zbliżenia, tj. dystansową, kontaktową i penetracyjną. W przypadku drzew układ dystansowy odnosi się do roślin zlokalizowanych w otoczeniu zabudowy, gdzie oddziaływanie pomiędzy

⁵³ Drzewo zacieńające zachodnią elewację jest tak efektywne jak analogiczne dwa drzewa po stronie wschodniej zabudowy (Ali-Toudert i Mayer, 2005).

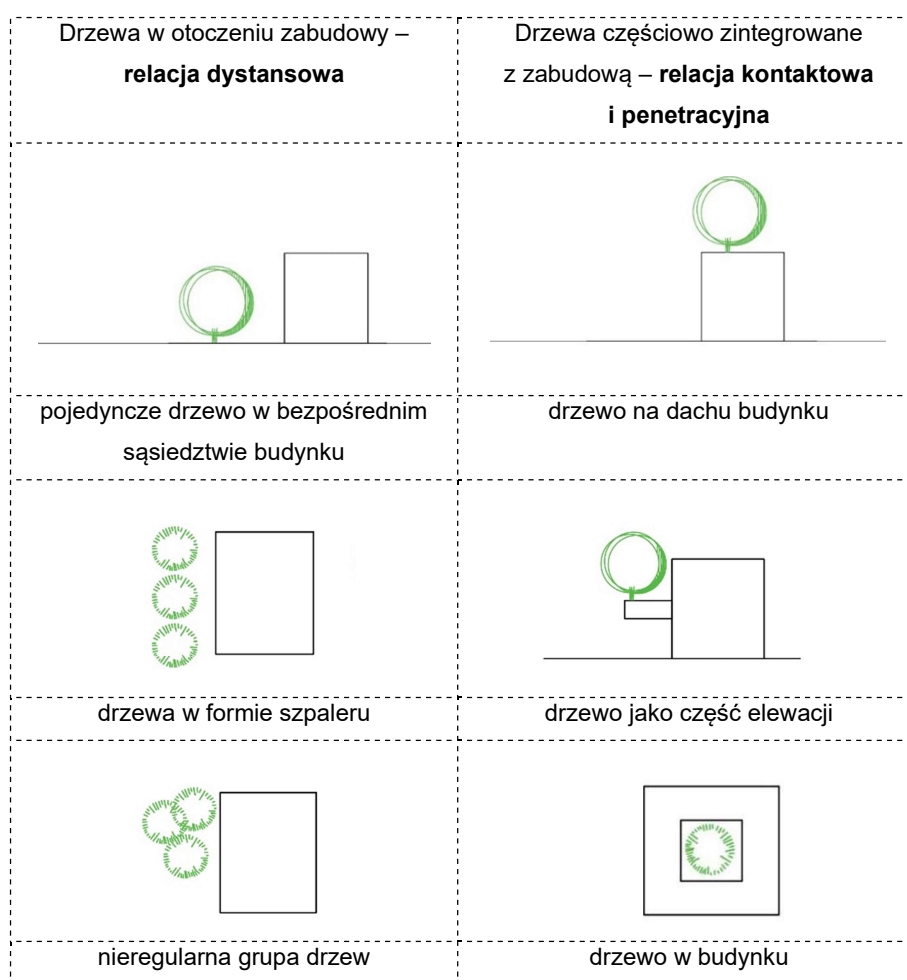
⁵⁴ Według badań, które na terenie Kalifornii przeprowadzili McPherson i Simpson (2003), większość drzew zlokalizowana na południu, wschodzie i zachodzie przyczynia się do wzrostu kosztów ogrzewania w sezonie grzewczym. Przy czym największy wpływ ma zieleń osłaniająca południowe ściany, z kolei zacienienie przez drzewa zachodnie zwiększa zapotrzebowanie na energię do ogrzewania bardziej niż przez wschodnie.

⁵⁵ Simpson i McPherson (1996) twierdzą, że roczne oszczędności w zakresie zużycia energii elektrycznej do klimatyzowania pomieszczeń są częściowo zrównoważone przez wzrost wydatków na ogrzewanie związane z ograniczeniem dostępu energii słonecznej do wnętrza budynku osłoniętego od strony południowej przez drzewa.

⁵⁶ Ogrzewanie jest mniej kosztowne i bardziej powszechne niż korzystanie z jednostek klimatyzacyjnych (Givoni, 1998).

⁵⁷ Do tej grupy należy większość gatunków i odmian z rodzaju klonów, trójgliczni oraz wiązów (Szczepanowska, 2014).

elementami jest pośrednie. Z kolei w relacji kontaktowej i penetracyjnej zieleni wysoka i zabudowa pozostają w bezpośrednim kontakcie ze sobą (rys. 6). W zależności od wzajemnej konfiguracji elementów układu roślinno-architektonicznego mogą one oddziaływać na siebie fizycznie i chemicznie⁵⁸ z różną intensywnością (Celadyn, 1992). W konfiguracji wzajemnego zbliżenia roślin i architektury istnieje możliwość wywierania akcji mechanicznej przez żywy element układu, który dąży do ekspansji wzrostowej, szukając optymalnych dla siebie warunków. Skala oddziaływania na przegrody zewnętrzne zależy od różnych czynników, począwszy od wyboru: gatunku roślin oraz sposobu ich integracji z budynkiem, rozwiązań architektoniczno-materiałowych po warunki klimatyczne panujące w danej lokalizacji.



Rysunek 6. Umieszczenie drzew jako elementów zacięniających zabudowę

Źródło: Opracowanie własne.

W układach dystansowych do ochrony przeciwsłonecznej można wykorzystać pojedyncze drzewo lub nasadzenia w grupach o regularnej formie, np. w postaci szpaleru, parawanu itp., albo te o nieuporządkowanym charakterze (fot. 11-13).

⁵⁸ Ten rodzaj oddziaływania może pojawić się w przypadku pnączy porastających ściany czy dachy budynków.



Fot. 11
Źródło: Fot. J. Janiak, 2020 r.



Fot. 12
Źródło: Fot. J. Janiak, 2020 r.



Fot. 13

Źródło: <https://rctreecare.com/wp-content/uploads/2015/04/office-building-and-trees.jpg> (dostęp: 16.10.2020).

Fot. 11-13. Układy roślinno-architektoniczne z zielenią wysoką zlokalizowaną w otoczeniu zabudowy.
Przykładowe rozwiązania

Drugim rozwiązaniem osłony przeciwsłonecznej jest integracja drzew z zabudową, w której elementy te mają bezpośredni kontakt ze sobą. W tym przypadku zielenią wysoką można wprowadzić na dachy, elewacje, tarasy czy do wnętrza budynków (fot. 14-17).



Fot. 14

Źródło: <https://www.designboom.com/architecture/vo-trong-nghia-architects-house-for-trees-vietnam-06-19-2014/> (dostęp: 19.05.2020).



Fot. 15

Źródło: www.arquitecturaydiseno.es/arquitectura/bloque-pisos-hormigon-que-arboles-salen-ventanas-vietnam_4118/1/ (dostęp: 19.05.2020).



Fot. 16

Źródło:

<https://www.flickr.com/photos/77597060@N02/24345991334> (dostęp: 16.10.2020).



Fot. 17

Źródło:

<https://casavogue.globo.com/Interiores/casas/noticia/2014/07/uma-arvore-na-decoracao-da-sala.html> (dostęp: 19.05.2020).

Fot. 14-17. Układy roślinno-architektoniczne, w których drzewa są w bezpośrednim kontakcie z budynkiem.
Wybrane rozwiązania integrujące drzewa i zabudowę

Obecnie dostępne na rynku technologie i materiały zwiększają możliwości wprowadzenia drzew nie tylko na niskie, ale i na wysokie budynki. Przykładowo na tarasach, balkonach i dachach wieżowców Bosco Verticale w Mediolanie wysokich na 111 m i 76 m zasadzono

ponad 900 drzew⁵⁹ (fot. 18). Rozwiązania konstrukcyjne i budowlane pozwalają również na planowanie rozległych założeń ogrodowych z zielenią wysoką na budynkach (fot. 19).

W zależności od stopnia integracji elementów w układach roślinno-architektonicznych wykorzystywane są rozwiązania technologiczne i materiałowe o różnym stopniu zaawansowania. Wprowadzenie drzew na budynek niejednokrotnie wymaga dodatkowego wzmocnienia konstrukcji nośnej⁶⁰, zastosowania specjalistycznych materiałów i technologii. Wiąże się to z dodatkowymi nakładami finansowymi oraz z odpowiednio wcześniejszymi ustaleniami na etapie projektu. Z kolei wprowadzenie zadrzewień na istniejących obiektach jest często niemożliwe lub wymaga kosztownego dostosowania budynku. Odmiennie jest w układach dystansowych, w których nasadzone w terenie drzewa w pobliżu zabudowy są tańszym i prostszym rozwiązaniem ochrony przeciwsłonecznej. Ponadto istnieje możliwość łatwiejszego wprowadzenia zmian w zakresie lokalizacji czy liczby zadrzewień w istniejących układach.



Fot. 18



Fot. 19

Fot. 18. Drzewa w ogrodzie wertykalnym na budynku Bosco Verticale w Mediolanie według projektu Boeri Studio
Źródło: https://www.greenroofs.com/wp-content/uploads/2018/09/bosco_verticale_milan7-1.jpg (dostęp: 19.05.2020).

Fot. 19. Drzewa rosnące na dachach i tarasach budynków Kampung Admiralty w Singapurze, projekt autorstwa WOHA

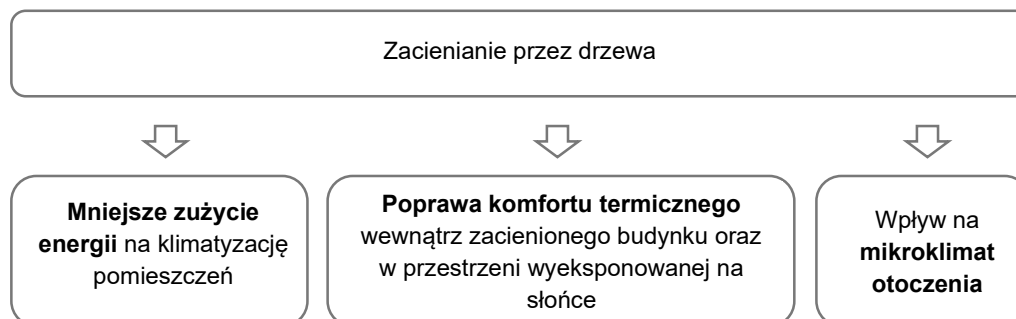
Źródło: *WOHA's kampung admiralty wins building of the year at world architecture festival 2018*, Designboom.com, <https://www.designboom.com/architecture/woha-kampung-admiralty-singapore-10-30-2018/> (dostęp: 19.05.2020).

⁵⁹ Źródło: *Bosco Verticale*, Wikipedia, https://pl.wikipedia.org/wiki/Bosco_Verticale (dostęp: 18.05.2020).

⁶⁰ 1 m³ ziemi to ciężar około 2 ton (Ryńska, 2001).

2.4. Korzyści i ograniczenia wykorzystania drzew

Zacienienie elewacji budynku przez drzewa może przynieść szereg korzyści związanych z użytkowaniem budynku (schemat 3).



Schemat 3. Potencjalne korzyści użytkowe z wykorzystania drzew do zacienienia elewacji

Źródło: Opracowanie własne.

Liczne badania zapoczątkowane w latach 70. XX wieku⁶¹ wskazują na niepodważalne znaczenie zacieniającej roli zieleni w ograniczeniu zużycia energii elektrycznej, przeznaczonej zwłaszcza do klimatyzowania pomieszczeń. Zacienienie przez zieleń wpływa na zmniejszenie zużycia energii potrzebnej do chłodzenia budynku dzięki (Akbari i in., 1992 za: Misni, 2012):

- ograniczeniu dostępu bezpośredniego promieniowania słonecznego przez przeszkłone części elewacji do wnętrza budynku,
- obniżeniu temperatury powierzchni elewacji, okien, dachu,
- obniżeniu temperatury powietrza,
- osłonięciu terenu wokół budynku, co wpływa na utrzymanie chłodu w glebie, który może zadziałać jako „radiator” dla zabudowy,
- wzmaganiu przepływu wiatru w kierunku budynku,
- osłonięciu zewnętrznych jednostek klimatyzacyjnych⁶².

Pandit i Laband (2010) uważają, że każde 10% powierzchni zacienionej na budynku przez zieleń może obniżyć zużycie energii elektrycznej średnio o 1,29 kWh na dzień⁶³.

⁶¹ W latach 70. XX wieku na skutek kryzysu naftowego w USA poszukiwano alternatywnych źródeł energii oraz sposobów ograniczenia jej zużycia. Prowadzono prace dotyczące m.in. wpływu relacji między zielenią a zacienianym wolnostojącym budynkiem mieszkalnym na zapotrzebowanie energii niezbędnej do zapewnienia odpowiedniego komfortu termicznego w pomieszczeniach, głównie w okresie upalnych dni, w różnych częściach Ameryki Północnej (np. Heisler, 1986a, 1986b; Simpson i McPherson, 1996; Akbari i in., 1997).

⁶² Misni (2012) twierdzi, że wykorzystanie małych drzew i krzewów do zacieniania zewnętrznych jednostek klimatyzacyjnych może zwiększyć efektywność urządzenia o 10%.

⁶³ Badania przeprowadzono na budynkach mieszkalnych jednorodzinnych w lokalizacji Auburn w Alabamie w okresie szczytowego zapotrzebowania na energię elektryczną. Oszacowany wynik jest różny w zależności od gęstości zacienienia (Pandit i Laband, 2010).

Ograniczenie w zużyciu energii elektrycznej dzięki wykorzystaniu drzew do ochrony przeciwsłonecznej zabudowy różni się w zależności od:

- powierzchni zacienienia,
- długości trwania zacieniania,
- czasu pojawienia się zacienienia,
- gęstości zacienienia⁶⁴,
- orientacji osłoniętych powierzchni względem stron świata,
- lokalizacji (szerokości geograficznej),
- warunków mikroklimatycznych (np. wiatr),
- przyjętych rozwiązań architektoniczno-budowlanych oraz instalacyjnych,
- sposobu użytkowania budynku i preferencji użytkowników odnośnie do komfortowej temperatury powietrza,
- obowiązujących stawek w rozliczeniu zużycia energii elektrycznej.

Wyniki wybranych badań zaprezentowanych w tabeli 9 przedstawiają wymierne korzyści finansowe z wykorzystania drzew liściastych do osłony zabudowy przed promieniowaniem słonecznym w różnych strefach klimatycznych. Badania przeprowadzone na terenie USA wskazują, że w zależności od szerokości geograficznej roczne zużycie energii netto na klimatyzację pomieszczeń w zabudowie mieszkaniowej osłoniętej przez jedno drzewo może wynieść od 134 kWh do 160 kWh (Hwang i in., 2016). O ile w przypadku pojedynczych budynków potencjalne oszczędności w zużyciu energii uzyskane dzięki drzewom nie muszą kształtować się na wysokim poziomie, to w większej skali, np. miast, korzyści mogą być znaczące. Przykładowo oszacowano, że w Kalifornii zasadzenie 50 milionów drzew zacieniających wschodnie i zachodnie elewacje budynków na terenach prywatnych w ciągu 15 lat może skutkować obniżeniem zużycia energii elektrycznej na poziomie ponad 46 000 GWh, o szacowanej wartości 3,6 biliona dolarów USD (McPherson i Simpson, 2003). Według badaczy (m.in. McPherson i Simpson) wymierne korzyści środowiskowe i finansowe przemawiają za zasadnością wprowadzenia obowiązku strategicznego sadzenia drzew w otoczeniu budynków mieszkalnych jednorodzinnych w celu ograniczenia zużycia energii potrzebnej do chłodzenia i ogrzewania pomieszczeń⁶⁵.

⁶⁴ W badaniach dotyczących zacieniania przez drzewa pojawia się rozróżnienie na cień gęsty, umiarkowany i lekki, np. w pracy Pandita i Labanda (2010). W tych badaniach odnotowano, że gęsty cień wpływa o wiele bardziej na ograniczenie zużycia energii elektrycznej w budynku mieszkalnym niż średnie lub lekkie zacienienie. Zdaniem Hutchison i in. (1982) gęsty cień jest wtedy, gdy około 2/3 osłanianej powierzchni znajduje się w cieniu.

⁶⁵ Postulat pod nazwą *24 Energy Efficiency Standards for Residential Buildings* został zaproponowany w pracy McPhersona i Simpsona (2003).

Tabela 9. Wybrane badania dotyczące wpływu zacielenia budynku przez zieleń na zapotrzebowanie na energię elektryczną do klimatyzowania pomieszczeń

Praca	Badania	Wpływ zacielenia na zużycie energii elektrycznej do klimatyzowania pomieszczeń	Wartość ekonomiczna zacielenia budynku przez badaną zieleń
<p>J. Simpson, G. McPherson, 1996. <i>Potential of tree shade for reducing residential energy use in California</i>. „Journal of Arboriculture”, 22(1), s. 10-18.</p>	<p>W badaniach oszacowano potencjalny wpływ zacielenia przez drzewa na zużycie energii do klimatyzowania i ogrzewania pomieszczeń w budynkach mieszkalnych jednorodzinnych na terenie Kalifornii (USA).</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Dwa 15-letnie drzewa zlokalizowane od zachodniej i jedno od wschodniej strony budynku obniżyły roczne zużycie energii do klimatyzowania pomieszczeń od 40% do 50% w chłodniejszych strefach klimatycznych Kalifornii, a od 10% do 20% w cieplejszych. • Badane drzewa zmniejszyły szczytowe zużycie energii elektrycznej maksymalnie o 23%. 	<ul style="list-style-type: none"> • Roczne oszczędności wynoszą od 30 do 110 dolarów w zależności od lokalizacji badanych drzew w strefie klimatycznej.
<p>D.N. Laband, J.P. Sophocleus, 2009. <i>An Experimental Analysis of the Impact of Tree Shade on Electricity Consumption</i>. „Arboriculture & Urban Forestry”, 35(4), s. 197-202.</p>	<p>Badano zużycie energii elektrycznej potrzebnej do klimatyzacji dwóch identycznych budynków: jednego w pełnym słońcu, a drugiego zlokalizowanego w cieniu drzew od kwietnia do września 2008 roku w Alabamie (USA).</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Zapotrzebowanie na energię elektryczną do ochłodzenia pomieszczeń było 2,6 razy większe w budynku niezacielenym w porównaniu do budynku osłoniętego przez zieleń w rozpatrywanym przedziale czasowym. 	<ul style="list-style-type: none"> • Zacielenie przez drzewa budynku o pow. 14,9 m² prowadzi do zaoszczędzenia maksymalnie 95 dolarów rocznie. • Oszacowano, że w przypadku budynków o większym metrażu oszczędności mogą sięgać nawet 500 dolarów rocznie.
<p>G.H. Donovan, D.T. Butry, 2009. <i>The value of shade: Estimating the effect of urban trees on summertime electricity use</i>. „Energy and Buildings”, 41, s. 662-668.</p>	<p>W Sacramento w Kalifornii zbadano wpływ drzew zlokalizowanych z różnych stron budynków na zużycie energii elektrycznej w sezonie letnim i grzewczym.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Drzewa znajdujące się po zachodniej i południowej stronie domu obniżyły zużycie energii elektrycznej* w okresie letnim (maj–wrzesień) o 5,2%. • Drzewa od strony północnej przyczyniły się do wzrostu zapotrzebowania na energię elektryczną w sezonie letnim o 1,5%. 	<ul style="list-style-type: none"> • Drzewa po stronie zachodniej i wschodniej mogą obniżyć rachunki za energię elektryczną w sezonie letnim średnio o 25,16 dolara. • Zieleń osłaniająca północną elewację może powodować wzrost wydatków na energię elektryczną średnio o 7,48 dolara w sezonie letnim.

Praca	Badania	Wpływ zacierania na zużycie energii elektrycznej do klimatyzowania pomieszczeń	Wartość ekonomiczna zacierania budynku przez badaną zieleń
<p>W.H. Hwang, P.E. Wiseman, V.A. Thomas, 2016. <i>Simulation of Shade Tree Effects on Residential Energy Consumption in Four U.S. Cities</i>. „Cities and Environment”, 9(1), s. 1-21.</p>	<p>Badano wpływ zacierania przez jedno drzewo osłaniające budynek mieszkalny o pow. 200 m² na roczne zużycie energii do chłodzenia i ogrzewania pomieszczeń. Do badań wybrano 24 warianty lokalizacji drzewa dookoła zabudowy, tj. w odległościach: 5 m, 10 m, 15 m w ośmiu różnych kierunkach. Badania przeprowadzono dla lokalizacji w: Minneapolis, Indianapolis, Charlotte i Orlando.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Oszacowano, że w zależności od drzewa, jego usytuowania i klimatu w danej lokalizacji zieleń może zmniejszyć zużycie energii na chłodzenie pomieszczeń w sezonie letnim maksymalnie o 142 kWh rocznie. • Duże drzewo liściaste oddalone o 5 m od zachodniej elewacji może obniżyć roczne zużycie energii elektrycznej na chłodzenie budynku o: 89 kWh w Orlando, o 31 kWh w Charlotte, o 23 kWh w Indianapolis i o 20 kWh w Minneapolis. • Roczne zużycie energii netto** z uwagi na zacieranie budynku przez drzewo zmniejszyło się o 160 kWh w Orlando, z kolei w Minneapolis wzrosło o 134 kWh. 	<ul style="list-style-type: none"> • Oszacowano, że rocznie drzewo może obniżyć koszty związane ze zużyciem energii elektrycznej na chłodzenie budynku maksymalnie o 16 dolarów. • Duże drzewo liściaste oddalone o 5 m od zachodniej elewacji może obniżyć roczny koszt zużycia energii elektrycznej na chłodzenie budynku o: 10,24 dolara w Orlando, 3,35 dolara w Charlotte, 2,42 dolara w Indianapolis i 2,28 dolara w Minneapolis. • Oszacowano, że koszt rocznego zużycia energii netto z uwagi na zacieranie budynku przez jedno drzewo zmniejszył się o 18 dolarów w Orlando, z kolei w Minneapolis wzrósł o 15 dolarów.

* Badano zużycie energii elektrycznej w sezonie letnim, nie tylko do klimatyzacji pomieszczeń.

** Różnica między obniżonym zapotrzebowaniem na energię elektryczną latem a podwyższonym w sezonie zimowym.

Źródło: Opracowanie własne na podstawie: Simpson i McPherson (1996), Laband i Sophocleus (2009), Donovan i Butry (2009), Hwang i in. (2016).

W odróżnieniu od systemów zacierających w formie elementów związanych z budynkiem, takich jak np. żaluzje, rolety, okiennice, zacieranie przez zieleń ma pozytywny wpływ nie tylko na warunki termiczne wewnątrz budynku (Heisler, 1977), ale i na zewnątrz (Wang i Akbari, 2014; Takács i in., 2016). Drzewa mogą oddziaływać na komfort cieplny człowieka w przestrzeni miasta w okresie intensywnego natężenia promieniowania słonecznego poprzez (Kong i in., 2017):

- zacienianie – obniżając średnią temperaturę promieniowania⁶⁶,
- ewapotranspirację⁶⁷, która wpływa na zmniejszenie temperatury powietrza w otoczeniu,
- regulację prędkości wiatru⁶⁸.

Zacienianie przez zieleni wysoką jest najbardziej efektywną klimatyczną rolą roślin w poprawie komfortu termicznego ludzi (Ali-Toudert i Mayer, 2005; Wang i Akbari, 2014). Drzewa w przeciwieństwie do niskiej zieleni „podnoszą” aktywną powierzchnię promieniowania słonecznego ponad strefę pieszych, ścian a nawet dachów niskich zabudowań (Armson, 2012; Szczepanowska i Sitariski, 2015). Badania (m.in. Kong i in., 2017; Konarska i in., 2014) wskazują, że drzewa, zwłaszcza te pojedyncze, znacząco wpływają na obniżenie średniej temperatury radiacyjnej otoczenia, która w większym stopniu niż temperatura powietrza oddziałuje na komfort termiczny człowieka (Misni, 2012). Oszacowano, że najbardziej komfortowe warunki termiczne w sezonie letnim panują wtedy, gdy w polu widzenia znajduje się od 45% do 73% zieleni⁶⁹ (Stark i Miller, 1977). Zdaniem Kong i in. (2017) z uwagi na poprawę warunków komfortu cieplnego pieszych w przestrzeni miasta wskazane jest lokalizowanie drzew nie tylko w otoczeniu zabudowy, ale również na niższych poziomach oraz dachach budynków. W kolejnej tabeli zestawiono wyniki wybranych badań dotyczących wpływu zacieniania przez zieleni na komfort cieplny człowieka (tab. 10).

Wybór drzew do zacieniania zabudowy wpływa nie tylko na komfort cieplny człowieka, ale jednocześnie korzystnie oddziałuje na mikroklimat danej przestrzeni poprzez (Dimoudi i Nikolopoulou, 2003):

- obniżenie zysków słonecznych dzięki zacienianiu ścian, przeszkleń i dachów,
- ograniczenie wymiany ciepła na drodze promieniowania między zabudową a otoczeniem dzięki obniżeniu temperatur powierzchni poprzez zacienienie,
- obniżenie zysków ciepła na drodze przewodzenia i konwekcji dzięki obniżeniu temperatury suchego termometru poprzez ewapotranspirację w okresie letnim,
- wzrost ciepła utajonego poprzez zwiększenie wilgotności powietrza dzięki ewapotranspiracji.

⁶⁶ Drzewa nie tylko osłaniają przed promieniowaniem słonecznym, ale i przed promieniowaniem długofalowym, dzięki czemu mogą wpływać na wymianę ciepła między ludźmi a nagrzaną powierzchnią budynków wyeksponowanych na słońce (Heisler, 1977).

⁶⁷ Przykładowo duży klon srebrzysty może w ciągu godziny wyparować ponad 256 litrów wody, dzięki czemu jego wpływ na ochłodzenie powietrza można porównać do efektu uzyskanego za pomocą pięciu przeciętnej wielkości klimatyzatorów (Szczepanowska, 2001).

⁶⁸ Na terenach słabo przewietrzanych zacienienie przez drzewa może wzmocnić cyrkulację termiczną związaną z konwekcją powietrza i przepływem lokalnym od miejsc nasłonecznionych do zacienionych (Lewińska i in., 1990).

⁶⁹ W badaniach powiązano ilość powierzchni biologicznie czynnej w polu widzenia z wymianą ciepła na drodze promieniowania.

Tabela 10. Wybrane badania dotyczące wpływu zieleni na komfort cieplny człowieka w przestrzeni miejskiej

Praca	Badania	Wpływ zacieniania przez drzewa na komfort cieplny człowieka w przestrzeni miejskiej
F. Ali-Toudert, H. Mayer, 2005. <i>Thermal comfort in urban street with trees under hot summer conditions</i> . The 22 nd Conference on Passive and Low Energy Architecture (PLEA), Beirut, Lebanon, 13-16 listopada.	Praca poświęcona poprawie komfortu termicznego przechodniów w przestrzeni ulicy przy wykorzystaniu drzew. Badania przeprowadzono w porze letniej w klimacie Algierii.	<ul style="list-style-type: none"> • spadek temperatury powietrza w ulicach z drzewami o 1,5 K w porównaniu do ulicy bez zieleni o tej samej geometrii • obniżenie bezpośredniego promieniowania słonecznego o co najmniej 200 W/m² do ponad 800 W/m² w przestrzeni ulicy zacienionej przez drzewa • ciało człowieka absorbuje o 135 W/m² mniej promieniowania krótkofalowego oraz do 199 W/m² mniej długofalowego po wprowadzeniu drzew do przestrzeni ulicy na osi północ-południe
W. Klemm, B.G. Heusinkveld, S. Lenzholzer, B. van Hove, 2015. <i>Street greenery and its physical and psychological impact on thermal comfort</i> . „Landscape and Urban Planning”, 138, s. 87-98.	Badania dotyczą korzyści wynikających z zastosowania zieleni do ukształtowania warunków komfortu termicznego w przestrzeni ulicy w klimacie umiarkowanym na przykładzie miasta Utrecht w Holandii w ciągu pięciu dni w lipcu i sierpniu 2012 roku.	<ul style="list-style-type: none"> • średnia temperatura promieniowania w ulicy pokrytej w 39% drzewami była niższa maksymalnie o 4,8 K w stosunku do ulicy bez zieleni • generalnie 10% pokrycia ulicy drzewami zmniejsza temperaturę promieniowania w tej przestrzeni o około 1 K • temperatura promieniowania jest znacząco związana z obecnością drzew w przestrzeni ulicy • zwiększenie zieleni w polu widzenia pieszych w ulicy może prowadzić do lepszych warunków termicznych
L. Kong, K. Ka-Lun Lau, Ch. Yuan, Y. Xu, Ch. Ren, 2017. <i>Regulation of outdoor thermal comfort by trees in Hong Kong</i> . „Sustainable Cities and Society”, 31, s. 12-25.	Badania nad wpływem różnych drzew na mikroklimat miasta i komfort cieplny pieszych na terenach o różnym stopniu gęstości zabudowy na przykładzie miasta Hongkong w okresie od czerwca do sierpnia 2009 r.	<ul style="list-style-type: none"> • drzewa w zależności od gatunku mogą obniżyć średnią temperaturę promieniowania o 0,1° do 5,1°C • drzewa mogą obniżyć PET maksymalnie o 3,4°C na terenie zabudowanym, a do 2,9°C na otwartej przestrzeni

Źródło: Opracowanie własne na podstawie: Ali-Toudert i Mayer (2005), Klemm i in. (2015), Kong i in. (2017).

Zacienianie pośród innych funkcji zieleni odgrywa znaczącą rolę w kształtowaniu korzystnego mikroklimatu w mieście latem. Udział zacieniania przez drzewa w działaniu chłodzącym roślin wynosi około 80% (Shashua-Bar i Hoffman, 2000). Wykorzystanie drzew do zacieniania zabudowy w mieście wpływa na ograniczenie zjawiska tzw. miejskiej wyspy ciepła⁷⁰, ponieważ prowadzi do zmniejszenia wzrostu temperatury powietrza (Dimoudi i Nikolopoulou, 2003). Badania wskazują na większą skuteczność zieleni wysokiej w ograniczaniu zasięgów wysp ciepła w porównaniu do zielonych dachów (Szczepanowska, 2014; Bochenek i Klemm, 2020). Z kolei zacienianie parkingów drzewami obniża

⁷⁰ Nasadzenia ponad 65 tysięcy drzew w Atlancie zmniejszyły o 1/3 zasięg wyspy ciepła (Szczepanowska, 2007).

temperaturę w kabinach samochodów⁷¹ (McPherson i in., 2000) oraz ogranicza parowanie węglowodorów wyciekających ze zbiorników paliwa i z przewodów samochodowych (Szczepanowska i Sitarski, 2015). Zdaniem Szczepanowskiej i Sitarskiego (2015) sadzenie drzew na parkingach powinno być jednym z elementów strategii gmin w zakresie poprawy jakości powietrza.

Wybór drzew do ochrony przeciwsłonecznej zabudowy może przynieść korzyści pośrednio związane z zacienieniem. Skuteczna osłona budynku przed promieniowaniem słonecznym ogranicza zapotrzebowanie na energię elektryczną, tym samym przyczyniając się do mniejszej emisji CO₂⁷², co z kolei wpływa na jakość powietrza (Akbari i in., 2001), oraz do zmniejszenia zużycia wody do chłodzenia w zakładach energetycznych (Szczepanowska, 2014). Warto wspomnieć, że zieleń w przeciwieństwie do innych wyprodukowanych elementów zacieniających wpływa pozytywnie na ślad węglowy dzięki sekwestracji CO₂⁷³. W badaniach przeprowadzonych w Sacramento 6 milionów drzew usunęło około 335 tysięcy ton dwutlenku węgla w ciągu roku, w tym 76% poprzez sekwestrację, a 25% poprzez ograniczenie emisji z zakładów energetycznych⁷⁴ (Szczepanowska, 2007). Dodatkowo drzewa jako elementy zacieniające nie stanowią problemu i obciążenia dla środowiska po okresie „eksploatacji”.

W przeciwieństwie do wyprodukowanych przez człowieka systemów ochrony przeciwsłonecznej zieleń wysoka oprócz osłony przed insolacją równocześnie pełni inne istotne dla środowiska i społeczeństwa funkcje (tab. 11). Ponadto, jak wskazują badania, obecność zieleni wysokiej w bezpośrednim otoczeniu lub w dalszym sąsiedztwie zabudowy wpływa na wzrost wartości nieruchomości⁷⁵ (Szczepanowska, 2012). Donovan i Butry (2010) szacują, że obecność drzew oddzielających budynki mieszkalny od ulicy lub rosnących nie dalej niż 30,5 m od zabudowy przyczynia się do wzrostu ceny nieruchomości średnio o 3% jej wartości.

⁷¹ W badaniach w Kalifornii przeprowadzonych przez Center of Urban Forest Research odnotowano, że parkingi obsadzone drzewami były o 1-2°C chłodniejsze, natomiast temperatura w kabinach samochodów była niższa maksymalnie o 26°C, a w zbiornikach paliwa o 2-4°C (McPherson i in., 2000).

⁷² Według badań, które przeprowadzili Donovan i Butry (2009), platan klonolistny (*Platanus acerifolia*) zacieniający zachodnią elewację budynku mieszkalnego jednorodzinnego może obniżyć emisję CO₂ wynikającą z wykorzystania energii elektrycznej w okresie letnim średnio o 31% w ciągu 100 lat.

⁷³ Przykładowo w ciągu swojego życia drzewo o średnicy pnia powyżej 77 cm może zgromadzić średnio 3186 kg węgla, to o średnicy 31-46 cm – 399 kg węgla, a o średnicy pnia 7 cm – około 3 kg węgla (McPherson, 1998).

⁷⁴ Przy czym ilość dwutlenku węgla uwalniania podczas czynności związanych z sadzeniem i pielęgnacją drzew stanowi nie więcej niż 8% rocznej redukcji tego związku przez zieleń wysoką (Szczepanowska, 2007).

⁷⁵ Według badań przeprowadzonych m.in. na terenie Wielkiej Brytanii, Holandii oraz USA za widok z okna na zadrzewione tereny ludzie są w stanie dopłacić do 15% więcej do mieszkań (Szczepanowska, 2012).

Tabela 11. Pozostałe role drzew jako elementów zacieniających w przestrzeni miejskiej

Funkcje	
Ekologiczne	<ul style="list-style-type: none"> • produkcja tlenu • obniżenie temperatury powietrza przez ewapotranspirację • oczyszczanie powietrza zanieczyszczonego pyłami oraz z substancji gazowych • ograniczenie koncentracji smogu w mieście • wydzielanie fitoncydów • jonizacja powietrza • wpływ na prędkość wiatru, wiatroizolacja • regulacja stosunków wodnych • siedliska dla zwierząt
Techniczne	<ul style="list-style-type: none"> • rola izolacji akustycznej • osłona przeciw olśnieniom
Estetyczne	<ul style="list-style-type: none"> • istotny element kompozycji w krajobrazie • uzupełnienie/tło dla architektury • tworzenie ładu przestrzennego, zasłanianie nieatrakcyjnych obiektów, miejsc
Społeczne	<ul style="list-style-type: none"> • sprzyjanie integracji społecznej • łagodzenie emocji, stresu • ułatwianie regeneracji sił psychicznych
Dydaktyczne, wychowawcze	<ul style="list-style-type: none"> • w ogrodach botanicznych i zoologicznych • umożliwienie obserwacji zwierząt, owadów, przebiegu pór roku
Gospodarcze	<ul style="list-style-type: none"> • przynoszenie plonów • dostarczanie surowców pochodzenia organicznego (drewno, surowce włókniste, paliwo z biomasy) • dostarczanie surowców do wykorzystania przy produkcji zasobów medycznych, przedmiotów dekoracyjnych

Źródło: Opracowanie własne na podstawie: Czerwieńec i Lewińska (2000).

Zdaniem wielu badaczy (m.in.: Armson (2012), Szczepanowska (2014), Roślin-Szeryńska (2019)) zakres usług „świadczonych” przez drzewa czyni je najbardziej efektywnymi elementami zielonej infrastruktury miasta. Poza oszczędnością energii i korzyściami klimatycznymi związanymi z zacienianiem pozostałe funkcje zieleni również mogą przynieść wymierne zyski finansowe⁷⁶ (rys. 7). Przykładowo oszacowano, że wszystkie drzewa przyuliczne na badanym terenie Pragi-Północ (Warszawa) w ciągu roku mogą hipotetycznie „przechwycić” 23 500 m³ wody deszczowej, a wartość tej usługi wyceniono na 258 000 złotych (Szczepanowska i Sitarski, 2015).

⁷⁶ W Polsce temat wyceny „usług ekosystemowych” drzew poruszany jest w licznych publikacjach, m.in. autorstwa profesor Haliny Szczepanowskiej czy profesora Jakuba Kronenberga.

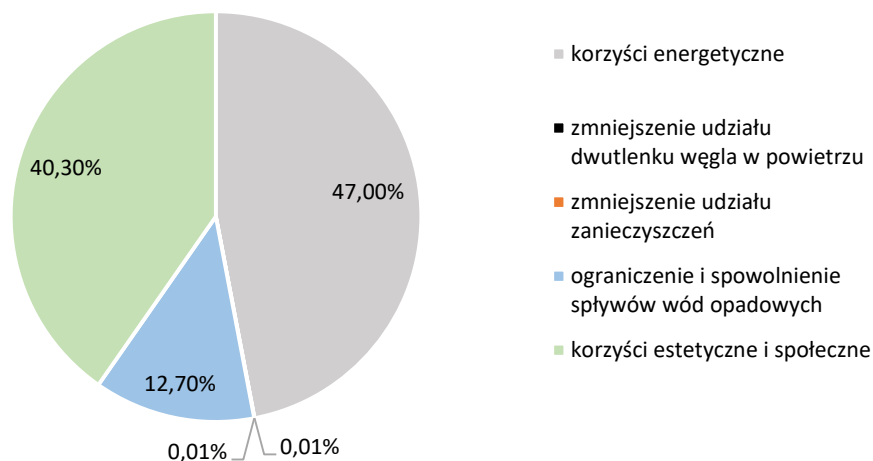
Kategoria korzyści	Średnie drzewo z badanej populacji		Drzewa					
			małe		średnie		duże	
	zł	%	zł	%	zł	%	zł	%
Oszczędność energii	79,0	47,0	36,0	46,3	72,0	39,8	236,0	50,6
Sekwestracja i unikanie emisji CO ₂	1,1	0,01	0,4	0,01	1,4	0,01	3,3	0,01
Poprawa jakości powietrza	1,0	0,01	0,6	0,01	1,4	0,01	2,1	0,01
Intercepcja wód deszczowych	21,0	12,7	9,0	11,7	27,0	14,6	57,0	12,4
Korzyści estetyczne i inne	66,0	40,3	32,0	42,0	84,0	45,6	168,0	36,1
Razem	168,0	100,0	78,0	100,0	185,0	100,0	466,0	100,0
Porównawczo: dane USA*	622,0-1410,0		87,0		228,0		450,0-656,4	

* Dane z USA przeliczone na zł w relacji 1:3.

Rysunek 7. Monetarna wartość rocznych korzyści usług ekosystemowych jednego drzewa przyulicznego na terenie Praga Północ, Warszawa

Źródło: Szczepanowska i Sitarski (2015: 82).

Poniżej zestawiono wartość rocznych korzyści usług ekosystemowych uzyskanych przez jedno średnie drzewo przyuliczne z badanej populacji na terenie Pragi-Północ w Warszawie na podstawie badań przeprowadzonych przez IGPIM (Szczepanowska i Sitarski, 2015: 82) (rys. 8). Największe korzyści związane są z oszczędnością energii (47%), a za nimi sytuują się korzyści estetyczne i społeczne (40,30%).

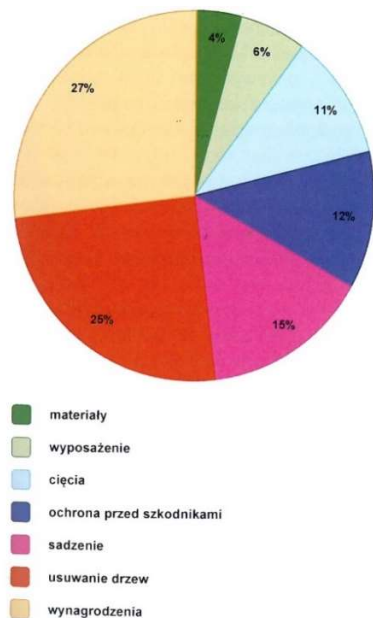


Rysunek 8. Udział korzyści wynikających z usług ekosystemowych świadczonych przez jedno drzewo

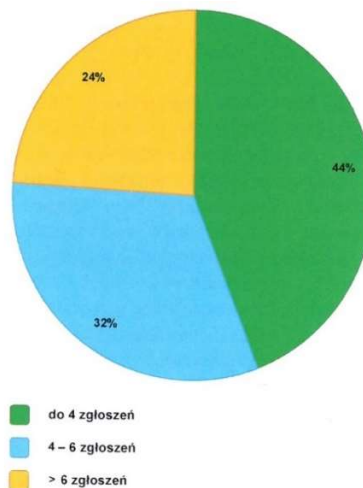
Źródło: Opracowanie własne na podstawie: Szczepanowska, b.d. (<http://docplayer.pl/7769435-Rola-i-znaczenie-drzew-w-miescie-uslugi-ekosystemowe-drzew-i-wycena-ich-wartosci.html>, dostęp: 27.05.2020).

Liczne badania (m.in.: McPherson i in., 1988; McPherson i Rowntree, 1993; Giergiczny i Kronenberg, 2012; Szczepanowska, 2015) dotyczą analizy kosztów i korzyści wynikających z obecności drzew w przestrzeniach miejskich. Koszty utrzymania zieleni wysokiej w mieście

mogą mieć charakter przewidywalny, wynikający z sadzenia i pielęgnacji zieleni⁷⁷, oraz incydentalny – z uwagi na zgłoszenia poważnych szkód spowodowanych przez wykroty i wiatrołomy⁷⁸ (rys. 9) (Rosłon-Szeryńska, 2019).



Rysunek 9



Rysunek 10

Rysunek 9. Wielkość wydatków na leśnictwo komunalne w 132 gminach i 26 dzielnicach Chicago

Źródło: Rosłon-Szeryńska (2019: 57).

Rysunek 10. Rozkład gminnych zgłoszeń poważnych szkód spowodowanych przez wykroty i wiatrołomy podczas wichur i nawałnic w latach 2004-2014 w Chicago

Źródło: Rosłon-Szeryńska (2019: 57).

Zestawienie wydatków związanych z obecnością drzew w mieście z korzyściami, jakie mogą przynieść, wskazuje na większy zysk niż stratę (tab. 12) (Szczepanowska, 2015). W mieście Nowy Jork wykazano roczne korzyści w wysokości 5 USD za każdy 1 USD przeznaczony na zarządzanie drzewami w pięciu dzielnicach (Rosłon-Szeryńska, 2019). Z kolei według badań przeprowadzonych w latach 1999-2000 w Chicago drzewa przyuliczne wygenerowały 3,78 USD zysku za każdy 1 USD wydany na ich utrzymanie (Maco i McPherson, 2003 za: Rosłon-Szeryńska, 2019). Potwierdzają to wyliczenia wskaźnika relacji korzyści z drzew do kosztów utrzymania *benefit–cost ratio* (BCR). Przykładowo w skali

⁷⁷ Zwrot kosztów poniesionych na posadzenie drzew w mieście wynosi dla zieleni w publicznych osiedlach mieszkaniowych 9 lat, dla zadrzewień przyulicznych – 13-14 lat, z kolei dla drzew sadzonych w parkach i wzdłuż promenad – 15 lat (McPherson, 2005 za: Rosłon-Szeryńska, 2019).

⁷⁸ Analiza Duryea (1997) wykazała, że tylko 2% drzew uszkodzonych podczas huraganu Erin i 1% zinwentaryzowanych po huraganie Opal spowodowało szkody materialne, głównie w budynkach mieszkalnych (Rosłon-Szeryńska, 2019).

roku BCR dla Nowego Jorku wynosi 5,60, a dla Chicago 2,80⁷⁹ (Szczepanowska, 2015). Z kolei w badaniach prowadzonych przez IGPiM dotyczących drzew przyulicznych na terenie Pragi-Północ (Warszawa) wskaźnik BCR uzyskano na poziomie 1,3 (Szczepanowska, 2015). Biorąc pod uwagę wszystkie nakłady finansowe na utrzymanie drzew oraz korzyści i możliwą wartość usług ekosystemowych drzew w przestrzeni miejskiej, ekologicznie i ekonomicznie uzasadnione wydaje się sięganie po rozwiązania ochrony przeciwsłonecznej wykorzystujące zieleni wysoką⁸⁰.

Tabela 12. Średnia wartość monetarna rocznych usług ekosystemowych na jedno drzewo w mieście Warszawa

Korzyści [zł]	167
Koszty utrzymania drzewa [zł]	45
Wartość korzyści „netto” [zł]	122

Źródło: Szczepanowska, b.d. (<http://docplayer.pl/7769435-Rola-i-znaczenie-drzew-w-miescie-uslugi-ekosystemowe-drzew-i-wycena-ich-wartosci.html>, dostęp: 27.05.2020).

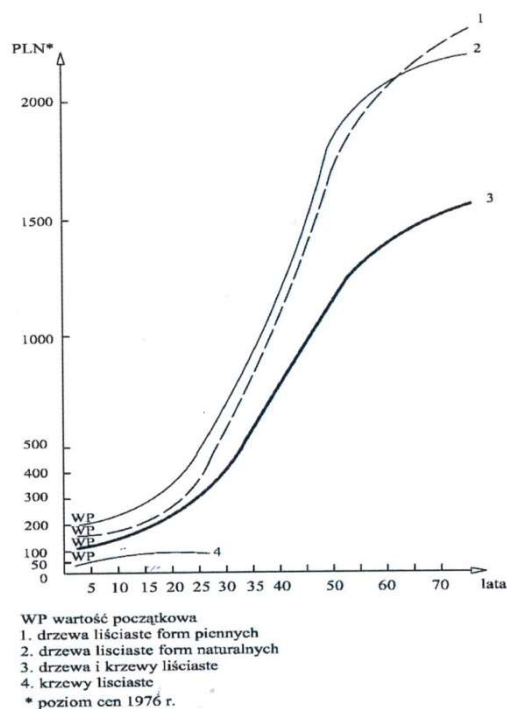
Wartość usług ekosystemowych „zielonej infrastruktury”, w tym korzyści wynikających z zacieniania zabudowy przez drzewa, wzrasta wraz z upływem czasu (rys. 11) (Szczepanowska, 2015). Zdaniem Simpsona i McPhersona (1996) oszczędności wynikające ze zmniejszonego zużycia energii elektrycznej do klimatyzowania budynków zacienionych przez drzewa są wprost proporcjonalne do wieku zieleni: im starsza, tym większe zyski⁸¹. Przy czym wraz z wejściem drzew w okres starzenia się nadchodzi spadek ich kondycji, co przekłada się na jakość świadczonych usług oraz ich wartość monetarną (Szczepanowska i Sitarski, 2015).

Z uwagi na szereg symultanicznych korzyści płynących z wykorzystania drzew do zacieniania przestrzeni ulicy pożądanym stopień pokrycia ulic koronami drzew powinien wynosić 20-25% powierzchni (Maco i in. 2003 za: Szczepanowska i Sitarski, 2015). Z kolei według norm dla Berlina zalecane jest przyjęcie średnio 100 sztuk drzew na jeden kilometr ulicy (Balder i in., 1997 za: Szczepanowska i Sitarski, 2015).

⁷⁹ Wartość większa niż 1,0 oznacza dodatnią wartość netto.

⁸⁰ Średnią wartość jednego drzewa na Pradze-Północ w Warszawie oszacowano na 8663 zł., co przy liczbie około 12 000 drzew przyulicznych na badanym terenie daje wartość prawie 104 milionów złotych (Szczepanowska i Sitarski, 2015).

⁸¹ Odnotowano roczne oszczędności na klimatyzowaniu budynku sięgające 4% w przypadku wykorzystania 5-letnich drzew i 8% dla 10-letnich (Simpson i McPherson, 1996).



Rysunek 11. Przebieg wzrostu wartości usług „zielonej infrastruktury” na przestrzeni lat
 Źródło: Szczepanowska (2015: 14).

2.4.1. Ograniczenia wykorzystania drzew

Wykorzystanie drzew jako elementów zacieniających w przestrzeni miejskiej wiąże się również z pewnymi ograniczeniami. Dużym problemem w miastach jest zapewnienie roślinom optymalnych warunków do wzrostu i ekspansji, tak by w pełni swoich możliwości mogły osłaniać zabudowę przed insolacją. Czynniki stresowe⁸² przedstawione w tabeli 13 mogą prowadzić do zaburzeń wzrostu i rozwoju zieleni, uszkodzenia jej organów, a w konsekwencji do zamierania drzew (Bach i Frazik-Adamczyk, 2006). Zawęża to pulę możliwych do zastosowania gatunków roślin, które sprawdzą się w nieprzystępnym środowisku miejskim⁸³.

⁸² Terminem tym określa się „wszystkie te bodźce środowiska, które mogą doprowadzić do zaburzeń wzrostu i rozwoju roślin, trwałego uszkodzenia ich organów, a w konsekwencji zamierania drzew” (Bach i Frazik-Adamczyk, 2006: 4).

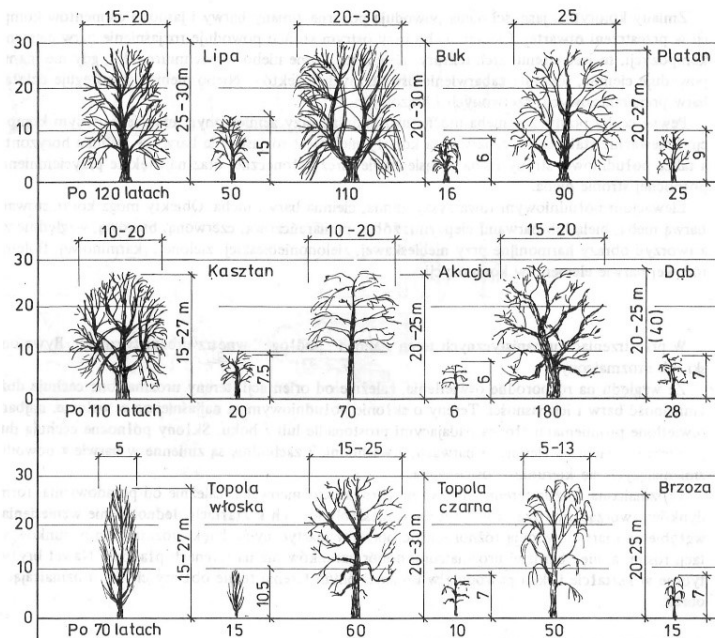
⁸³ W grupie gatunków przeznaczonych do nasadzeń miejskich Borowski i in. (2016) wymieniają m.in. klon polny i jego odmiany (*Acer campestre*), leszczynę turecką (*Corylus colurna*), głóg pośredni (*Crataegus media*) czy jesion pensylwański (*Fraxinus pennsylvanica*).

Tabela 13. Czynniki stresowe wpływające na drzewa w środowisku miejskim

Czynniki abiotyczne	Czynniki biotyczne	Czynniki antropogeniczne
<ul style="list-style-type: none"> wysoka temperatura susza glebowa niedobór tlenu nadmiar metali ciężkich zasolenie podłoża niedobór składników pokarmowych alkalizacja lub zakwaszenie podłoża powłoka lodowa lub śniegowa 	<ul style="list-style-type: none"> małe lub nadmierne zagęszczenie drzew brak lub nadmiar mikroorganizmów glebowych rośliny i zwierzęta pasożytnicze 	<ul style="list-style-type: none"> zanieczyszczenia powietrza ubicie gleby pola elektromagnetyczne duże powierzchnie utwardzone zacienianie przez sąsiadujące wysokie budynki „miejska wyspa ciepła”

Źródło: Opracowanie własne na podstawie Bach i Frazik-Adamczyk (2006).

Ponadto potencjał zieleni wysokiej w zacienianiu zabudowy i terenu wymaga czasu w zależności od tempa wzrostu danej rośliny⁸⁴ (rys. 12). Kiedy osłona budynku przed promieniowaniem słonecznym jest priorytetem, czas może przemawiać na niekorzyść rozwiązań z drzewami jako elementami zacieniającymi. Niemniej jednak obecnie istnieje możliwość przeprowadzenia nasadzeń lub przesadzeń dorosłych już drzew przez specjalistyczne firmy, jak np. Drewnsmol⁸⁵, co znacznie skraca czas oczekiwania na wymierne efekty.



Rysunek 12. Wiek i szybkość wzrostu wybranych gatunków drzew

Źródło: Orzeszek-Gajewska (1984: 62).

⁸⁴ Zacienienie przez małe drzewa jest skuteczne w obniżaniu temperatury powierzchni, przy czym osłaniane powierzchnie są znacznie mniejsze niż w przypadku zacieniania przez drzewa dojrzałe (Armson, 2012). Zacienianie przez małe drzewa wpływa na komfort termiczny ludzi, ale nie odnotowano oddziaływania na temperaturę powietrza (Armson i in., 2013).

⁸⁵ Firma Drewnsmol z siedzibą w Mszczonowie ma w swojej ofercie drzewa o obwodzie 70-80 cm.

Drzewa, zwłaszcza w gęstej zabudowie miejskiej, mogą stanowić zagrożenie dla mienia i życia osób⁸⁶, szczególnie podczas burz. Spadające gałęzie, wiatrolomy czy wywroty mogą generować znaczne koszty związane z usuwaniem katastrof. Jednak odpowiednie zarządzanie drzewami miejskimi, w tym regularna kontrola i cięcie drzew, pozwala zmniejszyć ryzyko szkód spowodowanych przez drzewa podczas gwałtownych zjawisk atmosferycznych (Rosłon-Szeryńska, 2019).

W przypadku drzew znajdujących się blisko zabudowy należy pamiętać również o możliwym oddziaływaniu mechanicznym organów roślinnych na elementy architektoniczne (Celadyn, 1992). Korzenie drzew, zwłaszcza gatunków o dużej sile wzrostu, mogą powodować ewentualne uszkodzenia podziemnych części budynku, utwardzonych nawierzchni terenu, jak chodniki, asfaltowe ścieżki itp., czy elementów kanalizacji⁸⁷.

W pewnych uwarunkowaniach, m.in. w zależności od geometrii otaczającej zabudowy, drzewa mogą niekorzystnie wpływać na komfort cieplny użytkowników zacienianej przestrzeni z uwagi na osłabienie prędkości wiatru w miejscach o słabym ruchu powietrza⁸⁸ lub mogą przyczyniać się do lokalnych turbulencji wiatru (Misni, 2012; Kong i in., 2017). Obecność zieleni wysokiej może także prowadzić do spowolnienia utraty ciepła na drodze promieniowania przez zewnętrzne ściany budynku oraz teren ze względu na przesłanianie chłodnego nieboskłonu nocą⁸⁹, co może być niekorzystne w sezonie letnim w środowisku zurbanizowanym (McPherson i in., 1988). Ponadto drzewa zacieniające zabudowę mogą generować dodatkowe koszty związane ze wzrostem zużycia energii elektrycznej do oświetlenia czy nawet do klimatyzowania pomieszczeń⁹⁰ (Donovan i Butry, 2009).

Niedogodnością przy wykorzystaniu zieleni wysokiej do ochrony przeciwsłonecznej zabudowy może okazać się także alergienność roślin czy emisja biogenych lotnych związków organicznych, które mają istotny wpływ na jakość powietrza⁹¹.

⁸⁶ W Polsce średnie ryzyko śmiertelnego w skutkach wypadku z udziałem upadających drzew wynosi 1 : 100 000 000 (Rosłon-Szeryńska, 2019).

⁸⁷ Zdaniem McPhersona i Peper (1996) średnie koszty naprawy szkód wyrządzonych przez drzewa wynoszą 25% rocznych wydatków na utrzymanie zieleni wysokiej w USA.

⁸⁸ Drzewa przyuliczne mogą obniżyć prędkość wiatru pod koronami o 51% (Kong i in., 2017), stąd zbyt duża ilość zieleni wysokiej może prowadzić do osłabienia przewietrzania terenu (Lewińska i in., 1990). Zwłaszcza w wąskich ulicach obecność dużej liczby drzew może utrudniać wentylację otoczenia (Czerwieńec i Lewińska, 2000).

⁸⁹ Wieczorem pod drzewami temperatura jest nieznacznie wyższa (0,4–0,6°C) niż otoczenia z uwagi na to, że promieniowanie długofalowe emitowane z osłanianych powierzchni jest częściowo absorbowane, odbijane i ponownie do nich dociera (Souch i Souch, 1993). Przy czym zmniejszone zyski ciepła słonecznego dzięki zacienianiu drzew przeważają nad skutkami ograniczonej utraty ciepła w nocy (McPherson i in., 1988).

⁹⁰ Według badań, które przeprowadzili Donovan i Butry (2009), usytuowanie drzew od strony północnej budynku bardzo blisko osłanianych ścian (do 6,1 m) może nieznacznie zwiększyć koszty związane z energią elektryczną – średnio o 7,48 USD w sezonie letnim.

⁹¹ Drzewa emitują biogenne związki lotne pod wpływem czynników stresowych, co może zwiększać problemy smogowe w mieście (Rosłon-Szeryńska, 2019).

Czynniki utrudniające wykorzystanie zieleni do ochrony przeciwsłonecznej budynków w mieście mogą występować w zależności od miejsca lokalizacji zieleni: na terenie lub na budynku (tab. 14).

Tabela 14. Klasyfikacja ograniczeń w wykorzystaniu drzew do ochrony przeciwsłonecznej budynków ze względu na charakter występowania

Umiejscowienie drzew względem budynku	Ograniczenia niezależne od umiejscowienia roślin	Ograniczenia zależne od umiejscowienia roślin
Na terenie	<ul style="list-style-type: none"> warunki klimatyczne i mikroklimatyczne lokalizacji oddziaływanie środowiska miejskiego dostępność odpowiedniej powierzchni dostęp naturalnego oświetlenia do wnętrza budynku pasożyty, szkodniki, choroby ograniczenia wzrostowe roślin ograniczenia wynikające z cech gatunkowych roślin 	<ul style="list-style-type: none"> brak przestrzeni, kolizje z miejską infrastrukturą zapewnienie warunków umożliwiających wzrost i rozwój roślin przy jezdni m.in. z uwagi na ryzyko zasolenia podłoża, czy znaczne ubicie gleby ograniczenia wynikające z zachowania wymaganych odległości od budynków, krawędzi jezdni
Na budynku	<ul style="list-style-type: none"> nieprzewidywalność efektów czas sceptycyzm w stosunku do rozwiązań wykorzystujących zieleni obawy związane z potencjalnymi szkodami spowodowanymi przez drzewa w czasie gwałtownych zjawisk atmosferycznych (wichury itp.) niewiedza w wykorzystaniu zieleni przepisy prawne brak systemu zarządzania drzewami miejskimi nakłady finansowe potrzebne do nasadzenia i utrzymania drzew miejskich 	<ul style="list-style-type: none"> zapewnienie odpowiednich warunków dla roślin, jak podłoże glebowe koszty realizacji ograniczenia związane z przyjętymi rozwiązaniami architektoniczno-budowlanymi

Źródło: Opracowanie własne.

Niektóre ograniczenia w wykorzystaniu drzew jako elementów zacieniających mogą mieć różny okres trwania (tab. 15). Pośród nich przeważają czynniki o charakterze stałego oddziaływania, wpływające w różnym stopniu na osłonę powierzchni przez zieleni wysoką.

Tabela 15. Klasyfikacja ograniczeń w wykorzystaniu drzew do ochrony przeciwsłonecznej budynków ze względu na czas trwania

Ograniczenia o charakterze stałym	<ul style="list-style-type: none"> ograniczenia wynikające z cech gatunkowych roślin ograniczenia wzrostowe roślin warunki klimatyczne oddziaływanie środowiska miejskiego nieprzewidywalność efektów czas
Ograniczenia o charakterze przejściowym	<ul style="list-style-type: none"> niewiedza i sceptycyzm odnośnie do wykorzystania zieleni rozwiązania legislacyjne pasożyty, szkodniki, choroby warunki mikroklimatyczne

Źródło: Opracowanie własne.

Ograniczenia dotyczące wykorzystania zieleni do zacierania elewacji budynków często wynikają z niewiedzy w tym temacie. Mimo wielu badań w obiegu opinii roślinność nadal funkcjonuje głównie jako element dekoracji lub kompozycji. Prowadzić to może do sięgania po droższe, bardziej obciążające dla środowiska rozwiązania niekorzystające z drzew.

Przeszkodę dla wykorzystania zadrzewień do zacierania zabudowy stanowić mogą również obowiązujące przepisy prawa. Brak uregulowań dotyczących minimalnych odległości pni drzew od budynków utrudnia rozplanowanie zieleni wysokiej w pasie między pierzeją ulicy a jezdnią. Z kolei regulacje zawarte w ustawie o drogach publicznych i w rozporządzeniach wykonawczych nie uwzględniają zróżnicowanego charakteru ciągów komunikacyjnych o różnym natężeniu ruchu kołowego. Ograniczenia stanowią także przepisy pożarowe i kominiarskie⁹², które podawane są dla zbyt ogólnikowo ujętych kontekstów techniczno-przestrzennych (Nieroda i Gwizdak, 2020).

Liczba ograniczeń dotyczących zieleni wysokiej jako elementu zacierającego w przestrzeni miejskiej może wzbudzać wątpliwość odnośnie do jej wykorzystania. Jednak skuteczność drzew w ochronie przeciwsłonecznej, wymierne efekty roślin w tej roli, a także wielofunkcyjność zieleni w zakresie świadczonych usług dla środowiska miejskiego zachęcają do sięgania po tego rodzaju rozwiązania, zwłaszcza w dobie postępującej urbanizacji.

⁹² Przepisy przedstawiono w rozdziale 3 niniejszej pracy.

Rozdział 3. Drzewa jako elementy ulicy

3.1. Warunki insolacji w przestrzeni ulicy

Insolacja jest głównym czynnikiem modyfikującym mikroklimat i wpływa na szereg zjawisk fizycznych, m.in. na wymianę ciepła między powierzchnią a atmosferą czy zmiany ruchu powietrza (Lewińska i in., 1990). Promieniowanie słoneczne jest również źródłem energii inicjującej procesy biologiczne na Ziemi. W przestrzeniach miejskich, np. w ulicy, promieniowanie słoneczne oddziałuje na mikroklimat w dwóch skalach (Lewińska, 2000; Zielonko-Jung, 2013):

- w miejskiej warstwie dachowej⁹³, która bezpośrednio przylega do podłoża, z zasięgiem oddziaływania do wysokości dachów,
- w warstwie kominowej⁹⁴, ukształtowanej ponad poziomem ulicy, o wysokości nawet kilkuset metrów (Kastendeuch, 2012).

Promieniowanie słoneczne w warstwie dachowej ulicy wpływa głównie na komfort cieplny⁹⁵ pieszych i dostęp światła naturalnego do przestrzeni i wnętrza budynku, a także rzutuje na zużycie energii w budynkach oraz na warunki termiczne w ich wnętrzu (Lewińska, 2000; Zielonko-Jung, 2013). Z kolei warstwa kominowa, do której emitowane są m.in. ciepło, para wodna, zanieczyszczenia, kształtuje klimat w skali miasta.

Na dostęp oraz dobowy i sezonowy rozkład promieniowania słonecznego we wnętrzu ulicy wpływ mają parametry ulicy, ale także inne elementy, w tym zieleń, zwłaszcza wysoka⁹⁶ (tab. 16). Przy czym za najbardziej istotne⁹⁷ dla mikroklimatu ulicy uznano (Shishegar, 2013):

- wysokość zabudowy i odległość między przeciwległymi pierzejami,
- orientację układu względem stron świata.

Tabela 16. Klasyfikacja parametrów wpływających na warunki insolacji w przestrzeni ulicy

Parametry związane z ulicą	Elementy niezależne
<ul style="list-style-type: none">• szerokość ulicy• wysokość i geometria budynków• orientacja układu względem stron świata	<ul style="list-style-type: none">• szerokość geograficzna lokalizacji• zieleń wysoka

Źródło: Opracowanie własne na podstawie: Lewińska (2000).

⁹³ Z ang. *urban canopy layer* (UCL).

⁹⁴ Z ang. *urban boundary layer* (UBL).

⁹⁵ Z promieniowania słonecznego, które dociera do ulicy, 60% jest przekazywane do powietrza w postaci ciepła odczuwalnego, 30% jest magazynowane w materiałach, a 10% – wykorzystywane na ewapotranspirację z podłoża (Núñez i Oke, 1977).

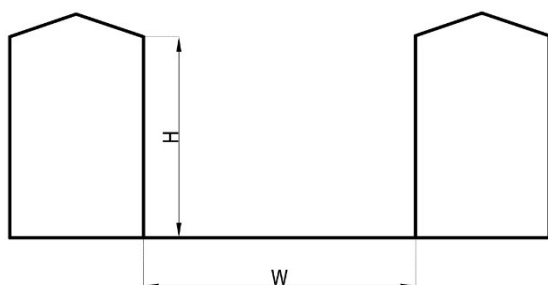
⁹⁶ Drzewa w odróżnieniu od niskiej roślinności dzięki cechom morfologicznym (m.in. wysokości, masie listowia, konarów i gałęzi) mogą skutecznie ograniczyć docierającą do osłanianych powierzchni ilość bezpośredniego promieniowania słonecznego. Wpływ zieleni na dostęp bezpośredniego promieniowania słonecznego do osłanianych powierzchni został omówiony w rozdziale 2 niniejszej pracy.

⁹⁷ Te parametry wpływają m.in. na bilans cieplny powierzchni ścian i podłoża w ulicy (Núñez i Oke, 1977).

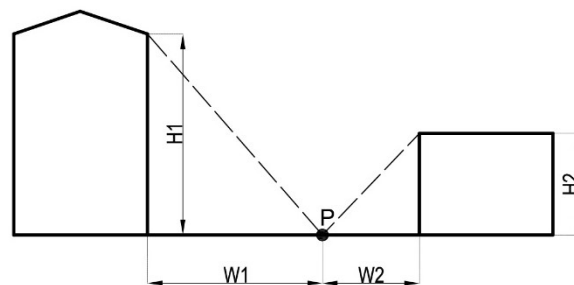
3.1.1. Geometria ulicy miejskiej

W literaturze przedmiotu dotyczącej badań nad mikroklimatem i klimatem miasta powszechnie jest stosowanie terminu *kanion uliczny* w odniesieniu do ulicy. Pojęcie to odnosi się do przestrzeni ograniczonej przez ściany sąsiadujących ze sobą budynków z uwzględnieniem terenu między nimi (Núñez i Oke, 1977).

W badaniach nad m.in. promieniowaniem słonecznym w przestrzeni kanionu ulicznego geometria układu jest definiowana przez parametr proporcji H/W ⁹⁸, określający stosunek wysokości zabudowy (H) tworzącej pierzeję do szerokości ulicy (W). Rysunek 13 przedstawia parametry H i W dla ulicy o symetrycznym profilu, tj. dla układu, w którym budynki mają jednakową wysokość (Arnfield, 1990).



Rysunek 13



Rysunek 14

Rysunek 13. Parametry H i W dla ulicy o symetrycznym profilu

Źródło: Opracowanie własne.

Rysunek 14. Parametry H i W dla ulicy o niesymetrycznym profilu

Źródło: Opracowanie własne

W przypadku ulic o asymetrycznych profilach, tj. z budynkami o zróżnicowanej wysokości, współczynnik H/W wyrażony jest wzorem (Ratti i in., 2005 za: Zielonko-Jung, 2013) (rys. 14):

$$(H/W) = (H_1 + H_2) / 2(W_1 + W_2)$$

gdzie:

- H_1 i H_2 – wysokości przesłaniania widoku z punktu P,
- W_1 , W_2 – odległości ścian przesłaniających od punktu P.

W zależności od wartości parametru H/W profile ulicy mogą zostać sklasyfikowane jako (Shishegar, 2013):

- płytkie – gdy współczynnik H/W jest mniejszy niż 0,5,
- głębokie – gdy H/W wynosi co najmniej 2.

⁹⁸ H/W – z ang. *height-to-width ratio*.

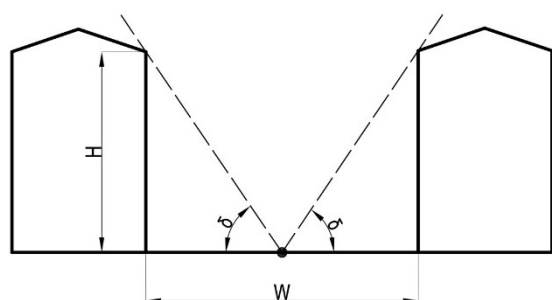
W powyższej klasyfikacji wyodrębniono ulice o parametrze H/W równym 1, określone jako układy równe (z ang. *uniform*).

Zdaniem Oke (1988) dla zapewnienia optymalnego mikroklimatu przestrzeni ulicy w zakresie m.in. dostępności słońca, warunków przewietrzania i warunków cieplnych wskazane jest zachowanie proporcji wysokości do szerokości układu H/W między 0,4 a 0,6.

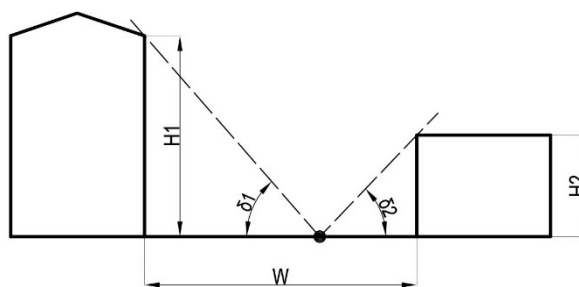
Parametrem charakteryzującym geometrię ulicy jest również współczynnik L/H⁹⁹, który wyraża stosunek długości ulicy między dzielącymi ją dwoma głównymi skrzyżowaniami do wysokości zabudowy. Z uwagi na długość wyróżnia się ulice (Shishegar, 2013):

- krótkie, gdzie L/H ≈ 3,
- średnie, gdzie L/H ≈ 5,
- długie, gdzie L/H ≈ 7.

W badaniach dotyczących promieniowania słonecznego w przestrzeniach miejskich stosowany jest także współczynnik widoczności nieba SVF (z ang. *sky view factor*), który jest miarą otwarcia układu w kierunku nieba. Parametr ten wyraża kąt, do którego niebo pozostaje zasłonięte przez stałe elementy w danym otoczeniu, i zawiera się między wartością 0 przy braku widoku a 1, gdy otwarcie na widok jest niezakłócone (Oke, 1988).



Rysunek 15



Rysunek 16

Rysunek 15. Parametry współczynnika widoczności nieba (SVF) dla ulicy o symetrycznym profilu

Źródło: Opracowanie własne.

Rysunek 16. Parametry współczynnika widoczności nieba (SVF) dla ulicy o zróżnicowanej wysokości elewacji

Źródło: Opracowanie własne.

Współczynnik widoczności nieba (ψ_s) dla ulicy o symetrycznym profilu jest równy (Oke, 1988) (rys. 15):

$$\psi_s = \cos \delta$$

natomiast parametr SVF (ψ_s) dla ulicy o zróżnicowanej wysokości budynków może być wyrażony za pomocą wzoru (Oke, 1988) (rys. 16):

⁹⁹ Z ang. *length-to-height ratio*. Parametr L/H jest stosowany zwłaszcza w badaniach nad cyrkulacją powietrza w kanionie ulicy (Shishegar, 2013).

$$\psi_s = (1 - (\psi_{w1} + \psi_{w2}))$$

gdzie:

ψ_w – współczynnik widoczności ściany ulicy liczony według wzoru:

$$\psi_w = (1 - \cos \delta)/2, \text{ gdzie } \delta = \tan^{-1} (H/0,5W).$$

W tabeli poniżej przedstawiono przybliżoną zależność współczynnika widoczności nieba (ψ_s) i parametru proporcji H/W ulicy. Wraz ze wzrostem wartości parametru H/W wzrasta kąt (δ), do którego niebo pozostaje zasłonięte w danym otoczeniu, a zmniejsza się wartość współczynnika SVF. Dla ulic o płtykach profilach o $H/W \leq 0,5$ wartość współczynnika SVF wynosi więcej niż 50%. Z kolei w przypadku ulic o głębokich przekrojach, tj. o $H/W > 1,0$, wartość SVF zbliża się do 0.

Tabela 17. Przybliżony związek współczynnika widoczności nieba z parametrem proporcji H/W

H/W	0	0,25	0,5	1,0	2,0	3,0	4,0
δ	0°	27°	45°	63°	76°	81°	83°
ψ_s	1,00	0,89	0,71	0,45	0,24	0,16	0,12

Źródło: Oke (1988: 108).

Parametr H/W ma większe znaczenie dla warunków insolacji ulicy niż jej orientacja względem stron świata (Arnfield, 1990). Geometria ulicy wpływa na dostęp promieni słonecznych do ścian i podłogi ulicy oraz pieszych. W tabeli 17 zaprezentowano wskaźnik dostępu promieniowania słonecznego dla ściany, podłogi i strefy pieszych w ulicach o różnym parametrze H/W. Wyniki badań Arnfielda (1990) wskazują, że zmiana wartości wskaźnika H/W ma największy wpływ na wartości promieniowania słonecznego przyjmowanego przez podłoże.

Tabela 18. Wskaźnik chłonności i dostępu promieniowania słonecznego w ulicach o różnym parametrach H/W przy zachmurzonym niebie

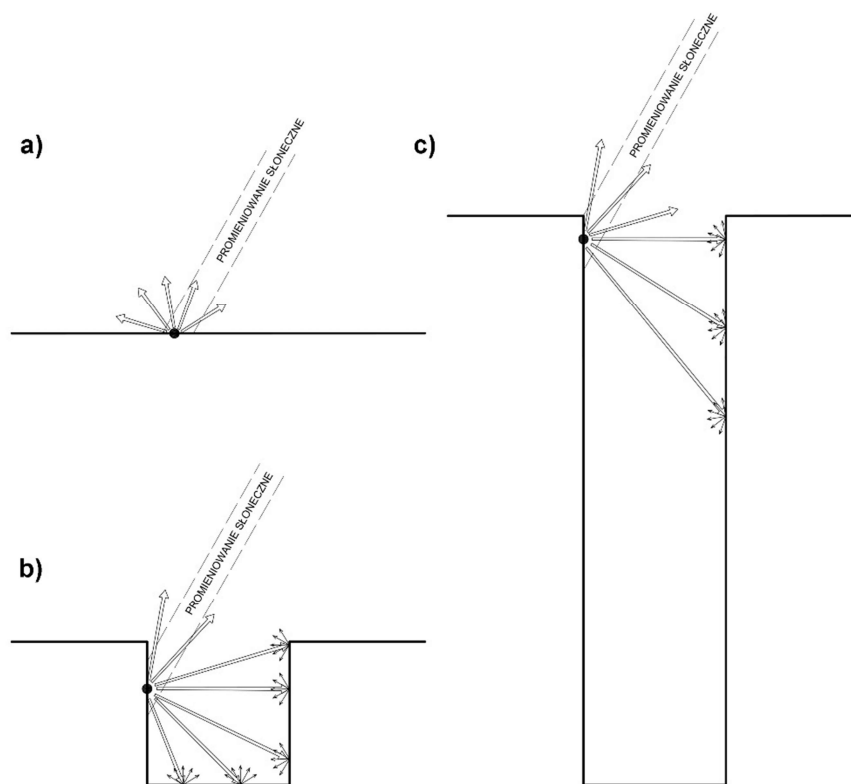
H/W	Wskaźnik chłonności kanionu ulicy*	Wskaźnik dostępu promieniowania słonecznego**		
		ściana	podłoga	piesi
0,25	0,87	0,45	0,84	0,42
0,50	0,89	0,41	0,70	0,34
1,00	0,90	0,34	0,51	0,25
2,00	0,92	0,24	0,30	0,15
3,00	0,92	0,18	0,21	0,11
4,00	0,92	0,14	0,16	0,08

* Z ang. *canyon absorptivity* – to stosunek padającego promieniowania słonecznego na poziomie dachu w ulicy do całkowitego promieniowania słonecznego padającego na poziomą powierzchnię w ulicy niezastoniętą przez stałe elementy otoczenia (Arnfield, 1990: 119).

** Z ang. *solar access index* – to stosunek bezpośredniego promieniowania słonecznego padającego na powierzchnię do potencjalnej maksymalnej dostępnej wartości promieniowania słonecznego (Ali-Toudert i Mayer, 2004).

Źródło: Arnfield (1990:128).

Na terenie płaskim pozbawionym zabudowań większa część padających promieni słońca jest odbijana lub wypromieniowywana do atmosfery (rys. 17). W układach o współczynniku H/W wynoszącym około 1 znaczna część promieniowania słonecznego jest odbijana od powierzchni i zostaje zaabsorbowana przez ściany i podłoże kanionu ulicznego (Arnfield, 1990). Natomiast w ulicach o parametrze H/W równym co najmniej 4 większość odbitych promieni słońca jest akumulowana wyłącznie przez ściany (Arnfield, 1990). Im głębszy profil ulicy oraz niższa wysokość słońca, tym większe różnice w zakresie promieniowania słonecznego między dolnym a górnym poziomem elewacji (Garcia-Nevado i in., 2016)¹⁰⁰. Dolna strefa ulicy o głębokich przekrojach otrzymuje mniej promieni słońca w porównaniu do strefy górnej, stąd pojawia się ryzyko jej niedoświetlenia.



Rysunek 17. Rozkład promieniowania słonecznego: a) na terenie niezabudowanym, b) w ulicy o H/W = 1, c) w ulicy o H/W = 4

Źródło: Opracowanie własne na podstawie: Givoni (1998).

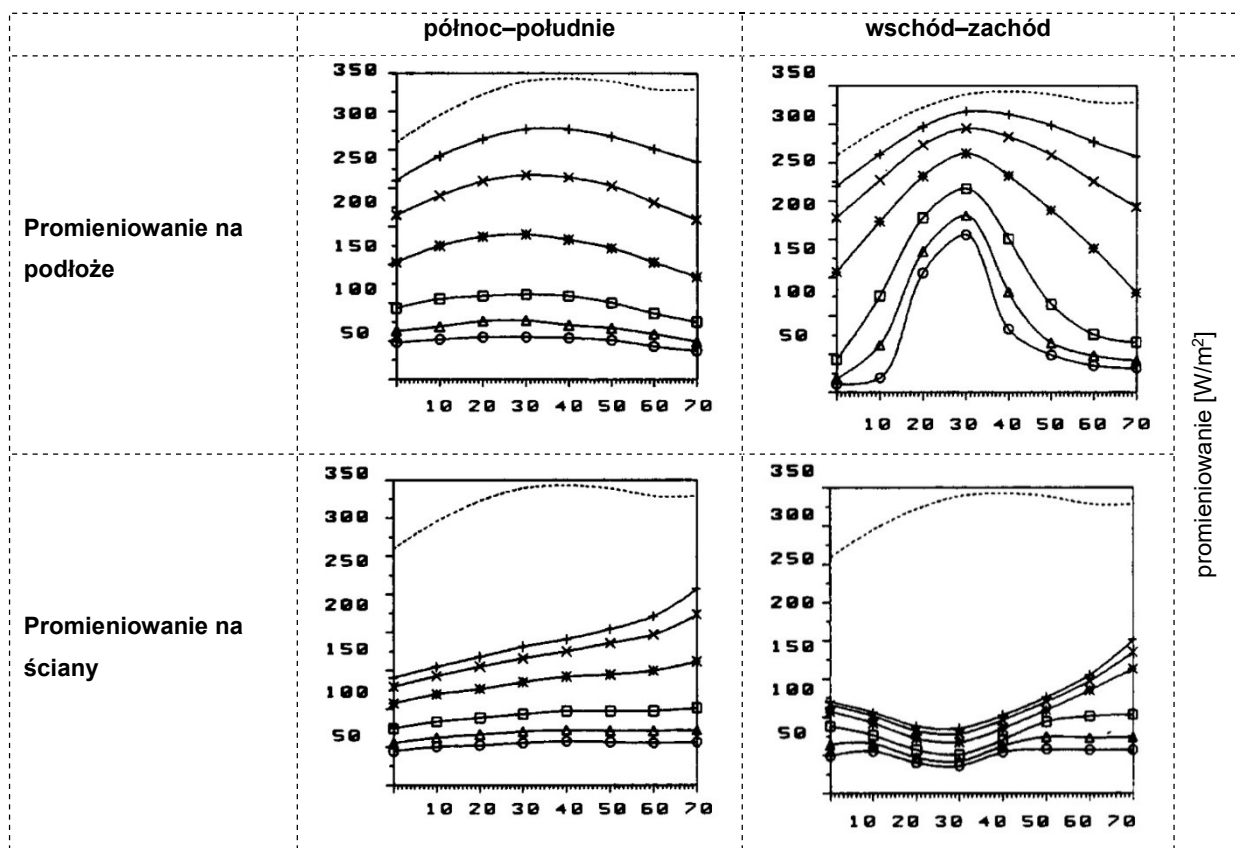
Zdaniem Arnfielda (1990) w ciągu roku geometria ulicy może mieć większy wpływ na komfort cieplny człowieka niż szerokość geograficzna lokalizacji (tab. 19). Wyniki badań Arnfielda¹⁰¹ (1990) przedstawione w tabeli 19 wskazują, że modyfikacja wartości parametru

¹⁰⁰ Zwłaszcza dla wschodnich i zachodnich ścian w okresie przesilenia letniego, a południowych dla przesilenia zimowego (Garcia-Nevado i in., 2016).

¹⁰¹ Badania przeprowadzone przez Arnfielda (1990) dotyczyły wpływu geometrii zabudowy wyrażonej przez parametr H/W, orientacji ulicy względem stron świata oraz lokalizacji na wartość promieniowania słonecznego przyjmowanego przez podłoże ulicy, ściany budynków i strefę pieszych. W pracy uwzględniono parametry H/W

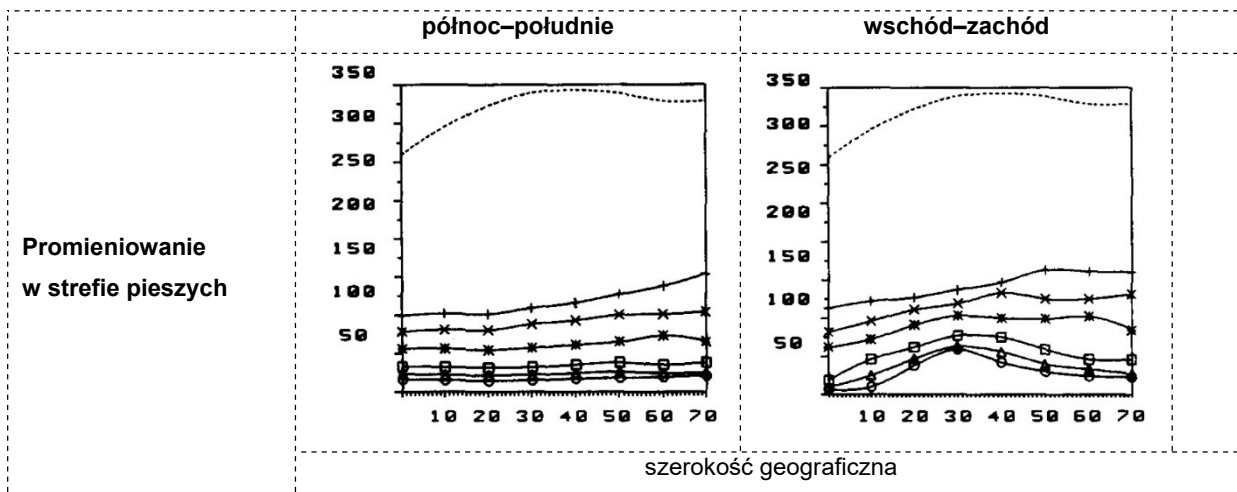
H/W powoduje większe zmiany w wartościach promieniowania słonecznego docierającego do powierzchni ulicy, zwłaszcza na osi północ-południe, w porównaniu do zmiany szerokości geograficznej. Stąd parametr H/W ulicy jest istotny w kontekście kształtowania przestrzeni sprzyjającej warunkom komfortu cieplnego pieszych. W klimatach gorących wskazane jest projektowanie wąskich uliczek, które mogą zapewnić ochronę użytkownikom przestrzeni przed intensywnym promieniowaniem słonecznym. Natomiast na szerokościach geograficznych, na których częstotliwość zachmurzenia nieba jest wysoka, geometria ulicy wpływa na warunki insolacji w znacznie mniejszym stopniu¹⁰², zwłaszcza w przypadku ścian (Arnfield, 1990).

Tabela 19. Rozkład natężenia promieniowania słonecznego w czerwcu na podłoże i ściany oraz w strefie pieszych dla ulicy o orientacji północ-południe i wschód-zachód o różnych parametrach H/W i przy różnych szerokościach geograficznych



wynoszące: 0,25, 0,5, 1, 2, 3, 4, dwie orientacje ulicy na osi północ-południe i wschód-zachód oraz szerokości geograficzne w zakresie 0-70°.

¹⁰² W badaniach Arnfielda (1990) nie odnotowano znacznych różnic w natężeniu promieniowania słonecznego na powierzchni ścian ulicy w wariantach z $H/W = 0,4$ i $H/W = 0,6$. Wyjątek stanowiło podłoże ulicy, dla którego odnotowano wzrost wartości przyjmowanego promieniowania wraz ze zmniejszającym się współczynnikiem H/W (przy parametrze $H/W = 0,6$ podłoże otrzymało 66% promieniowania, a przy $H/W = 0,4$: 75%).

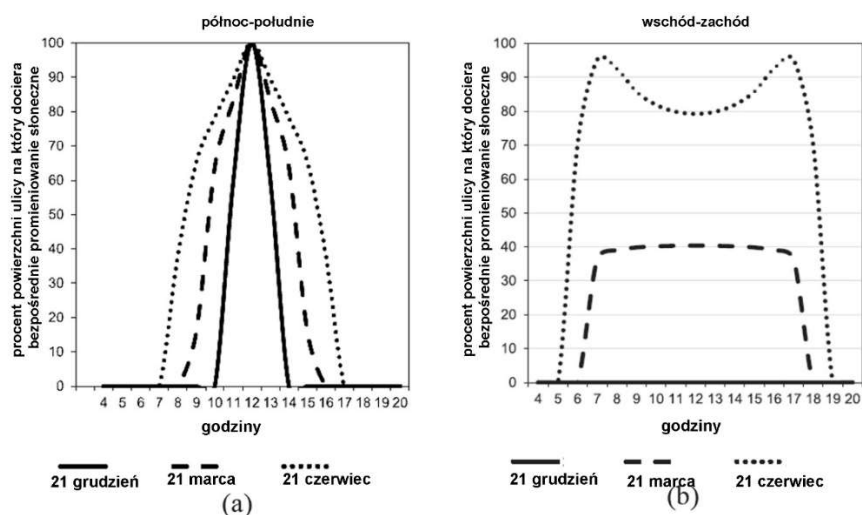


Oznaczenia poszczególnych wartości parametrów H/W: 0,25 ++, 0,5 x-x, 1 *-*, 2 □-□, 3 Δ-Δ, 4 ○-○. Pionowa oś oznacza natężenie promieniowania słonecznego [W/m²], pozioma – szerokość geograficzną.

Źródło: Opracowanie na podstawie: Arnfield (1990: 120, 122).

3.1.2. Orientacja względem stron świata

W badaniach orientacja ulicy względem stron świata przyjmowana jest zgodnie z kierunkiem wyznaczonym przez jej dłuższą oś. Orientacja w bardzo niewielkim stopniu wpływa na ilość promieniowania słonecznego w ulicy, ale rzutuje na dobowy i sezonowy rozkład promieniowania słonecznego na różne powierzchnie układu: ściany, podłoże i dachy (Lewińska, 2000; Shishegar, 2013). Przykładowo w układach na osi wschód-zachód natężenie bezpośredniego promieniowania słonecznego w godzinach porannych i popołudniowych jest większe niż przy orientacji północ-południe (rys. 18).



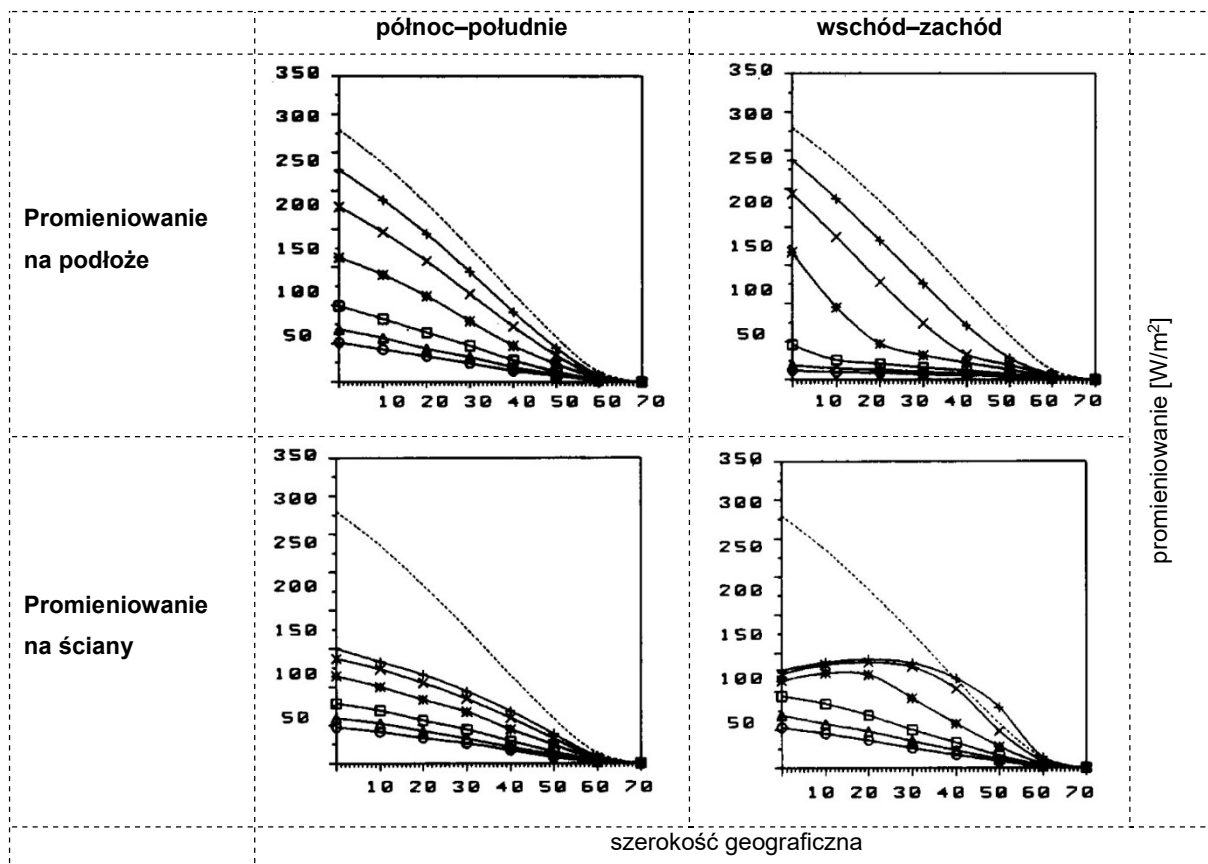
Rysunek 18. Procent powierzchni wyekspozowanej na bezpośrednie promieniowanie słoneczne w ulicy o szerokości 15 m i o orientacji: a) północno-południowej, b) wschodnio-zachodniej – w dniach: 21 grudnia, 21 marca i 21 czerwca

Źródło: Shishegar (2013: 55).

Badania Arnfielda (1990) wskazują także, że latem orientacja ulicy ma większe znaczenie dla insolacji ścian niż w okresie zimowym, zwłaszcza w klimatach chłodnych

i umiarkowanych. W tabeli 20 przedstawiono rozkład promieniowania słonecznego na podłoże i ściany ulicy w grudniu na różnych szerokościach geograficznych (0-70°). Różnice wartości promieniowania pomiędzy układami o orientacji północ–południe a wschód–zachód są wyraźnie mniejsze w porównaniu do pomiarów z czerwca (tab. 19).

Tabela 20. Rozkład natężenia promieniowania słonecznego w grudniu na podłoże i ściany ulicy o orientacji północ–południe i wschód–zachód o różnych parametrach H/W i przy różnych szerokościach geograficznych



Oznaczenia poszczególnych wartości parametrów H/W: 0,25 +-+, 0,5 x-x, 1 *-*, 2 □-□, 3 Δ-Δ, 4 ○-○. Pionowa oś oznacza natężenie promieniowania słonecznego [W/m²], pozioma – szerokość geograficzną.

Źródło: Opracowanie na podstawie: Arnfield (1990: 120, 122).

Pod względem komfortu cieplnego pieszych lepsze warunki w sezonie letnim, tj. większe zacielenie, zapewnia ulica na osi północ–południe w porównaniu do zorientowanej wschód–zachód, również przy płytkich profilach¹⁰³ ($H/W \leq 1$) (Ali-Toudert i Mayer, 2006). Ulice zorientowane wschód–zachód, nawet te o głębokim przekroju ($H/W > 2$), zapewniają zacielenie tylko w niewielkim stopniu, zwłaszcza w klimatach takich jak suchy kontynentalny (Ali-Toudert i Mayer, 2004). Z kolei najkorzystniejsza ze względu na ograniczenie dostępu promieniowania słonecznego latem, a zapewnienie zysków słonecznych zimą jest orientacja

¹⁰³ W orientacji północ–południe zwłaszcza teren bezpośrednio wzdłuż budynków zapewnia warunki sprzyjające mniejszemu stresowi termicznemu przechodniów w porównaniu do układu na osi wschód–zachód (Ali-Toudert i Mayer, 2006).

na osi północny wschód–południowy zachód oraz północny zachód–południowy wschód (Ali-Toudert i Mayer, 2004).

Wpływ orientacji układu na warunki insolacji zależy również od szerokości geograficznej danej lokalizacji (tab. 19 i 20). W okresie letnim w ulicach o kierunku północ–południe i wschód–zachód jedynie w przypadku tej drugiej orientacji odnotowano znaczące różnice w średnim natężeniu promieniowania słonecznego na różnych szerokościach geograficznych¹⁰⁴, zwłaszcza przy głębokich profilach (Arnfield, 1990). Natężenie promieniowania słonecznego na ścianach ulicy wykazuje mniejsze zróżnicowanie ze względu na zmianę szerokości geograficznej niż w przypadku podłoża¹⁰⁵ (Arnfield, 1990).

Warunki insolacji ukształtowane przez geometrię i orientację ulicy oraz położenie geograficzne lokalizacji mogą zostać częściowo zmodyfikowane przez wprowadzenie zieleni wysokiej jako elementu ochrony przeciwsłonecznej. Jak wskazują badania, zacienianie przez drzewa odgrywa znaczącą rolę w kształtowaniu mikroklimatu i jest ważnym elementem w procesie planowania ulic¹⁰⁶ (Shashua-Bar i Hoffman, 2002; Szczepanowska i Sitarski, 2015).

3.2. Drzewa w ulicy miejskiej

3.2.1. Rola drzew

W europejskich miastach drzewa jako nasadzenia przyuliczne pojawiły się w XVII wieku. Pierwsze udokumentowane przypadki datowane są na rok 1611, kiedy to w miastach holenderskich zieleni wysoką wykorzystywano do obsadzania ulic i kanałów miejskich¹⁰⁷ (Kosmala, 2016) (rys. 19). Wprowadzenie zadrzewień wzdłuż ciągów komunikacyjnych podyktowane było głównie względami kompozycyjnym i estetycznymi. Drzewa przyuliczne pełniły rolę elementu porządkującego i dekorującego przestrzeń publiczną (Fortuna-Antoszkiewicz, 2004). Rytmicznie rozstawione drzewa wzdłuż dróg podkreślały ich reprezentacyjny charakter. Wzorem dla nasadzeń ulicznych były obsadzone drzewami aleje podmiejskie, które na skutek rozwoju i przesuwania się granic miasta znalazły się w obrębie stref centralnych (Fortuna-Antoszkiewicz, 2004). Zadrzewione aleje stały się istotnym elementem wielkich koncepcji urbanistycznych w okresie baroku i oświecenia. Podkreślały one osie widokowe założeń ogrodowo-pałacowych i tworzyły powiązania między rozproszonymi obiektami w krajobrazie (Kosmala, 2016).

¹⁰⁴ W ciągu roku wpływ geometrii ulicy wyrażonej przez parametr H/W oraz orientacji względem stron świata na warunki insolacji panujące w przestrzeni ulicy jest większy na szerokościach geograficznych 20-40°.

¹⁰⁵ Przy czym wartość natężenia promieniowania słonecznego na podłożu jest w większym stopniu zależna od parametru proporcji H/W niż od szerokości geograficznej (Arnfield, 1990).

¹⁰⁶ Zagadnienie zostało szerzej przedstawione w rozdziale 2 niniejszej pracy.

¹⁰⁷ Rysunki Abrahama Rademakera, które przedstawiają XVII-wieczne ulice i bulwary miast holenderskich, wskazują na wykorzystanie zieleni wysokiej wzdłuż arterii komunikacyjnych (Kosmala, 2016).

W XIX wieku drzewa były powszechnie wykorzystywane w przestrzeniach ulic i placów (Kosmala, 2016). W ramach przebudowy Paryża zrealizowanej przez Eugène'a Haussmanna w latach 1852-1870 nowo wytyczone aleje, bulwary i promenady obsadzone zostały szpalerami zieleni wysokiej (fot. 20). Pod koniec XIX i na początku XX wieku w miastach w dalszym ciągu podejmowano działania związane z porządkowaniem przestrzeni publicznej, w tym wprowadzano zadrzewienia (Kosmala, 2016). W Warszawie w 1889 roku swoją działalność organu doradczego magistratu miasta rozpoczął Obywatelski Komitet Plantacyjny, który m.in. zajmował się planowaniem zieleni wysokiej w przestrzeni miast. W tym okresie publikowano także opracowania poświęcone kształtowaniu nasadzeń przyulicznych, m.in. w 1910 roku wydana została książka Edmunda Jankowskiego *Zadrzewienie miast naszych*, w której autor szczegółowo przedstawia zasady rozplanowania zieleni w ulicach o różnej szerokości (Fortuna-Antoszkiewicz, 2004).



Rysunek 19



Fot. 20

Rysunek 19. Rysunek Abrahama Rademakera, na którym widoczny jest szpaler drzew wzdłuż kanału w Leiden
Źródło: *Gezicht op de Sint Lodewijkskerk in Leiden – Abraham Rademaker*, Google Arts & Culture, <https://artsandculture.google.com/asset/gezicht-op-de-sint-lodewijkskerk-in-leiden-abrahamrademaker/WAEKOAz8Cjhqg> (dostęp: 28.10.2020).

Fot. 20. Widok z Łuku Triumfalnego w Paryżu na aleje obsadzone drzewami
Źródło: *Paris Part 5: Avenue des Champs-Elysees and Arc de Triomphe*, 1.06.2014, <http://pianofantaisie.blogspot.com/2014/07/paris-part-5-avenue-des-champs-elysees.html> (dostęp: 28.10.2020).

Po I wojnie światowej nastąpiła zmiana w postrzeganiu roli drzew przyulicznych. Uwagę zwrócono na funkcje przyrodnicze zieleni i jej znaczenie dla klimatu miasta. W publikacji pt. *Zadrzewienie ulic miejskich* z 1918 roku jej autor Stanisław Rutkowski wskazuje m.in. na zdrowotne znaczenie drzew w mieście, ale także na zagrożenia dla istnienia zieleni przyulicznej (Fortuna-Antoszkiewicz, 2004). W tym okresie obligatoryjne stało się zadrzewianie ulic miejskich w polskich miastach (Kosmala, 2016). Wydawane w latach dwudziestych XX wieku przepisy prawne nakładały taki obowiązek na jednostki samorządowe, m.in. Okólnik Ministra Spraw Wewnętrznych z dnia 2 XI 1927 roku w sprawie zadrzewienia kraju (Fortuna-Antoszkiewicz, 2004). Publikowane były również różne opracowania dotyczące zagadnień związanych z zielenią uliczną, np. *Drzewa liściaste, leśne*

i alejowe (1928) Bronisława Gałczyńskiego, które zawierało oficjalny „Wykaz gatunków drzew najodpowiedniejszych do obsadzania ulic”, sporządzony przez Komisję Ogrodową Warszawską (Fortuna-Antoszkiewicz, 2004).

Po II wojnie światowej kwestie związane z kształtowaniem zieleni miejskiej, m.in. z zadrzewianiem dróg, pozostały wciąż aktualne. Nowe regulacje, które pojawiły się w tym czasie, w głównej mierze opierały się na tych stosowanych w przeszłości (Kosmala, 2016). Wiele informacji w zakresie urządzenia otoczenia, w tym różnych typów dróg, zielenią zawiera opracowanie z 1950 roku pt. *Przestrzeń zielona w miastach* autorstwa Anny Ptaszyckiej. Autorka przedstawiła przekroje ulic z rozplanowaniem w ich wnętrzu zieleni, m.in. drzew. Z kolei prof. Tadeusz Tołwiński w książce *Urbanistyka. Zieleń w urbanistyce* w rozdziale ósmym podkreśla estetyczne i zdrowotne funkcje zieleni zlokalizowanej wzdłuż arterii komunikacyjnej i na placach miejskich.

Opracowania z XIX i XX wieku dotyczące drzew ulicznych w polskich miastach zawierały liczne wskazówki w zakresie m.in. wyboru drzew oraz ich lokalizacji z uwzględnieniem np. wymagań roślin czy dostępu światła dziennego do budynków tworzących pierzeje. W tabeli 21 przedstawiono niektóre wytyczne zawarte w przywołanych powyżej archiwalnych publikacjach dotyczących właściwego rozplanowania zieleni wysokiej w ulicy.

Tabela 21. Wytyczne dotyczące drzew ulicznych zawarte w wybranych archiwalnych opracowaniach z XIX i XX wieku

Opracowanie	Wytyczne
E. Jankowski, 1895. <i>Drzewa w mieście</i> . „Ogrodnik Polski”, 16, s. 368.	<ul style="list-style-type: none"> nasadzenia drzew przede wszystkim w miejscach, gdzie panują najlepsze warunki do ich rozwoju, jak np. place, szerokie ulice, niewybrukowane aleje zalecane są gatunki i odmiany o jak najmniejszych wymaganiach, np. „[...] akacje, głogi kuliste, wierzby strzyżone w kule i w ogóle małe drzewa, które złe warunki łatwiej zniosą, a choć cienia dadzą niewiele, ale ulice ozdobią i ożywią [...]” (Jankowski za: Fortuna-Antoszkiewicz, 2004: 220)
E. Jankowski, 1910. <i>Zadrzewienie miast naszych</i> . Druk Drukarni Polskiej (L.Straszewicza), Warszawa.	<ul style="list-style-type: none"> w Polsce nasadzenia drzew wskazane są na ulicach o szerokości powyżej 20 m ze względu na uwarunkowania klimatyczne w ulicach o szerokości 20 m zalecane jest pozostawienie chodników bez nasadzeń roślinnych, a zaplanowanie na środku jezdni pasa o szerokości minimum 3 m z jednym rzędem dużych drzew w alejach o szerokości powyżej 20 m wskazane są nasadzenia trzech lub czterech rzędów drzew: po jednym rzędzie na chodnikach po obu stronach ulicy oraz jeden lub dwa rzędy w pasie na środku jezdni, ewentualnie cztery rzędy drzew na środku ulicy w ulicach o szerokości do 15 m można stosować drzewa o małych koronach lub formy strzyżone minimalny zalecany odstęp między drzewem a chodnikiem to 0,75 m minimalna dopuszczalna odległość między drzewem a budynkiem to 3,25 m drzewa o szerokich koronach należy sadzić na chodnikach o szerokości co najmniej 5,5 m do 6 m nasadzenia powinny uwzględniać przebieg ulicy z zachowaniem jej krzywizny i zmiany kształtu

Opracowanie	Wytyczne
	<ul style="list-style-type: none"> niewskazana jest lokalizacja zadrzewień zbyt blisko wyjazdów z bram, zakrętów, instalacji podziemnych należy zachować odstępy między drzewami małymi równe 4,5 m, w przypadku większych – 5 m, a dla największych drzew – 7-8 m
S. Rutkowski, 1918. <i>Zadrzewienie ulic miejskich</i> . Odbitka z „Przeglądu Technicznego”, Skład główny w Księgarni Ludowej J. Sikorskiej, Warszawa.	<ul style="list-style-type: none"> zachowanie pomiędzy zabudową a niewielkim drzewem co najmniej 4 m odległości, a w przypadku drzew większych – 5 m do 8 m odległość od drzewa do krawędzi chodnika powinna wynosić nie mniej niż 0,75 m w przypadku linii tramwajowej w ulicy wskazane jest sadzić drzewa tylko z jednej strony jezdni, a drugą przeznaczyć na przebieg traktacji tramwajowej zalecane jest zachować odstęp pomiędzy drzewami w rzędzie równy 5 m dla małych drzew, 6-8 m dla drzew średnich, a dla dużych o rozłożystych koronach – minimum 10 m w alei odległość między dwoma rzędami drzew otaczającymi chodnik powinna wynosić 7-10 m należy zapewnić drzewu otwór w nawierzchni o dowolnym kształcie o powierzchni co najmniej 1,5 m²
B. Gałczyński, 1928. <i>Drzewa liściaste leśne i alejowe</i> . Nakładem autora, Piaseczno pod Warszawą. W: Studia i Materiały, seria: Krajobrazy 7 (19), 1995, s. 158-162, 180.	<ul style="list-style-type: none"> wysokość drzew ulicznych liczona od ziemi do korony powinna wynosić nie mniej niż 2,25 m, a w przypadku ulic ruchliwych 2,5-3,0 m zalecana odległość pomiędzy drzewami w alei to w przypadku drzew małych 4 m, średnich – 6-7 m, a największych – 9-10 m
A. Ptaszycka, 1950. <i>Przestrzenie zielone w miastach</i> . Ludowa Spółdzielnia Wydawnicza, Poznań.	<ul style="list-style-type: none"> w zależności od szerokości ulicy szerokość pasa z roślinnością powinna wynosić 2 m, 3,5 m lub 6 m dla rzędu drzew z trawnikiem, a dla podwójnego rzędu drzew z trawnikiem – 8 m w ulicach o szerokości około 50 m wskazane są pasy szerokości 15 m z czterema rzędami drzew jako rozdzielenie linii tramwajowych i jezdni wykorzystanie drzew do wydzielenia ruchu pieszego, rowerowego i samochodowego

Źródło: Opracowanie własne na podstawie: Fortuna-Antoszkiewicz (2004).

Współcześnie ze względu na zmiany klimatyczne i pogarszające się warunki życia mieszkańców miast wzrasta ekologiczne znaczenie zieleni, w tym zieleni wysokiej miejskich tras komunikacyjnych. Na zlecenie władarzy miast, którzy są zainteresowani wykorzystaniem roślin, a zwłaszcza drzew, do przeciwdziałania niekorzystnym zjawiskom klimatycznym, np. miejskiej wyspie ciepła, powstają opracowania dotyczące zasad kształtowania, pielęgnacji i wyboru gatunków do zadrzewień przyulicznych m.in dla Wrocławia (Szopińska i Zygmunt-Rubaszek, 2010), Warszawy (Borowski i in., 2016) czy Łodzi (Drozda i in., 2018). Wskazania w nich zawarte uwzględniają współczesne zagrożenia i ograniczenia w wykorzystaniu zadrzewień w przestrzeni ulicy. Przedstawiają również obecne technologie (np. „ścieżki dla korzeni”, wykorzystanie tzw. gleby strukturalnej) pozwalające na sytuowanie drzew w pasie drogowym.

W opracowaniach dotyczących zieleni wysokiej towarzyszącej arteriom komunikacyjnym w mieście zwraca się również uwagę na szeroki zakres funkcji, jakie te rośliny pełnią na

terenie zurbanizowanym¹⁰⁸. Definicja zieleni przydrożnej zawarta w Ustawie z dnia 21 marca 1985 r. o drogach publicznych¹⁰⁹ również przywołuje funkcje związane z ochroną użytkowników drogi i terenu, wyszczególnione w tabeli poniżej (tab. 22). Główne funkcje drzew ulicznych można sklasyfikować jako: techniczne, regulujące i kompozycyjne.

Tabela 22. Funkcje drzew przyulicznych w mieście

Funkcje drzew ulicznych	
Rola techniczna	<ul style="list-style-type: none"> • ochrona przed wiatrem • osłona przed śniegiem • osłona przed deszczem • ochrona przeciwsłoneczna • ochrona przed hałasem • ochrona przed olśnieniem światłem słonecznym
Rola regulująca	<ul style="list-style-type: none"> • ograniczanie CO₂ w atmosferze • produkcja tlenu • poprawa jakości powietrza atmosferycznego • zapobieganie erozji, retencja gleby
Rola kompozycyjna	<ul style="list-style-type: none"> • stanowią element kompozycji i dekoracji • podkreślają przebieg drogi • stanowią punkt orientacyjny • łączą drogę z otaczającym krajobrazem • wydzielają strefy o różnym przeznaczeniu

Źródło: Opracowanie własne na podstawie Szopińska i Zygmunt-Rubaszek (2010).

Ważną funkcją zadrzewień przyulicznych w mieście jest ochrona pieszych oraz zmotoryzowanych, ale także zabudowy tworzącej pierzeje ulicy przed oddziaływaniem czynników klimatycznych takich jak: promieniowanie słoneczne, wiatr czy opady atmosferyczne.

Zacieniająca rola nasadzeń ulicznych¹¹⁰ wpływa m.in. na poprawę mikroklimatu terenów miejskich, ma udział w ograniczeniu zużycia energii pobliskich budynków¹¹¹, a w skali globalnej oddziałuje na klimat miasta, m.in. przyczyniając się do mniejszego wzrostu temperatury powietrza¹¹² (Szczepanowska, 2007). Według badań przeprowadzonych w Chicago 10% wszystkich drzew to drzewa uliczne, których udział w zacienianiu dróg i budynków przez zieleń wynosi 24% (Szczepanowska, 2007). W okresie gorących, letnich

¹⁰⁸ W rozdziale drugim niniejszej pracy w tabeli 11 przedstawiono funkcje, jakie mogą pełnić drzewa miejskie. W tej części pracy wskazano główne funkcje drzew przyulicznych.

¹⁰⁹ „Zieleń przydrożna – roślinność umieszczoną w pasie drogowym, mającą na celu w szczególności ochronę użytkowników drogi przed oślepieniem przez pojazdy nadjeżdżające z kierunku przeciwnego, ochronę drogi przed zawiewaniem i zaśnieżaniem, ochronę przyległego terenu przed nadmiernym hałasem, zanieczyszczeniem powietrza, wody i gleby;” (art. 4 ppkt 22 Ustawy z dnia 21 marca 1985 r. o drogach publicznych).

¹¹⁰ Korzyści wynikające z zacieniającej roli drzew w przestrzeni miasta zostały przedstawione w rozdziale drugim tej pracy.

¹¹¹ W badaniach przeprowadzonych w Atenach ocienianie terenu przez drzewa przyuliczne przyczyniło się do obniżenia zapotrzebowania na energię potrzebną do ochładzania wnętrza w sąsiadujących budynkach o 2,6% do 8,6%, a w czasie godzin szczytu do 9,7% (Tsiros, 2010 za: Szczepanowska i Sitarski, 2015).

¹¹² Drzewa przyuliczne są skuteczniejsze w ograniczaniu zasięgu miejskiej wyspy ciepła niż malowanie dachów na biało lub pokrywanie ich roślinnością (Rozenzweig i in., 2006 za: Szczepanowska i Sitarski, 2015).

dni drzewa rosnące wzdłuż chodników pozwalają ludziom schronić się przed bezpośrednim promieniowaniem słonecznym (fot. 21-24) oraz pozytywnie oddziałują na ich odczucia termiczne (Armson, 2012).



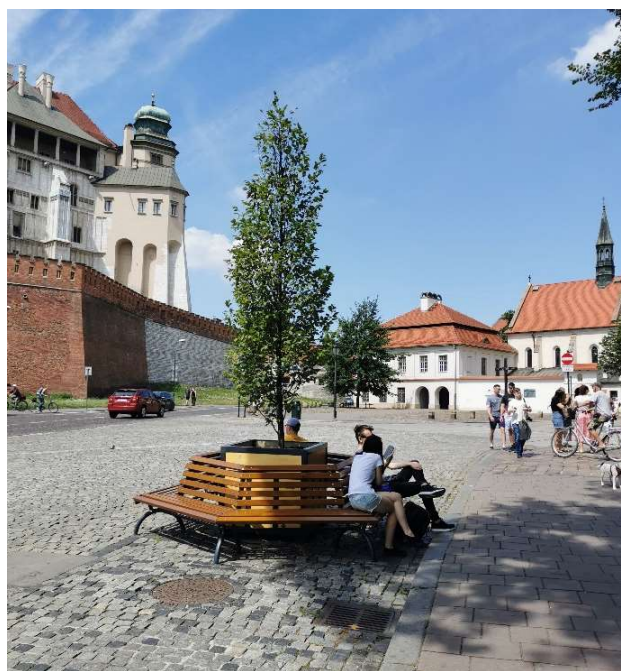
Fot. 21



Fot. 22



Fot. 23



Fot. 24

Fot. 21. Drzewa zaciężające chodnik
Źródło: Fot. J. Janiak, 2020 r.

Fot. 22-24. Odpoczynek w cieniu drzewa
Źródło: Fot. J. Janiak, 2020 r.

Ponadto zacienienie przez drzewa asfaltowych nawierzchni ulicy skutkuje blisko dwukrotnym zmniejszeniem częstotliwości ich napraw, co prowadzi do zmniejszenia wydatków o 7,20 USD na m² jezdni w porównaniu do powierzchni wyeksponowanych na słońce (McPherson i Muchnick, 2005). Z kolei osłona przed promieniowaniem słonecznym samochodów zaparkowanych pod koronami drzew wpływa na redukcję emisji zanieczyszczeń powodowanych przez te pojazdy do 16% (Peper i in., 2007 za: Szczepanowska, 2014). Obecność drzew jako elementów zacieniających wzdłuż dróg może również zwiększyć bezpieczeństwo jazdy, m.in. poprzez ochronę kierowców przed zjawiskiem olśnienia światłem słonecznym (Abdel-Aziz, 2014) czy dzięki oddziaływaniu psychologicznemu (Breloer, 2001 za: Szczepanowska, 2014: 12).

Drzewa uliczne mogą pełnić również rolę wiatroizolacji, zwłaszcza na terenach o niskiej gęstości zabudowy (McPherson i Rowntree, 1993; Szczepanowska, 2014). Zieleń wysoka w ulicy może ograniczać średnią prędkość wiatru nawet o połowę¹¹³, przyczyniając się do poprawy komfortu termicznego pieszych w chłodne dni lub do oszczędności energii na ogrzewanie budynków. Według Heislera (1977) rząd dziesięciu drzew liściastych usytuowanych przed północą elewacją może obniżyć zapotrzebowanie na energię do ogrzewania budynku o 10% do 25%. Jednak nieodpowiednio dobrane i zlokalizowane zadrzewienia w przestrzeni ulicy mogą przyczynić się do wzrostu intensywności turbulencji wiatru oraz do pogorszenia komfortu termicznego ludzi¹¹⁴, zwłaszcza w okresie letnim.

Drzewa w ulicach mogą chronić również przed opadami atmosferycznymi¹¹⁵ oraz przed zagrożeniami z nimi związanymi, jak np. powodzią. Coraz częściej zieleń, w tym zadrzewienia, są wykorzystywane w gospodarowaniu wodami opadowymi, co pozwala m.in. na zmniejszenie kosztów związanych z budową czy eksploatacją infrastruktury technicznej¹¹⁶. Drzewa mogą przechwytywać wodę deszczową przed spłynięciem do kanału deszczowego, tym samym wspomagając kanalizację miejską w czasie intensywnych opadów. Jak podaje profesor Szczepanowska¹¹⁷, jedno drzewo przyuliczne w ciągu roku może spowolnić lub zatrzymać od 2,0 m³ do 5,7 m³ wód opadowych. Ponadto woda deszczowa zwiększa zasoby wód gruntowych (Kosmala, 2005). Drzewa wzdłuż arterii komunikacyjnych, głównie poza terenami miasta, stanowią także osłonę przed śniegiem nawiewanym na drogi.

¹¹³ Według badań, które przeprowadzili Kong i in. (2017), obecność czterech drzew przyulicznych obniżyła prędkość wiatru maksymalnie o 51%.

¹¹⁴ Ograniczenie prędkości wiatru przez zieleń może prowadzić do zwiększenia stresu termicznego w okresach i miejscach o intensywnym nasłonecznieniu (Kong i in., 2017).

¹¹⁵ Duże drzewo w obrębie korony może zmagazynować średnio 228-455 litrów wody w zależności od swej budowy, parametrów ulistnienia oraz warunków klimatycznych (Xiao, 2000 za: Szczepanowska, b.d.).

¹¹⁶ Drzewa w Santa Monica w Kalifornii przechwyciły 1,6% rocznych opadów, oszczędzając 110 890 USD kosztów związanych z ochroną przeciwpowodziową (Xiao i McPherson, 2002 za: Rosłon-Szeryńska, 2019).

¹¹⁷ Źródło: Szczepanowska, b.d.



Drzewa przyuliczne mogą pełnić także rolę izolacji akustycznej (Czerwieniec i Lewińska, 2000; Zimny, 2005; Łukasiewicz i Łukasiewicz, 2016; Fortuna-Antoszkiewicz, 2019). Przyjmuje się, że odpowiednio zlokalizowana zieleń tłumi średnio 0,4-0,2 dB na jeden metr szerokości pasa zieleni (Łukasiewicz i Łukasiewicz, 2016). Stąd w celu wykorzystania zadrzewień do ochrony przed hałasem należy zapewnić odpowiednią szerokość pasa zieleni w ulicy¹¹⁸, co w niektórych przypadkach może okazać się niemożliwe do uzyskania, np. w wąskich modelach ulic. Przy czym, jak zauważa Szczepanowska (2010), rośliny, w tym drzewa, wielokrotnie pochłaniają i rozpraszają energię akustyczną, dzięki czemu przyczyniają się do zmniejszenia dokuczliwości hałasu pomimo niedużego obniżenia jego poziomu.

Ważną funkcją drzew przyulicznych jest ich rola regulacyjna związana z sekwestracją CO₂¹¹⁹, absorpcją i przechwytywaniem zanieczyszczeń gazowych i pyłowych oraz produkcją tlenu¹²⁰. Obecność drzew w ulicach miejskich jest szczególnie pożądana z uwagi na koncentrację i wysoki poziom zanieczyszczenia powietrza na tych obszarach. W miejscach silnie zanieczyszczonych drzewa mogą usunąć nawet cztery razy więcej zanieczyszczeń niż tam, gdzie jest czyste powietrze (Szczepanowska, 2010). W ciągu roku jedno drzewo przyuliczne zmniejszyło netto od 45 kg do 154 kg CO₂ w wyniku sekwestracji oraz wpływu na ograniczenie jego emisji¹²¹, ponadto oczyściło powietrze z 0,9 kg do 1,3 kg zanieczyszczeń pyłowych i gazowych (Szczepanowska, 2010). Jednak niewłaściwie dobrane i usytuowane zadrzewienia w ulicy mogą przyczynić się do zwiększenia koncentracji zanieczyszczeń powietrza z uwagi na wpływ na obniżenie przepływu powietrza i wzrost intensywności turbulencji wiatru (Badach i in., 2020). Nasadzenie drzew wzdłuż arterii komunikacyjnej wpływa również na jakość wody, która dzięki powolnej infiltracji, przenikaniu i filtracji jest oczyszczana m.in. z metali ciężkich. Co więcej, zadrzewienia uliczne stabilizują i chronią glebę przed erozją.

Kolejna ważna funkcja drzew przyulicznych związana jest z ich walorami estetycznymi. Drzewa w przestrzeni ulicy są częścią wizerunku miasta, uatrakcyjniamy ciągi komunikacyjne. Zieleń wysoka to element o bogatym wyrazie plastycznym, na który wpływa m.in. pokrój, a także kształt, kolor i gęstość ulistnienia. Drzewa o dużych ciemnych liściach o koronie ze zwartym ulistnieniem odznaczają się masywną sylwetą, z kolei te o liściach drobnych i rosnących rzadko sprawiają wrażenie lekkich i przezroczystych (Ptaszycka, 1950). Ponadto drzewa charakteryzują się zmiennością barw w zależności od pory roku, tworząc piękne, kolorowe kompozycje jesienią, a o nasyconych odcieniach zieleni – wiosną (fot. 25 i 26). Wyraz plastyczny drzewom nadaje także struktura zewnętrzna, tzw. faktura. W przypadku

¹¹⁸ Przykładowo, aby zmniejszyć hałas o 10 dB, wymagana szerokość pasa zieleni to 15 m o wysokości 5 m (Łukasiewicz i Łukasiewicz, 2016).

¹¹⁹ W Nowym Jorku średnia roczna sekwestracja CO₂ przez jedno duże drzewo przyuliczne wyniosła 116 kg, przez drzewo średnie – 48 kg, a małe – 10 kg (Peper i in., 2007 za: Szczepanowska i Sitarski, 2015).

¹²⁰ Zdrowe drzewo o wysokości 10 m produkuje średnio około 118 kg tlenu rocznie, podczas gdy człowiek przeciętnie zużywa 175 kg netto tlenu w ciągu roku (Szczepanowska, 2010).

¹²¹ Źródło: Szczepanowska, b.d.

kory pnia i gałęzi wyróżnia się fakturę: brzdową, łuskowatą, gładką i włóknistą (Ptaszycka, 1950). Faktura wpływa na światłocień zadrzewienia, tj. te o gładkiej fakturze kory cechuje miękki układ światłocienia w przeciwieństwie do drzew, których kora ma fakturę brzdową, łuskowatą czy włóknistą, gdzie światłocień układa się w ostrych zarysach. Bogactwo cech plastycznych zieleni wysokiej pozwala kształtować atrakcyjne wizualnie kompozycje o różnych formach. Zadrzewienia można zastosować pojedynczo lub w grupach jako aleje, szpalery, kulisy, parawany czy nieregularne skupiska.



Fot. 25



Fot. 26

Fot. 25. Drzewa uliczne o różnym pokroju i barwie ulistnienia jako elementy uatrakcyjniające ciągi komunikacyjne
 Źródło: *Drzewa uliczne 1: problem i rozwiązanie*, <https://www.aces.edu/blog/topics/landscaping/street-trees-the-problem-and-the-solution/> (dostęp: 24.08.2020).

Fot. 26. Barwne drzewa uliczne w porze jesiennej

Źródło: <http://www.stadsbelangendelft.nl/wp-content/uploads/2018/03/5.jpg> (dostęp: 24.08.2020).

Zieleń wysoka wzdłuż traktów komunikacyjnych może również stanowić ważny element kompozycji urbanistycznej. Zadrzewienia uliczne mogą tworzyć linie i płaszczyzny prowadzące, które podkreślą rangę drogi, jak i samego obiektu zlokalizowanego na jej końcu (fot. 27).



Fot. 27



Fot. 28

Fot. 27. Aleja Pól Elizejskich, Paryż

Źródło: *Champs Elysées*, myhomeinparis.com/Champs-Elysees (dostęp: 24.08.2020).

Fot. 28. Aleja Najświętszej Maryi Panny w Częstochowie

Źródło: *Santuario di Częstochowa*, travel.sygic.com/it/poi/santuario-di-czestochowa-poi:10927 (dostęp: 24.08.2020).

Aleje i szpalery drzew wraz z umieszczonymi w punktach ich zbiegu dominantami mogą tworzyć interesujące i dynamiczne układy przestrzenne w mieście (fot. 28). Kompozycja drzew przyulicznych stanowi część otaczającego krajobrazu i może stanowić ramy dla architektury budynków. W układach osiowych tras komunikacyjnych rytmicznie rozstawione drzewa o podobnym pokroju mogą podkreślać rytm architektury, ale także wprowadzać ujednolicenie przy zróżnicowanej zabudowie (fot. 29) (Szopińska i Zygmunt-Rubaszek, 2010). Z kolei wprowadzenie swobodnego układu zieleni wzdłuż jednorodnych elementów tworzących linię zabudowy ulicy nadaje kompozycji większy dynamizm (fot. 30) (Szopińska i Zygmunt-Rubaszek, 2010).



Fot. 29



Fot. 30

Fot. 29. Drzewa na ulicy Tumskiej w Płocku
Źródło: Fot. J. Janiak, 2020 r.

Fot. 30. Aleja drzew w ulicy Lomanstraat w Amsterdamie
Źródło: pl.pinterest.com/pin/29695678768527394/ (dostęp: 24.08.2020)

3.2.2. Lokalizacja drzew w ulicy miejskiej. Uwarunkowania współczesne

W klasyfikacji zieleni tras komunikacyjnych można wyróżnić dwie grupy siedlisk (Szopińska i Zygmunt-Rubaszek, 2010):

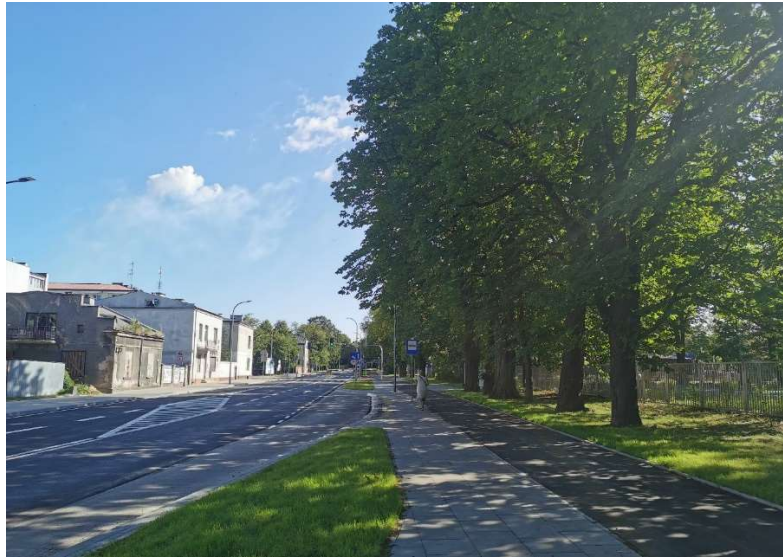
- drzewa, które zajmują niewielki teren zlokalizowany między jezdnią a chodnikiem (fot. 31),
- pasy zieleni przyulicznej wzdłuż granicy pasa drogowego (fot. 32).

Z kolei zadrzewienia uliczne mogą występować w postaci nasadzenia (Borowski i in., 2016):

- dwurzędowego, po jednym rzędzie z każdej strony ulicy (fot. 33),
- jednorzędowego jako jeden rząd zieleni zlokalizowany po jednej stronie wąskiej ulicy (fot. 34) lub w pasie rozdzielającym dwie jezdnie (fot. 35).



Fot. 31



Fot. 32

Fot. 31. Drzewa przyuliczne zlokalizowane między jezdnią a chodnikiem
Źródło: Fot. J. Janiak, 2020 r.

Fot. 32. Drzewa przyuliczne wzdłuż granicy pasa drogowego
Źródło: Fot. J. Janiak, 2020 r.



Fot. 33



Fot. 34

Fot. 33. Rząd drzew po obu stronach ulicy
Źródło: Fot. J. Janiak, 2020 r.

Fot. 34. Ulica z drzewami tylko po jednej stronie
Źródło: Fot. J. Janiak, 2019 r.



Fot. 35. Drzewa w pasie zieleni rozdzielającym jezdnie
Źródło: Fot. J. Janiak, 2020 r.

Na lokalizację drzew w przestrzeni ulicy wpływ mają:

- klasa, funkcja i parametry danej ulicy,
- obowiązujące akty prawne dotyczące zasad projektowania zieleni w pasie drogowym,
- rozmieszczenie infrastruktury technicznej,
- wymagania danego gatunku¹²²,
- przeznaczenie zieleni.

Przeznaczenie i funkcje dróg oraz związane z drogą parametry¹²³ (m.in. liczba i szerokość pasów ruchu), obecność torowisk dla pojazdów szynowych czy ścieżek dla rowerzystów, wpływają na dostępność terenu, miejsce oraz wybór nasadzeń zieleni wysokiej w liniach rozgraniczających ulicy.

Drzewa przyuliczne nie mogą ograniczać kierowcom widoczności, a ich usytuowanie powinno uwzględniać podziemną i nadziemną infrastrukturę techniczną. Lokalizacja zieleni wysokiej w pasie drogowym regulowana jest przez odpowiednie przepisy prawne. Najważniejszym aktem prawnym jest Rozporządzenie Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej z dnia 2 marca 1999 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać drogi publiczne i ich usytuowanie (Dz.U. z dnia 14 maja 1999 r.). Zgodnie z tymi przepisami (rozdział 11, § 53) należy:

- zachować minimalną odległość od pnia drzewa do krawędzi jezdni wynoszącą 3 metry (ustęp 3),

¹²² Wymagania klimatyczno-glebowe, m.in. preferowana ekspozycja na słońce (stoiska słoneczne, półcieniste, cieniste).

¹²³ Parametry dróg w zależności od ich przeznaczenia i funkcji przedstawione są w Rozporządzeniu Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać drogi publiczne i ich usytuowanie (Dz.U. z 2016 r. poz. 124).

- w przypadku nasadzeń drzew zapewnić pas zieleni o szerokości co najmniej 3 metrów¹²⁴ (ustęp 1).

Ponadto przy lokalizacji drzew w ulicy należy uwzględnić, by żadne części roślin nie znajdowały się w tzw. skrajni drogi (rozdział 12, § 54 ustęp 2), tj. wolnej przestrzeni nad drogą o wysokości:

- 4,70 m dla drogi klasy A, S, Gp¹²⁵,
- 4,60 m dla drogi klasy G lub Z,
- 4,50 m dla drogi klasy L lub D.

Wysokość skrajni drogi może być zmniejszona do (rozdział 12, § 54 ustęp 3):

- 4,50 m – jeżeli droga klasy A, S lub Gp jest przebudowywana albo remontowana, natomiast obiekty nad tymi drogami nie są objęte robotami,
- 4,20 m – jeżeli droga klasy G lub Z jest przebudowywana albo remontowana, natomiast obiekty nad tymi drogami nie są objęte robotami,
- 3,50 m nad drogą klasy L lub D za zgodą zarządcy tych dróg.

Dla chodnika lub ścieżki rowerowej należy zapewnić wolną przestrzeń o minimalnej wysokości 2,50 m lub 2,20 m w przypadku ich przebudowy albo remontu (rozdział 12, § 54 ustęp 4).

Przy wykorzystaniu drzew do zacieniania elewacji budynków w przestrzeni ulicy należy zadbać również o widoczność na skrzyżowaniach i zjazdach (Załącznik nr 2 „Warunki widoczności na skrzyżowaniach i zjazdach” przywołanego rozporządzenia).

Usytuowanie drzew w przestrzeni ulicy wymaga zachowania minimalnych odległości od urządzeń infrastruktury technicznej, które mogą znajdować się w pasie drogowym¹²⁶. Poniżej przedstawiono obowiązujące minimalne odległości sadzenia drzew od sieci uzbrojenia podziemnego i nadziemnego wraz z przywołaną podstawą prawną (tab. 23) (Szopińska i Zygmunt-Rubaszek, 2010).

¹²⁴ Odstępstwo uzyskuje się w przypadku usytuowania drzew na drodze istniejącej modernizowanej (Rozporządzenie Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej z dnia 2 marca 1999 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać drogi publiczne i ich usytuowanie).

¹²⁵ Symbole oznaczające klasę dróg: A – autostrady, S – ekspresowe, Gp – główna ruchu przyspieszonego, G – główna, Z – zbiorcza, L – lokalna i D – dojazdowa (§ 4 Rozporządzenia Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej z dnia 2 marca 1999 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać drogi publiczne i ich usytuowanie (Dz.U. z dnia 14 maja 1999 r.)).

¹²⁶ Przy sadzeniu drzew w ulicy z obawy przed potencjalnym uszkodzeniem elementów czy urządzeń podziemnych można zastosować mechaniczne bariery, aby ukierunkować wzrost korzeni i osłonić np. instalacje podziemne.

Tabela 23. Minimalne odległości drzew od sieci uzbrojenia podziemnego i nadziemnego

Dział	Sieć uzbrojenia podziemnego i nadziemnego	Minimalne odległości drzew [m]	Podstawa prawna
Wodociągi	sieć wodociągowa	2,0* od środka drzewa do skrajni przewodu sieci wodociągowej	wycofana norma PN-B-10725:1997 Wodociągi – Przewody zewnętrzne – Wymagania i badania
Kanalizacja	sieć kanalizacyjna	2,0	dawne krajowe uregulowanie
Ciepłownictwo	sieć ciepłownicza	2,0 od rzutu korony	dawne krajowe uregulowanie
Gazownictwo – gazociągi	niskiego ciśnienia – do 100 mm	1,0 – odległość od pnia	Rozporządzenie Ministra Przemysłu i Handlu z dnia 14 listopada 1995 r. (Dz.U. z 1995 r. Nr 139 poz. 686)
Telekomunikacja	kable ziemne	2,0 – odległość od pnia	Rozporządzenie Ministra Łączności z dnia 12 marca 1997 r. (MP Nr 13, poz.95, zm. MP Nr 32, poz. 373 z 1995 r.)
Elektro-energetyka	kable do 1 kV kable pow. 1kV	1,5 – odległość od pnia 1,5 – odległość od pnia	PN-76/E-05125
	napowietrzna linia do 1 kV napowietrzna linia do 1-30 kV napowietrzna linia 31-220 kV napowietrzna linia 221-750 kV	1,0 – odległość od korony 2,7 – odległość od korony 4,0 – odległość od korony 7,5 – odległość od korony	PN-76/E-05100 pkt 23.2

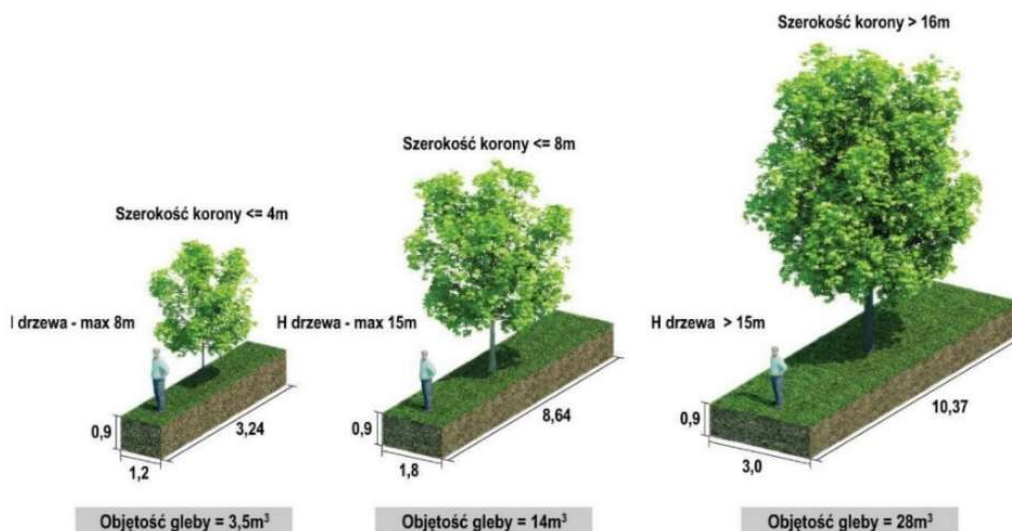
* Dla pomników przyrody minimum 15 m.

Źródło: Opracowanie na podstawie: Szopińska i Zygmunt-Rubaszek (2010), Borowski i in. (2016).

Przy lokalizacji zieleni wysokiej jako elementu zacieniającego elewacje należy uwzględnić również przepisy dotyczące dróg pożarowych do budynków, które reguluje Rozporządzenie Ministra Spraw Wewnętrznych i Administracji z dnia 24 lipca 2009 r. w sprawie przeciwpożarowego zaopatrzenia w wodę oraz dróg pożarowych. W świetle tych przepisów (Dz. U. z 2002 Nr 147 poz. 1229, z późn.zm., § 12 ustęp 2) pomiędzy drogą pożarową a ścianą budynku nie mogą występować stałe elementy zagospodarowania terenu, drzewa i krzewy o wysokości przekraczającej 3 m uniemożliwiające dostęp do elewacji budynku za pomocą podnośników i drabin mechanicznych. Wymaganie to nie odnosi się do budynku o nie więcej niż trzech kondygnacjach nadziemnych i wysokości nie większej niż 12 m (§ 12 ustęp 7).

Wpływ na rozplanowanie zadrzewień w miejskiej przestrzeni przyulicznej może mieć także zapis dotyczący wymagań przeciwpożarowych dla palenisk i instalacji zawarty w Rozporządzeniu Ministra Infrastruktury w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie z dnia 12 kwietnia 2002 r. (t.j. Dz. U. z 2019 poz. 1065; § 266 ustęp 4). Mowa w nim o zachowaniu minimalnej odległości między wylotem przewodu spalinowego i dymowego a najbliższym skrajem korony drzew dorosłych równej 6 m.

Przy usytuowaniu drzew jako elementów zacieniających pierzeje ulicy konieczne jest zachowanie nie tylko właściwej odległości od zabudowy czy elementów infrastruktury miejskiej wynikającej z obowiązujących aktów prawnych, ale również uwzględnienie wymagań roślin potrzebnych do ich rozwoju. Wyzwaniem przy lokalizacji zieleni wysokiej w przestrzeni ulicy jest zapewnienie odpowiedniej ilości terenu z uwagi na ograniczone warunki przestrzenne, m.in. przez obecność infrastruktury podziemnej czy dużej powierzchni utwardzonej¹²⁷. Poniżej przedstawiono przykładowe wytyczne odnośnie do minimalnej powierzchni i objętości gruntu dla drzew przyulicznych przygotowane w ramach opracowania dotyczącego standardów kształtowania zieleni wysokiej miejskich tras komunikacyjnych dla Wrocławia (rys. 20) (Szopińska i Zygmunt-Rubaszek, 2010).



Rysunek 20. Wytyczne odnośnie do minimalnej powierzchni terenu i objętości gruntu w zależności od parametrów drzewa

Źródło: Szopińska i Zygmunt-Rubaszek (2010: 22).

Wraz z rozwojem i modernizacją infrastruktury drogowej na zlecenie niektórych władarzy miast (np. Warszawa, Wrocław, Kraków) powstają opracowania zawierające modelowe rozwiązania w zakresie kształtowania zieleni miejskiej, w tym lokalizacji drzew wzdłuż tras komunikacyjnych, uwzględniające powyżej przedstawione uwarunkowania, m.in. autorstwa Szopińskiej i Zygmunt-Rubaszek (2010), Murasa (2016), Borowskiego i in. (2016). Prace te przedstawiają zasady dotyczące m.in. projektowania, doboru gatunków czy pielęgnacji nasadzeń ulicznych, które pozwolą na korzystanie z usług ekosystemowych zieleni we współczesnym mieście w dłuższym horyzoncie czasowym.

¹²⁷ Jednym z rozwiązań w przypadku ograniczonego dostępu terenu jest zastosowanie „ścieżek dla korzeni”, które pozwalają na przejście elementów systemu korzeniowego pod chodnikiem do większych powierzchni gruntu znajdujących się w pobliżu (Szopińska i Zygmunt-Rubaszek, 2010).

Poniżej przedstawiono warianty zadrzewień wybranych modeli ulic opracowanych w ramach programu ochrony środowiska dla m.st. Warszawy na lata 2017-2020 z perspektywą do 2023 r. (Borowski i in., 2016). Przywołane schematy (rys. 21-27) prezentują rozplanowanie drzew w trzech modelach ulic, które w praktyce są obsadzone roślinami w mieście, tj.:

- **model I** – dla ulic do 15 m szerokości w liniach rozgraniczających, drogi lokalne i dojazdowe,
- **model II** – dla ulic o średniej szerokości, tj. od 15 m do 30 m w liniach rozgraniczających, drogi zbiorcze i główne jednojezdniowe,
- **model III** – dla ulic o szerokości w liniach rozgraniczających ponad 30 m, drogi główne, główne przyspieszone dwujezdniowe z pasem środkowym.

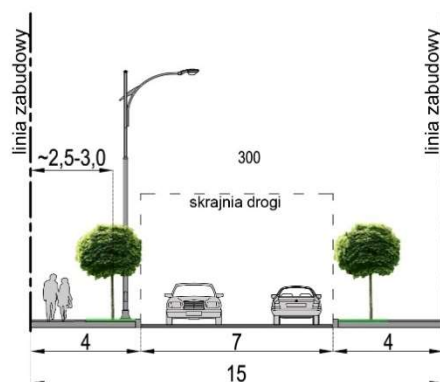
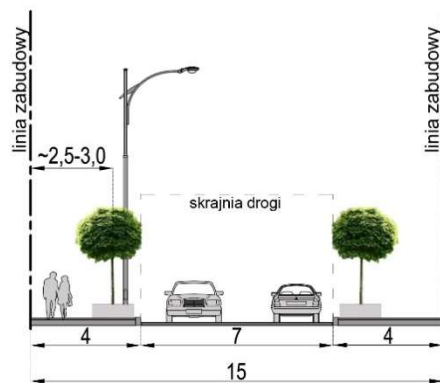
Schematy zostały uzupełnione o informacje odnośnie do przybliżonych odległości drzew od zabudowy. Propozycje lokalizacji zieleni zostały oparte na obowiązujących przepisach sytuowania drzew w pasie drogowym oraz na wytycznych w zakresie szerokości pasa zieleni, minimalnych powierzchni wymaganych dla drzew i odległości roślin od chodnika lub ściany (na podstawie: Szopińska i Zygmunt-Rubaszek, 2010). W poniższych modelach nie uwzględniono rozmieszczenia sieci podziemnej.

W ulicach do 15 m w liniach rozgraniczających wskazany jest wybór małych drzew o wąskim pokroju o wysokości:

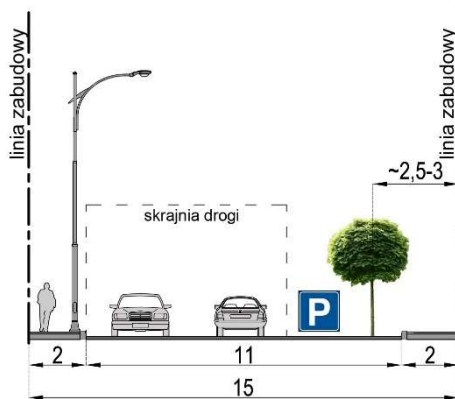
- od 3,0 m do 5,0 m, o średnicy korony 1,0–3,0 m,
- od 8,0 m do 10,0 m, o niewielkiej koronie – do 5,0 m średnicy.

W tym modelu drzewa mogą być usytuowane wzdłuż jezdni w odległości około 2,5 m do 3,0 m od zabudowy, oddzielając strefę pieszych od pasów ruchu. Ulica może być obsadzona zielenią obustronnie (rys. 21) lub w przypadku wydzielenia miejsc parkingowych po jednej stronie – między miejscami postojowymi (rys. 22). W zależności od dostępności gruntu rodzimego drzewa mogą być nasadzone w pojemnikach, misach chodnikowych lub na wąskich pasach zieleni wzdłuż jezdni.

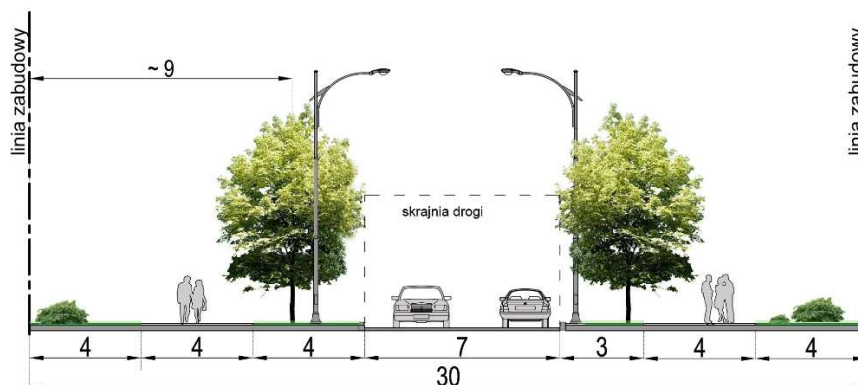
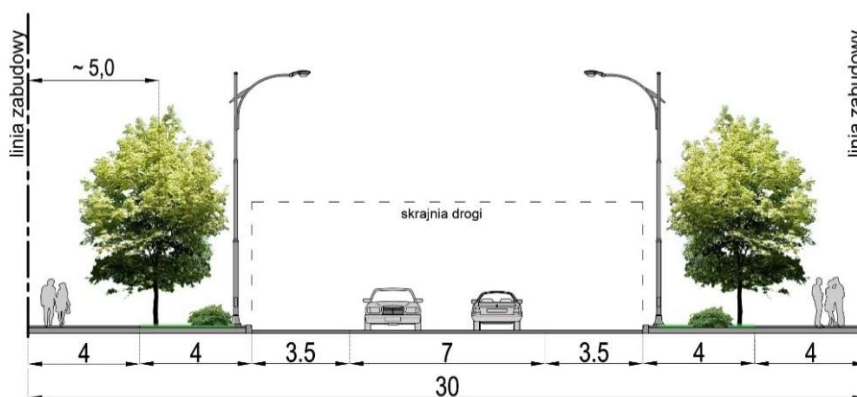
Do obsadzeń zielenią ulic o średniej szerokości, tj. od 15 m do 30 m w liniach rozgraniczających, możliwe jest wykorzystanie drzew o wysokości do 15,0 m o szerokości korony do 8,0 m. Drzewa mogą zostać zlokalizowane w pasie zieleni wzdłuż jezdni z zachowaniem do 5 m odległości od zabudowy w przypadku, gdy oddzielają strefę pieszych od jezdni. Z kolei przy wygospodarowaniu terenu z niską roślinnością przy budynkach – zieleń wysoka może być oddalona o około 9 m od pierzei (rys. 23). Natomiast wykorzystanie małych drzew, o wysokości do 5,0 m, pozwala na ich nasadzenie w pasie zieleni przy ścianach pierzei z zachowaniem do około 3,5 m dystansu od zabudowy (rys. 24).



Rysunek 21. Lokalizacja drzew po obu stronach wąskiej ulicy w pojemnikach lub w wyznaczonym pasie zieleni
 Źródło: Opracowanie własne na podstawie: Borowski i Pstrągowska (2009).

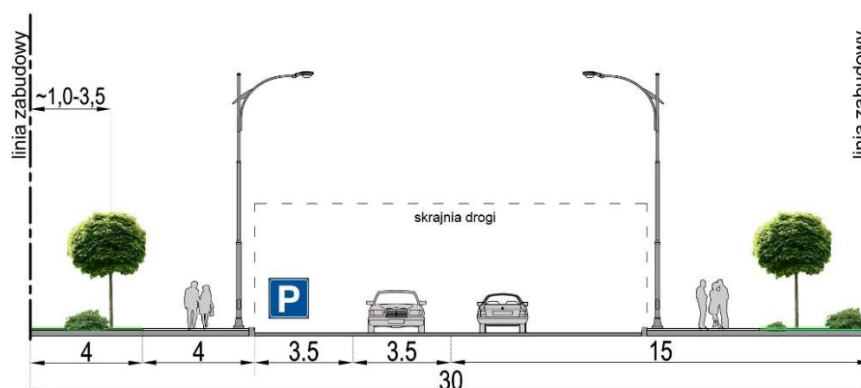


Rysunek 22. Lokalizacja drzew po jednej stronie wąskiej ulicy w misach chodnikowych między miejscami postojowymi
 Źródło: Opracowanie własne na podstawie: Borowski i Pstrągowska (2009).



Rysunek 23. Lokalizacja drzew w ulicy o średniej szerokości z obustronnymi nasadzeniami drzew średnich w pasach zieleni wzdłuż jezdni

Źródło: Opracowanie własne na podstawie: Borowski i Pstrągowska (2009).



Rysunek 24. Lokalizacja drzew w ulicy o średniej szerokości z obustronnymi nasadzeniami drzew małych w pasach zieleni wzdłuż zabudowy

Źródło: Opracowanie własne na podstawie: Borowski i Pstrągowska (2009).

Ulice o szerokości ponad 30 m w liniach rozgraniczających pozwalają na lokalizację w ich wnętrzu drzew dużych, o wysokości powyżej 15 m i średnicy korony powyżej 16 m. Ten model ulicy umożliwia wykorzystanie większej niż w poprzednich wariantach liczby zadrzewień zlokalizowanych wzdłuż jezdni, ścian budynków i w szerokich pasach zieleni rozdzielających jezdnie. Drzewa średnie (do 15 m wysokości) i duże (powyżej 15 m

wysokości) mogą zostać usytuowane w pasach zieleni rozdzielających jezdnie od torowiska tramwajowego. Nasadzenia drzew średnich można wykorzystać również do rozdzielania pasów jezdni i chodnika. W tym przypadku zieleni wysoka może być oddalona od zabudowy o około 7 m do 12 m. W tym modelu ulicy można także wprowadzić drzewa w pasie zieleni bezpośrednio wzdłuż elewacji. Przy wyborze drzew małych można zachować dystans między roślinami a zabudową wynoszący do około 4,5 m, a w przypadku drzew średnich – około 4,0 m do 9,0 m (rys. 25).

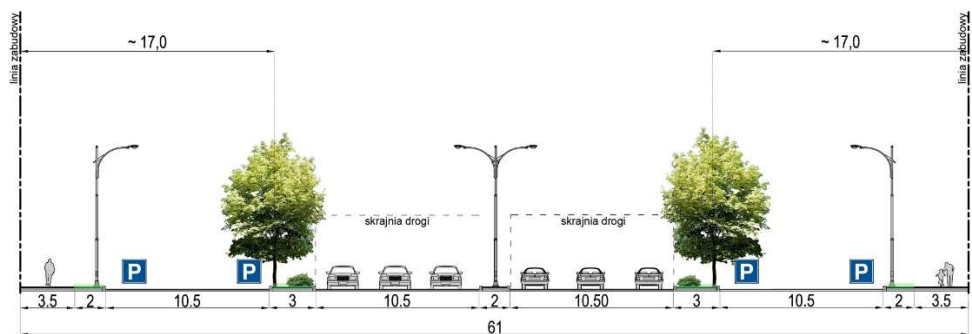
W modelu z bocznymi uliczkami parkingowymi zieleni wysoka oddalona o około 17 m od zabudowy może oddzielać pasy jezdni od miejsc postojowych. Natomiast przy zabudowie wskazane jest usytuowanie niskich roślin (rys. 26).

W przypadku ograniczonego dostępu do gruntu rodzimego drzewa mogą zostać usytuowane w strefie pieszych w misach chodnikowych (rys. 27). W tym układzie drzewa średnie mogą znajdować się w odległości około 4,0 m do 11,0 m od zabudowy, a duże od 8,0 m do 12,0 m.

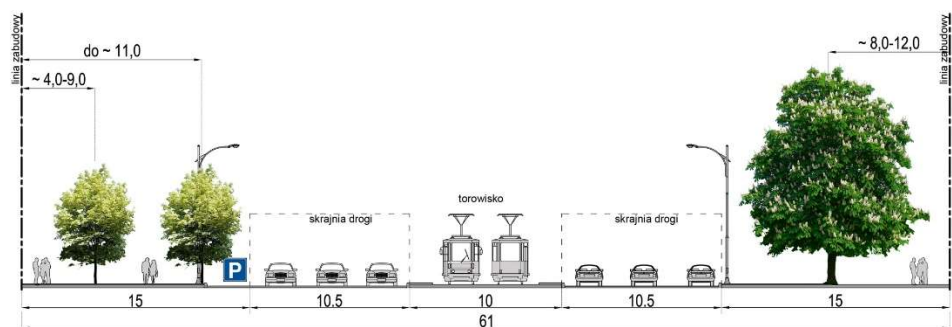


Rysunek 25. Lokalizacja drzew w ulicy o szerokości ponad 30 m w liniach rozgraniczających. W licznych pasach zieleni rozdzielających m.in. jezdnie i torowisko możliwość nasadzeń drzew dużych i średnich

Źródło: Opracowanie własne na podstawie Borowski i Pstrągowska (2009).



Rysunek 26. Lokalizacja drzew w ulicy o szerokości ponad 30 m w liniach rozgraniczających. Zielen wysoka w pasach zieleni rozdzielających boczne uliczki parkingowe od jezdni
 Źródło: Opracowanie własne na podstawie: Borowski i Pstrągowska (2009).



Rysunek 27. Lokalizacja drzew w ulicy o szerokości ponad 30 m w liniach rozgraniczających z ograniczonym dostępem do gruntu rodzimego z drzewami sadzonymi w misach chodnikowych
 Źródło: Opracowanie własne na podstawie Borowski i Pstrągowska (2009).

Rozdział 4. Założenia i metoda badawcza

4.1. Metoda badań nad stopniem zacieniania elewacji budynków przez drzewa w przestrzeni ulicy

Na potrzeby niniejszej pracy opracowano metodę, która pozwala zbadać możliwości zacinające drzew wykorzystanych do ochrony przeciwsłonecznej elewacji budynków tworzących pierzeję ulicy przy różnych¹²⁸:

- relacjach geometrycznych pomiędzy zielenią a osłanianą fasadą,
- orientacjach rozpatrywanego układu względem stron świata,
- profilach ulicy (H/W).

Zaproponowana metoda pozwala określić, kiedy dana zieleń może pełnić rolę osłony dla elewacji przed bezpośrednim promieniowaniem słonecznym oraz ocenić jej skuteczność jako elementu zacinającego. Ocena została oparta na analizie trzech kluczowych parametrów dotyczących zacieniania, tj.:

- powierzchni [m²], w tym procentowego udziału powierzchni zacienienia do powierzchni elewacji [%],
- czasu trwania [h],
- zasięgu [m], tj. wysokości obszaru zacienionego powyżej terenu.

Za skuteczne elementy zacinające¹²⁹ uznano te rozwiązania roślinno-architektoniczne, które:

- mogą zapewnić ochronę przeciwsłoneczną dla elewacji przez co najmniej połowę ekspozycji słonecznej pierzei w badanym czasie,
- mogą zapewnić ochronę przeciwsłoneczną dla co najmniej 50% powierzchni ścian parteru¹³⁰.

W literaturze przedmiotu badania, w których zastosowano metodę symulacji komputerowej z udziałem modelu drzew, dotyczą przede wszystkim wpływu zacieniania budynku przez zieleń na zużycie energii do klimatyzacji lub ogrzewania pomieszczeń. W tych pracach wykorzystano różnego rodzaju oprogramowanie, np. Hwang i in. (2016) bazowali na EnergyPlus (wersja 8, US, Departament Energii, Waszyngton, DC). Z kolei w badaniach nad metodą modelowania zacieniania przez zieleń wysoką oraz oceną jej wpływu na zużycie energii w budynku (Hes i in., 2011) zastosowano oprogramowanie Virtual Environment firmy

¹²⁸ Wybrane parametry pojawiają się w badaniach dotyczących kanionu ulicy, np. w pracy Ali-Toudert i Mayera (2005).

¹²⁹ W odniesieniu do wybranej do badań zieleni, tj. 20-25-letnich klonów jawor o przedstawionych w pracy parametrach.

¹³⁰ Zdaniem Pandita i Labanda (2010) zużycie energii elektrycznej w budynku zacienionym w 50% przez drzewa w ciągu dnia jest mniejsze o ponad 14% w porównaniu do tego samego budynku w pełnym słońcu. Średnio każde 10% zacienionej powierzchni wpływa na zmniejszenie średniego dziennego zużycia energii elektrycznej na klimatyzowanie pomieszczeń o 2%.

Integrated Environmental Solutions (IES-VE)¹³¹. Natomiast w pracy Simpsona i McPhersona (1996) użyto programu Shadow Pattern Simulator (SPS), który pozwala na obliczenie cienia drzew dla każdej ściany i powierzchni dachu dla godzinowego przedziału czasu¹³². Wykorzystane metody cechuje różny poziom trudności obsługi oprogramowania, poza tym przeznaczono je do badań nad zużyciem energii elektrycznej w pojedynczych budynkach wolnostojących¹³³, a nie do szybkich analiz zacieniania w układach urbanistycznych.

W opracowanej metodzie do oceny roślinnych elementów zacieniających w przestrzeni danej ulicy wykorzystano numeryczne analizy symulacyjne wykonane w programie Rhinoceros® (Rhino)¹³⁴. Wybrany program jest powszechnie dostępny, a wykorzystana w pracy wersja 6 ma wbudowany graficzny edytor algorytmów – Grasshopper®, który umożliwia modelowanie parametryczne bez konieczności używania języków oprogramowania. Dzięki temu narzędzie jest przystępne w obsłudze i w łatwy sposób może być zastosowane w procesie projektowania architektonicznego i urbanistycznego.

Do przeprowadzenia symulacji wykorzystano wtyczkę środowiskową Ladybug przeznaczoną dla programu Rhino/Grasshopper¹³⁵. Ladybug to pomocne narzędzie dla projektantów do sporządzania różnego rodzaju analiz środowiskowych, m.in.: natężenia promieniowania słonecznego, nasłonecznienia czy zacienienia (Roudsari i in., 2013). Wtyczka ta korzysta z plików pogodowych EnergyPlus (EPW), a także ze sprawdzonych silników do modelowania energii w budynku – EnergyPlus oraz oprogramowania Radiance i opartego na nim programu do analizy światła dziennego Daysim.

W badaniach zastosowano istniejący w programie komponent godzin nasłonecznienia – Sunlight Hours Analysis (SHA), który oblicza, ile godzin nasłonecznienia otrzymuje dany model zabudowy w zadanym czasie z uwzględnieniem różnych elementów zacieniających, jak np. sąsiadującej zabudowy czy zieleni itp. Symulacja może zostać przeprowadzona dla jednej konkretnej godziny we wskazanym dniu, jak i dla wybranego przedziału czasowego, np. godzinowego. Wizualizacja wyników analizy zacieniania przedstawiona jest na modelu za pomocą gradientu kolorów, w którym konkretny odcień odpowiada liczbie godzin nasłonecznienia, jaką otrzymuje badana geometria. W toku pracy narzędzie dostosowano i wykorzystano do obliczenia metrażu powierzchni [m²] elewacji zacienionej przez dany czas.

¹³¹ <https://www.iesve.com/software/virtual-environment> (dostęp: 01.04.2020).

¹³² Na podstawie rozmiarów budynku i zieleni wysokiej, ich orientacji oraz wzajemnej odległości (Simpson i McPherson, 1996).

¹³³ W tych pracach prezentowane wyniki nie przedstawiają metrażu powierzchni osłoniętych przed promieniowaniem słonecznym, a konkretne dane dotyczące np. zmniejszonego zużycia energii elektrycznej [kWh].

¹³⁴ Robert McNeel & Associates, Barcelona, Hiszpania.

¹³⁵ Program Rhino/Grasshopper pozwala na przeprowadzenie analizy zacienienia także za pomocą nakładki Heliotrope. Do badań wybrano jednak wtyczkę Ladybug, która oferuje większe możliwości w zakresie przeprowadzenia symulacji godzin nasłonecznienia.

4.2. Założenia badawcze

4.2.1. Zabudowa

Do badań wytypowano ulicę przystosowaną do ruchu kołowego o szerokości (W) 30 m o symetrycznym przekroju i zwartej linii zabudowy, którą tworzą budynki w układzie szeregowym¹³⁶. Wybrana szerokość w liniach rozgraniczających ulicę jest często spotykana w przestrzeni miejskiej (fot. 36) i pozwala na różne rozplanowanie w jej wnętrzu zieleni, w tym drzew. Ulicę o tych parametrach wytypowano również z uwagi na możliwe ryzyko długotrwałej ekspozycji słonecznej elewacji budynków.



Fot. 36. Widok na ulicę Świętojańską w Gdyni, która na fragmencie ma zbliżony profil do ulicy wybranej do badań
Źródło: Fot. J. Janiak, 2020 r.

W celu zbadania możliwości zacieniania pierzei przez drzewa w różnych warunkach insolacji zdecydowano się na:

- orientację układu wzdłuż osi północ–południe oraz wschód–zachód,
- analizę wariantów ulicy o różnych profilach, zwłaszcza tych płtykich, które są narażone na problemy związane z długotrwałą ekspozycją słoneczną powierzchni.

Na potrzeby badań wybrano pięć wariantów geometrii ulicy o różnych wartościach parametru H/W:

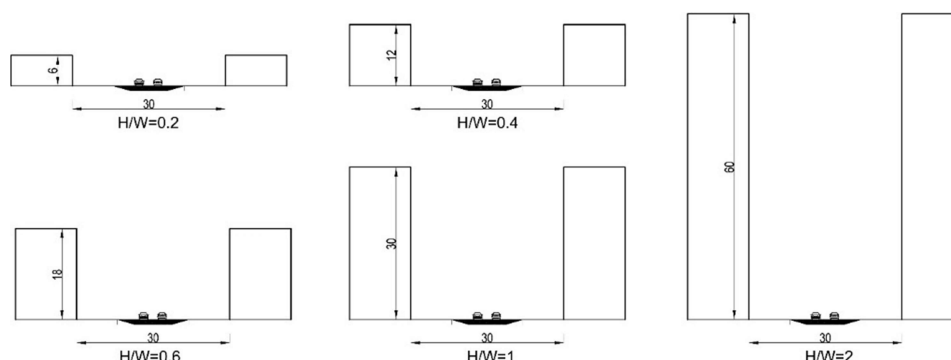
$$\mathbf{H/W = 0,2, H/W = 0,4, H/W = 0,6, H/W = 1 \text{ i } H/W = 2.}$$

Założono, że wysokość kondygnacji w budynkach wynosi 3 m, a liczba kondygnacji różni się w zależności od wersji modelu (rys. 28):

- dla H/W = 0,2 przyjęto zabudowę dwukondygnacyjną o wysokości (H) 6 m,
- dla H/W = 0,4 przyjęto zabudowę czterokondygnacyjną o wysokości (H) 12 m,

¹³⁶ Schemat rozplanowania wybranej ulicy przedstawiono w rozdziale trzecim pracy.

- dla $H/W = 0,6$ przyjęto zabudowę sześciokondygnacyjną o wysokości (H) 18 m,
- dla $H/W = 1,0$ przyjęto zabudowę dziesięciokondygnacyjną o wysokości (H) 30 m,
- dla $H/W = 2,0$ przyjęto zabudowę dwudziestokondygnacyjną o wysokości (H) 60 m.



Rysunek 28. Schematyczny przekrój wariantów wybranej do badań ulicy o różnych profilach, gdzie parametr H/W wynosi: 0,2; 0,4; 0,6; 1 i 2
Źródło: Opracowanie własne.

Do badań wybrano takie parametry H/W , które odpowiadają ulicom o przekroju:

- płytkim, dla $H/W \leq 0,6$ (fot. 37),
- głębokim, dla $H/W > 2$ (fot. 38),
- oraz o układzie równym, gdzie $H/W = 1$ ¹³⁷.

Przyjęte założenia odnośnie do geometrii modelu ulicy pozwalają zbadać możliwości wykorzystania drzew jako elementów ochrony przeciwsłonecznej budynków o różnej wysokości – od niskich¹³⁸ po wysokościowe oraz w różnych warunkach nasłonecznienia, na które owa zabudowa ma wpływ.



Fot. 37



Fot. 38

Fot. 37. Przykład ulicy o płytkim profilu, typowym dla zabudowy na przedmieściach miasta
Źródło: https://www.kone.com/en/Images/suburban_spraw11_tcm17-41954.jpg?v=1 (dostęp: 25.08.2020).

Fot. 38. Przykład ulicy o głębokim profilu, charakterystycznym dla terenów śródmieścia, zwłaszcza dużych miast
Źródło: *Urban canyon*, Wikipedia,
https://en.wikipedia.org/wiki/Urban_canyon#/media/File:42nd_Street_in_Tudor_City.jpg (dostęp: 25.08.2020).

¹³⁷ Według klasyfikacji przyjętej przez Shishegar (2013) przedstawionej w rozdziale trzecim niniejszej pracy.

¹³⁸ Przyjęto klasyfikację wysokości budynków na podstawie § 8 Rozporządzenia Ministra Infrastruktury z dnia 12 kwietnia 2002 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie.

4.2.2. Zieleń

Wybrano drzewa liściaste, które zapewniają ochronę w okresach intensywnego natężenia promieniowania słonecznego, jednocześnie znacznie nie ograniczając dostępu do energii słonecznej w sezonie grzewczym (Abdel-Aziz, 2014). Po konsultacji z architektami krajobrazu¹³⁹ oraz analizie literatury na potrzeby badań wytypowano klon jawor odmiana Rotterdam (*Acer pseudoplatanus* 'Rotterdam') – gatunek, który sprawdza się w środowisku silnie zurbanizowanym i jest powszechnie wykorzystywany do obsadzania ulic, parkingów czy zieleni osiedlowej w europejskich miastach¹⁴⁰ (www.e-katalogroslin.pl) (fot. 39). Parametry wytypowanej zieleni istotne z perspektywy prowadzonych badań przedstawiono w tabeli 24.



Fot. 39. Klon jawor „Rotterdam” (*Acer pseudoplatanus* 'Rotterdam')

Źródło: *Klon jawor*, www.sadowniczy.pl/product-pol-114617-Klon-jawor.html (dostęp: 25.08.2020).

Tabela 24. Charakterystyka wybranych parametrów wytypowanego do badań drzewa

Charakterystyka	Klon jawor „Rotterdam” (<i>Acer pseudoplatanus</i> 'Rotterdam')
Max. wysokość w warunkach miejskich [m]	15-20
Max. szerokość korony [m]	6-10
Pokrój	korona zwarta, kształt stożkowy, piramidalny
Tempo wzrostu	szybkie
Wymagania glebowe	małe wymagania glebowe
Tolerancja na suszę	wysoka
Tolerancja dla odczynu gleby	wysoka
Tolerancja dla zanieczyszczenia powietrza	wysoka
Odporność na zasolenie gleby	tak
Stanowisko – wymagania świetlne	stanowisko słoneczne lub półcieniste
Pielęgnacja	bez szczególnych wymagań

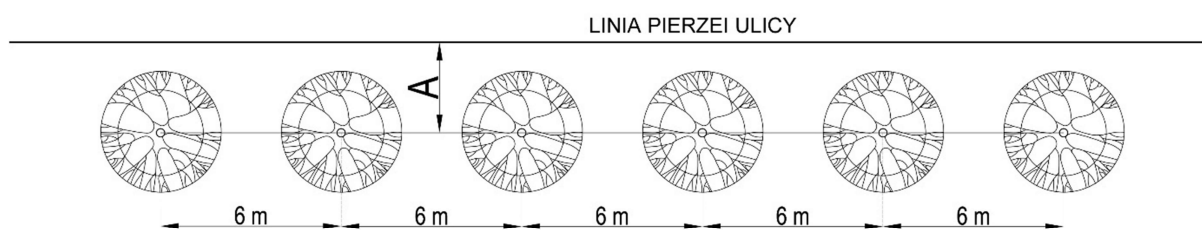
Źródło: Opracowanie własne na podstawie: www.e-katalogroslin.pl, www.klony.info (dostęp: 20.04.2019) oraz Seneta i Dolatowski (2012).

¹³⁹ Z dr inż. arch. krajobrazu Kingą Zinowiec-Cieplik z Politechniki Warszawskiej Wydziału Architektury oraz mgr inż. arch. i arch. krajobrazu Maurą Zaworską z Politechniki Gdańskiej Wydziału Architektury.

¹⁴⁰ Klon jawor jest również jednym z gatunków drzew o największej wytrzymałości mechanicznej według danych ze „Stuttgarckiego Katalogu Wytrzymałości Drewna” (Rosłon-Szeryńska, 2019).

Do badań wybrano 20-25-letnie klony jawor, co pozwoliło na analizę możliwości zacieniających drzew, które nie osiągnęły wieku dojrzałego¹⁴¹. O ile w pełni ukształtowane drzewa mają największe możliwości w zakresie zacieniania, to problem stanowi długi okres rozwoju zieleni wysokiej. Zdecydowano się więc na analizę drzew w wieku, w którym zaraz po nasadzeniu¹⁴² mogą zacząć pełnić rolę elementów osłaniających zabudowę i teren przed bezpośrednim promieniowaniem¹⁴³.

W badaniach zdecydowano się wykorzystać drzewa w formie szpaleru zlokalizowanego równoległe do zabudowy (rys. 29). Biorąc pod uwagę przyjęty wiek klonów, wybrano odległość między środkami pni równą 6 m, która w warunkach rzeczywistych pozwoliłaby na wzrost ich korony. W celu zbadania możliwości zacieniających zieleni wysokiej przy różnych odległościach (A) od osłanianej zabudowy wybrano sześć wariantów lokalizacji szpaleru. Uwzględniając dane dla drogi zbiorczej i głównej jednojezdniowej (Borowski i Pstrągowska, 2009), które przedstawiono w rozdziale 3, drzewa usytuowano: 2 m, 3 m, 4 m, 5 m, 6 m i 9 m od pierzei, zgodnie z przepisami i założeniami przywołanymi w rozdziale 3 niniejszej pracy¹⁴⁴.



Rysunek 29. Schemat lokalizacji szpaleru drzew. Odległość (A) w zależności od wariantu wynosi: 2 m, 3 m, 4 m, 5 m, 6 m i 9 m

Źródło: Opracowanie własne.

4.2.3. Lokalizacja oraz czas

Symulację przeprowadzono dla lokalizacji w strefie wilgotnego klimatu kontynentalnego¹⁴⁵, obejmującego m.in. obszar Polski, gdzie z racji postępujących zmian klimatycznych (Błażejczyk i in., 2015) wskazane jest poszukiwanie różnego rodzaju rozwiązań przeciwsłonecznych. Do badań wybrano **Płock** (52°32'50" N 19°42'00" E; 58-105 m n.p.m.), miasto znajdujące się w centralnej części Polski, w województwie mazowieckim, na terenie, gdzie całkowite promieniowanie słoneczne osiąga jedne z najwyższych sum rocznych¹⁴⁶

¹⁴¹ Przyjmuje się, że dorosły klon (*Acer platanoides*) to drzewo w wieku 45-50 lat (Bach i Frazik-Adamczyk, 2006).

¹⁴² Istnieje coraz więcej firm, które z powodzeniem oferują nasadzenia i przesadzania dużych drzew, a także mają w swojej szkółce okazy 20-, 30-letnie, jak np. firma Drewnsmol z siedzibą w Badowie Górnym (Mszczonów).

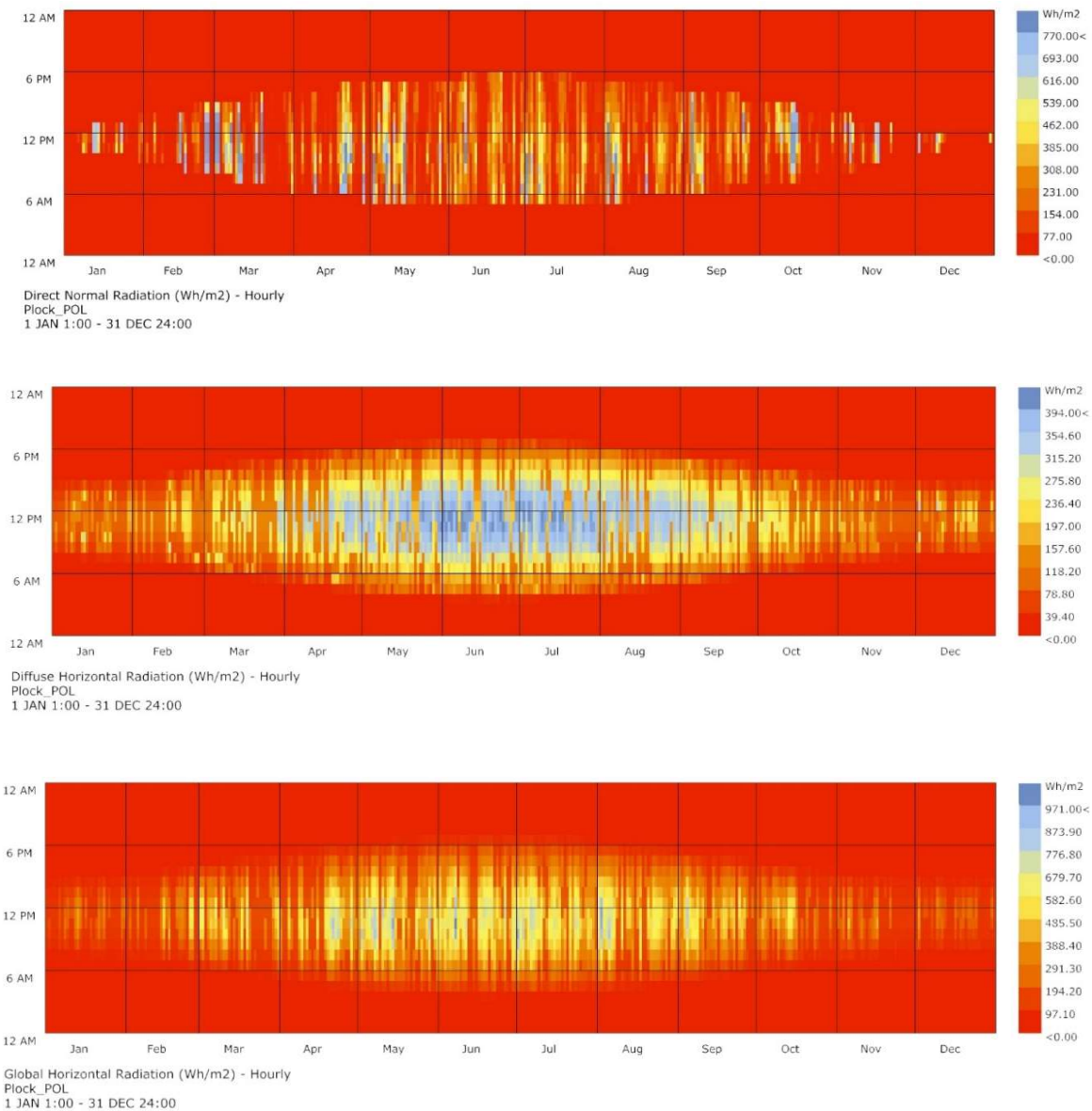
¹⁴³ 20-25-letnie klony jawor mają koronę, której średnica dochodzi do 4 m, z kolei pierśnica może osiągnąć około 14 cm.

¹⁴⁴ Przy wariacie lokalizacji drzew nie uwzględniono rozmieszczenia sieci podziemnej.

¹⁴⁵ Przyjęto klasyfikację klimatu według Köppena (Dfb).

¹⁴⁶ Dane aktynometryczne za lata 1961-2000 wskazują, że całkowite promieniowanie słoneczne osiąga najwyższe sumy roczne w centrum oraz na północnych i południowo-wschodnich krańcach Polski (Błażejczyk i in., 2015).

w kraju ($>3800 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$) (Błażejczyk i in., 2015). Poniżej przedstawiono wykresy ilustrujące w ciągu roku: bezpośrednie oraz rozproszone i całkowite promieniowanie słoneczne na powierzchni poziome dla Płocka (rys. 30). Dane uzyskano z plików pogodowych EPW¹⁴⁷ za pomocą komponentów wtyczki środowiskowej Ladybug, którą zawiera wykorzystane w badaniach oprogramowanie Rhino/Grasshopper.



Rysunek 30. Wykres dla Płocka ilustrujący kolejno: bezpośrednie promieniowanie słoneczne oraz rozproszone i całkowite promieniowanie słoneczne na powierzchni poziome w ciągu roku

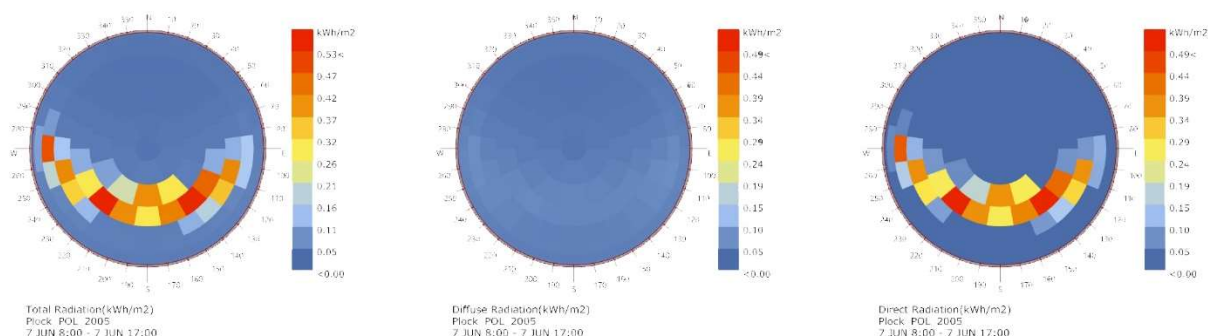
Źródło: Opracowanie własne za pomocą danych z plików pogodowych EPW: https://www.energyplus.net/weather-download/europe_wmo_region_6/POL//POL_Plock.123600_IMGW/all (dostęp: 25.03.2020).

Wykorzystane w badaniach narzędzie Rhino/Grasshopper umożliwia przeprowadzenie analizy godzin nasłonecznienia (SHA) dla dowolnych ram czasowych. W niniejszej pracy

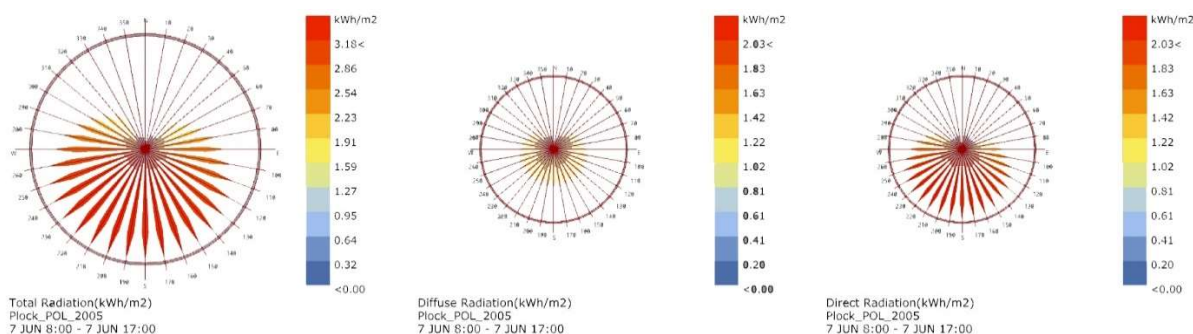
¹⁴⁷ https://www.energyplus.net/weather-download/europe_wmo_region_6/POL//POL_Plock.123600_IMGW/all (dostęp: 25.03.2020)

przyjęto przedział kilku godzin w jednym wytypowanym dniu. Takie ograniczenie czasu pozwala na szczegółową analizę zacienienia elewacji przez drzewa w przestrzeni ulicy przy zadanych uwarunkowaniach.

Do wytypowania konkretnego dnia skorzystano z informacji udostępnionych przez Ministerstwo Inwestycji i Rozwoju dotyczących typowych lat meteorologicznych i statystycznych danych klimatycznych do obliczeń energetycznych dla wybranej lokalizacji¹⁴⁸. Na podstawie danych dla stacji Płock Trzepowo (numer 12 360) przyjęto w półroczu letnim¹⁴⁹ miesiąc oraz dzień o największym natężeniu bezpośredniego promieniowania słonecznego na powierzchnię poziomą dla terenu miasta Płocka, tj. **7 czerwca** (971,1 W/m²). Poniżej przedstawiono schemat ilustrujący lokalizację promieniowania słonecznego na nieboskłonie (rys. 31) oraz kierunek i wartość radiacji słonecznej (rys. 32) dla miasta Płocka w wytypowanym dniu 7 czerwca w godzinach 8.00-17.00.



Rysunek 31. Schemat ilustrujący nieboskłon z lokalizacją promieniowania słonecznego całkowitego, rozproszonego i bezpośredniego w wybranej lokalizacji (Płock) w dniu 7 czerwca w godzinach 8.00-17.00
 Źródło: Opracowanie własne na podstawie plików pogodowych EPW: https://www.energyplus.net/weather-download/europe_wmo_region_6/POL//POL_Plock.123600_IMGW/all (dostęp: 25.03.2020).



Rysunek 32. Schemat obrazujący kierunek i ilość promieniowania słonecznego: całkowitego, rozproszonego i bezpośredniego w wybranej lokalizacji (Płock) w dniu 7 czerwca w godzinach 8.00-17.00
 Źródło: Opracowanie własne na podstawie plików pogodowych EPW: https://www.energyplus.net/weather-download/europe_wmo_region_6/POL//POL_Plock.123600_IMGW/all (dostęp: 25.03.2020).

¹⁴⁸ Źródło: www.gov.pl/web/inwestycje-rozwoj/dane-do-obliczen-energetycznych-budynkow (dostęp: 10.01.2019).

¹⁴⁹ W półroczu letnim na terenie Polski uzyskiwane jest około 77% rocznej energii promieniowania słonecznego (<https://poradnikprojektanta.pl/energia-sloneczna-w-polsce-naslonecznienie> (dostęp: 10.05.2019)).

Do symulacji wybrano godziny, w których bezpośrednio natężenie promieniowania słonecznego na powierzchnię poziomą w dniu 7 czerwca przekracza 300 W/m^2 ⁽¹⁵⁰⁾, tj. **od 8.00 do 14.00**. W toku pracy zdecydowano się jednak na wydłużenie analizy o 3 godziny, tj. **do 17.00**, do czasu, w którym bezpośrednio natężenie promieniowania słonecznego spada do wartości $64,20 \text{ W/m}^2$ ⁽¹⁵¹⁾.

Symulację przeprowadzono dla dwóch różnych horyzontów czasowych:

- 9 godzin od 8.00 do 17.00,
- dla następujących po sobie jednogodzinnych przedziałów czasowych od 8.00 do 17.00, tj. 8.00–9.00, 9.00–10.00 itd.

4.3. Narzędzie badawcze

W badaniach opartych na symulacji komputerowej wykorzystano komponent analizy godzin nasłonecznienia (SHA), który jest dostępny w nakładce Ladybug Tools programu Rhino 6/Grasshopper. SHA przeprowadza symulację przy użyciu wektorów słońca wygenerowanych przez komponent ścieżki słońca (sunPath)¹⁵².

Narzędzie zostało uzupełnione o opracowany na potrzeby badań komponent, który umożliwia zliczenie powierzchni zacienionych [m^2] – zarówno poziomych, jak i pionowych. Pozwala to na szybką weryfikację i ocenę przyjętych założeń oraz na analizę wyników w ramach jednego oprogramowania.

Modele wykorzystane w analizie godzin nasłonecznienia zostały zbudowane w oparciu o przedstawione powyżej założenia w programie Rhino oraz przy wykorzystaniu graficznego edytora algorytmów Grasshopper¹⁵³.

W celu przeprowadzenia symulacji godzin nasłonecznienia za pomocą wybranego komponentu SHA należy wprowadzić dane wejściowe (rys. 33):

- geometrię, która jest przedmiotem badań (`_geometry`), tj. w tym przypadku model ulicy,
- geometrię elementów zacieniających analizowane obiekty (`context_`), tj. model zieleni,
- wektory słońca wygenerowane dzięki komponentowi sunPath (`_sunVectors`),
- wielkość siatki wykorzystanej do analizy godzin nasłonecznienia (`_gridSize`) wyrażonej w jednostkach modelu Rhino¹⁵⁴, w badaniach wynosi ona 20 jednostek [cm],

¹⁵⁰ Jako minimalną wartość wybrano 370 W/m^2 , tj. wartość wynikającą ze średniej arytmetycznej wartości bezpośredniego natężenia promieniowania słonecznego na powierzchnię poziomą dla dnia 7 czerwca w wybranej lokalizacji.

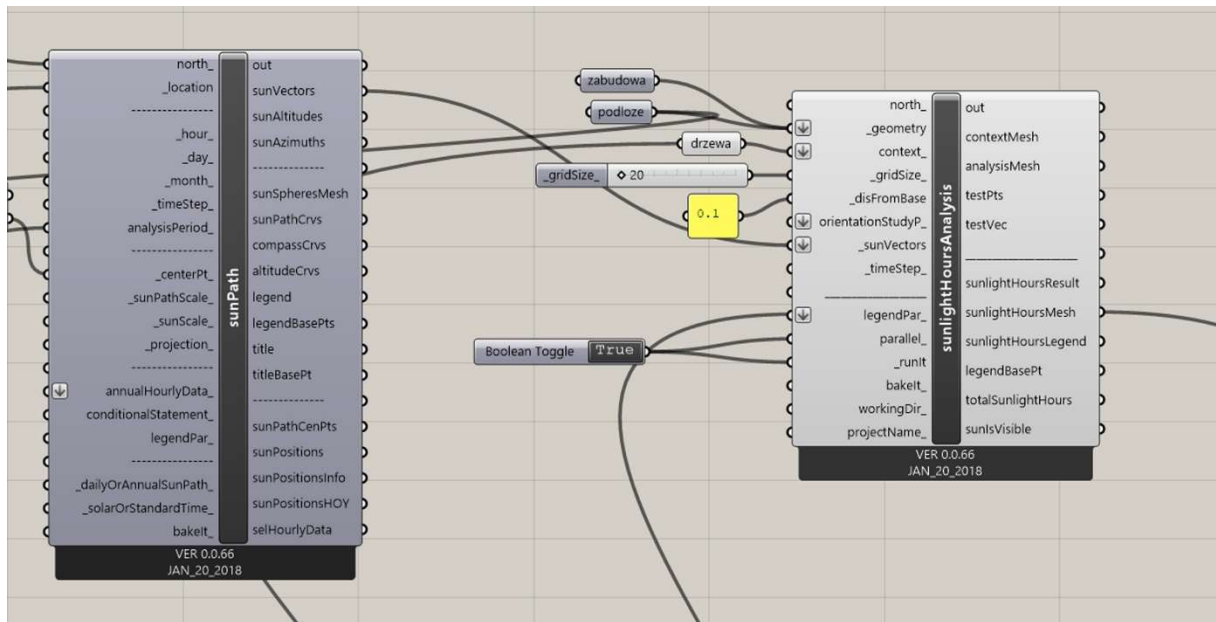
¹⁵¹ Zwiększenie zakresu czasu, dla którego przeprowadzona została symulacja, pozwoliło na obserwację zacieniania zwłaszcza zachodnich elewacji budynków.

¹⁵² Funkcja sunPath jest wersją skryptu Radiance autorstwa Grega Warda w języku oprogramowania Python.

¹⁵³ Kwestie techniczne dotyczące wykorzystanego do badań narzędzia konsultowano z mgr. inż. arch. Kacprem Radziszewskim, asystentem na Wydziale Architektury Politechniki Gdańskiej.

¹⁵⁴ Im mniejsza jednostka, tym wyższa rozdzielczość analizy nasłonecznienia, co z kolei wydłuża czas trwania symulacji.

- ustalenie odległości od bazowej geometrii (`_disFromBase`), którą ustawiono na poziomie 0,1.



Rysunek 33. Komponent Sunlight Hours Analysis (SHA) w programie Rhino/Grasshopper wraz z danymi wejściowymi

Źródło: Opracowanie własne.

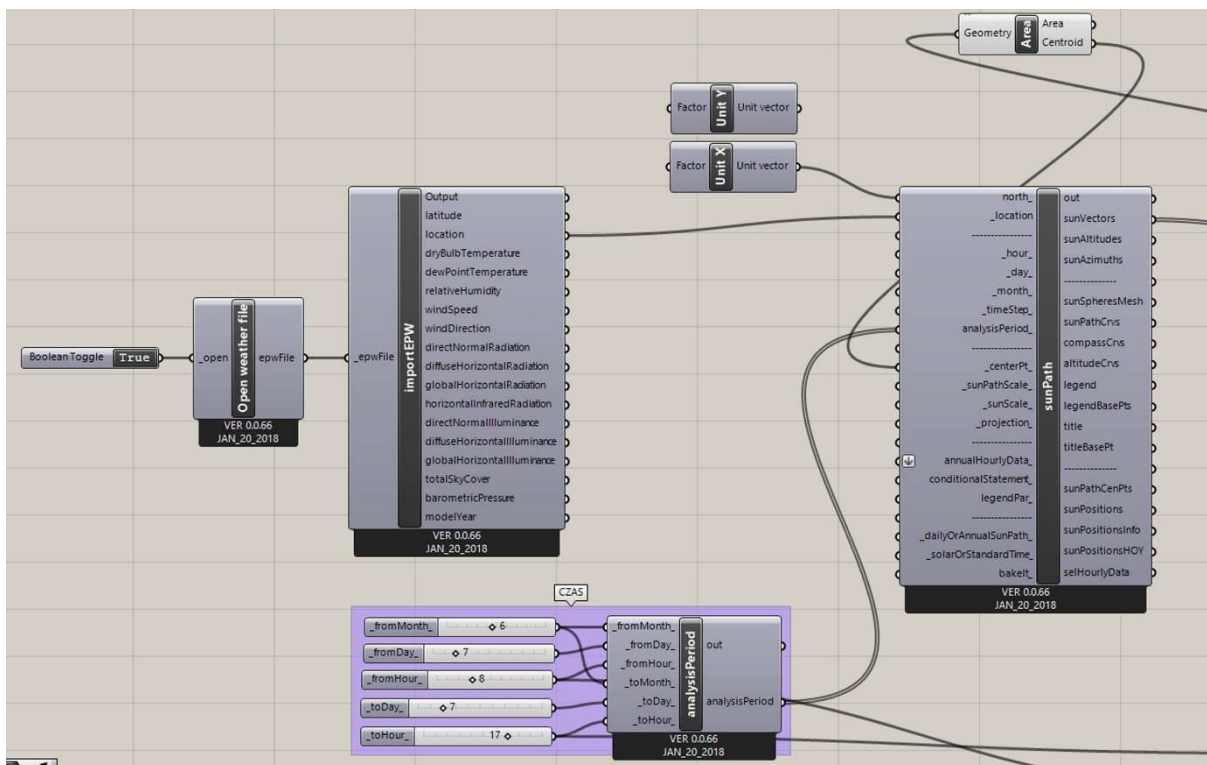
W komponencie `sunPath` do wygenerowania niezbędnych wektorów słońca konieczne jest wprowadzenie (rys. 34):

- danych w zakresie lokalizacji (`_location`),
- czasu, dla którego ma zostać przeprowadzona symulacja,

Czas zdefiniowano za pomocą komponentu `Ladybug_Analysis Period`, który umożliwi przeprowadzenie analizy dla wybranego przedziału czasowego, wskazując zakres od–do danego: miesiąca, dnia oraz godziny.
- orientacji układu względem stron świata poprzez wyznaczenie kierunku północnego w modelu (`north_`).

Model zorientowano w dwóch kierunkach: północ–południe przy ustawieniu północy wzdłuż osi Y oraz wschód–zachód w przypadku wyboru osi X.

Komponent `sunPath` pozwala również na modyfikację skali słońca (`_sunScale_`) i ścieżki słońca (`_sunPathScale_`), a także na ich lokalizację poprzez wyznaczenie punktu stanowiącego centrum układu (`_centerPt_`) (rys. 34).

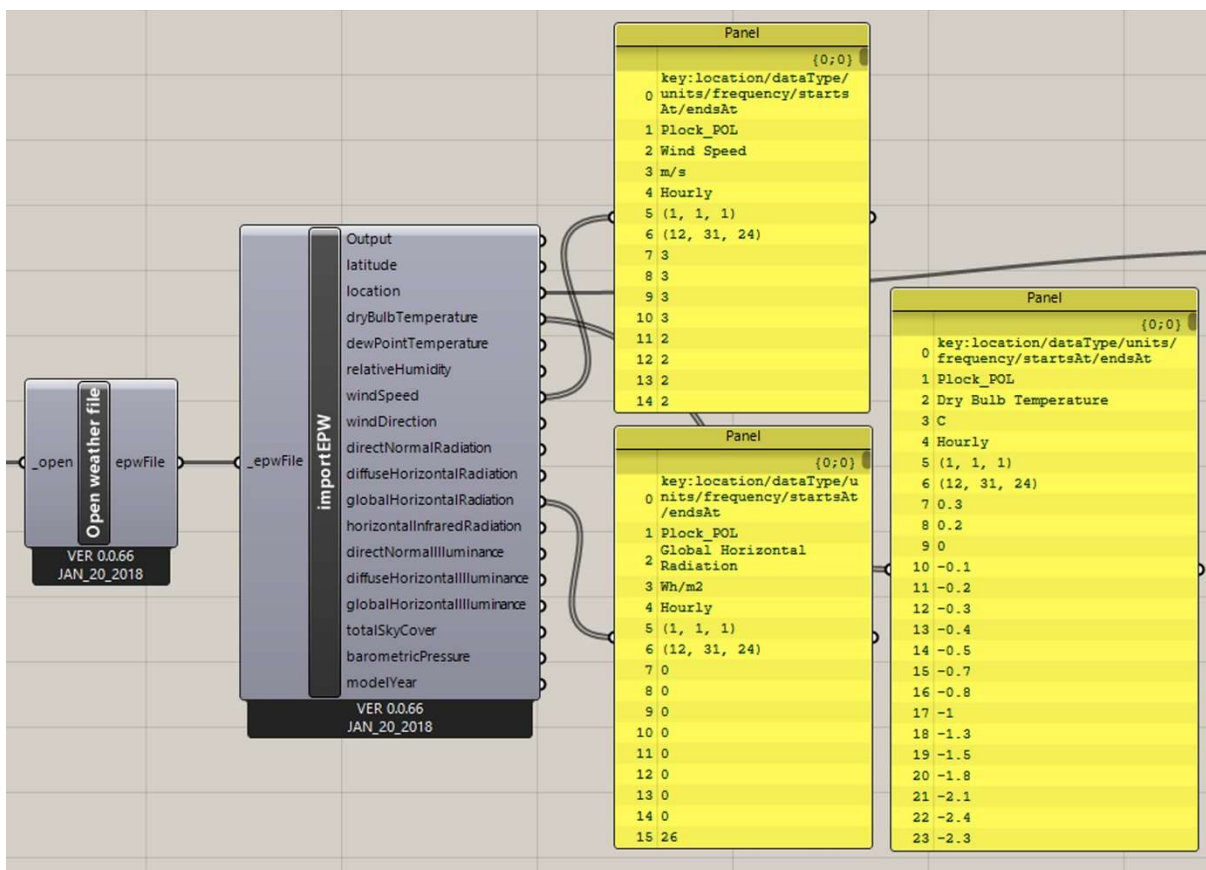


Rysunek 34. Komponent sunPath w programie Rhino/Grasshopper wraz z danymi wejściowymi
 Źródło: Opracowanie własne.

Dane wejściowe dla lokalizacji uzyskiwane są z pliku pogodowego EPW¹⁵⁵ za pomocą dostępnych w Ladybug narzędzi importEPW oraz Open weather file, które umożliwiają otwarcie oraz zaimportowanie informacji z zapisanego na komputerze pliku. W badaniach wykorzystano plik EPW dla wybranej lokalizacji, tj. miasta Płocka (52°32'50" N 19°42'00" E, 58-105 m n.p.m.). Komponent importEPW po zaimportowaniu wybranego pliku, oprócz danych dotyczących lokalizacji, udostępnia szereg innych informacji, jak m.in. prędkość wiatru, temperaturę suchego termometru czy całkowite natężenie promieniowania słonecznego na poziomą płaszczyznę dla danego miejsca (rys. 35).

Po wprowadzeniu powyższych danych uruchomienie komponentu SHA następuje przez ustawienie włącznika Boolean Toogle do wejścia `_parallel_` i `_runIt` oraz włączenie opcji True.

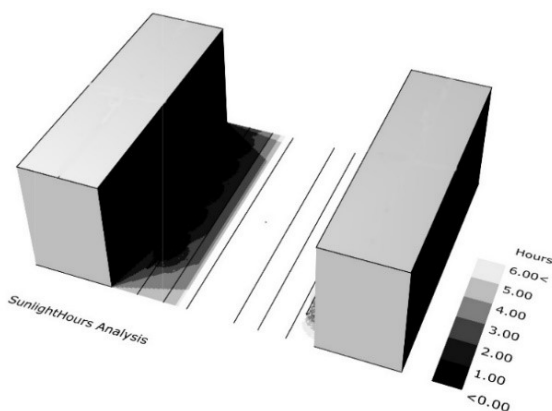
¹⁵⁵ Pliki pogodowe dla dowolnego miejsca możliwe są do pobrania ze strony EnergyPlus pod adresem: <https://energyplus.net/weather> (dostęp: 15.09.2019), dzięki czemu opracowana metoda analizy zacieniania w układach roślinno-architektonicznych może być zastosowana dla różnych lokalizacji.



Rysunek 35. Przykładowe dane dla miasta Płocka zapisane w pliku pogodowym EPW (https://energyplus.net/weather-location/europe_wmo_region_6/POL//POL_Plock.123600_IMGW, dostęp: 15.09.2019)

Źródło: Opracowanie własne.

Wyniki analizy godzin nasłonecznienia dla danej geometrii przy użyciu narzędzia SHA przedstawione są wyłącznie w formie graficznej na badanym modelu (rys. 36). Prezentują one różny czas ekspozycji słonecznej powierzchni modelu [h] w ciągu wskazanego czasu.

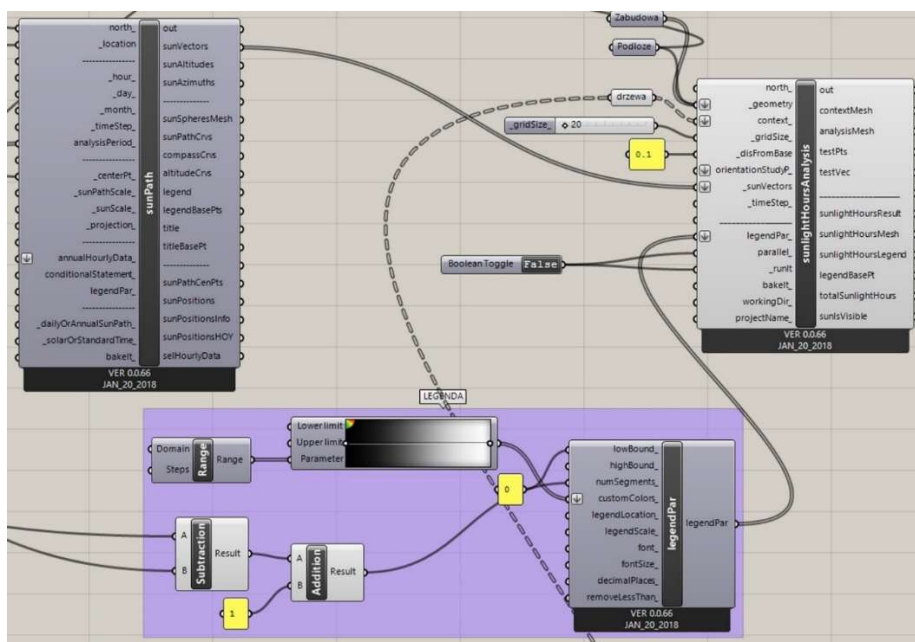


Rysunek 36. Przykładowy wynik analizy godzin nasłonecznienia (Sunlight Hours Analysis) dla modelu wybranej ulicy o H/W = 0,6 dla lokalizacji w mieście Płocku dla dnia 7 czerwca w godzinach 8.00–14.00

Źródło: Opracowanie własne.

Analiza godzin nasłonecznienia wizualizowana jest razem z legendą, która może zostać zmodyfikowana m.in. w zakresie skali czy kolorystyki (legendPar) (rys. 37). W badaniach

wybrano skalę szarości, gdzie kolor czarny (RGB 0,0,0) oznacza minimalną ekspozycję słoneczną powierzchni, a biały (RGB 255,255,255) maksymalną w rozpatrywanym przedziale czasowym.



Rysunek 37. Legenda do komponentu SHA
Źródło: Opracowanie własne.

4.3.1. Dostosowanie narzędzia do badań

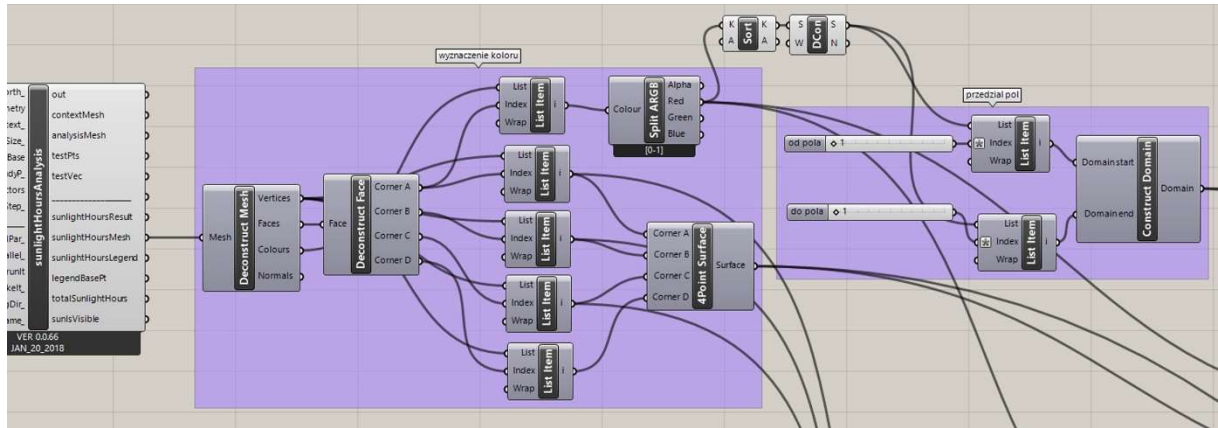
Brak konkretnych danych na temat wielkości powierzchni zacienionych w analizie godzin nasłonecznienia SHA utrudnia szybką ocenę przyjętych założeń oraz analizę rozwiązań, zwłaszcza w procesie projektowania architektonicznego bądź urbanistycznego. Aby dostosować narzędzie do potrzeb potencjalnych użytkowników, rozbudowano istniejący komponent SHA o dodatkowy algorytm, która pozwala na obliczanie metrażu powierzchni zacienionych [m²] – zarówno poziomych, jak i pionowych.

W tym celu na podstawie danej wyjściowej z komponentu SHA – SunlightHoursMesh¹⁵⁶ zbudowano algorytm wyboru koloru pierwszego wierzchołka siatki¹⁵⁷, który umożliwia zaznaczenie dowolnego występującego w analizie koloru (rys. 38). Pozwoliło to na zdefiniowanie listy n wartości, która odpowiada n kolorom na legendzie poprzez posortowanie (komponent Sort List) wszystkich wartości koloru (skali szarości) w postaci liczby pomiędzy 0 a 1, a następnie usunięcie wszelkich powtórzeń danej wartości (komponent Delete Consecutive). Następnie utworzono zakres (ang. *domain*) określający pola

¹⁵⁶ SunlightHoursMesh to kolorowa siatka na testowanej geometrii, której poszczególne barwy reprezentują daną liczbę godzin nasłonecznienia w badanym okresie.

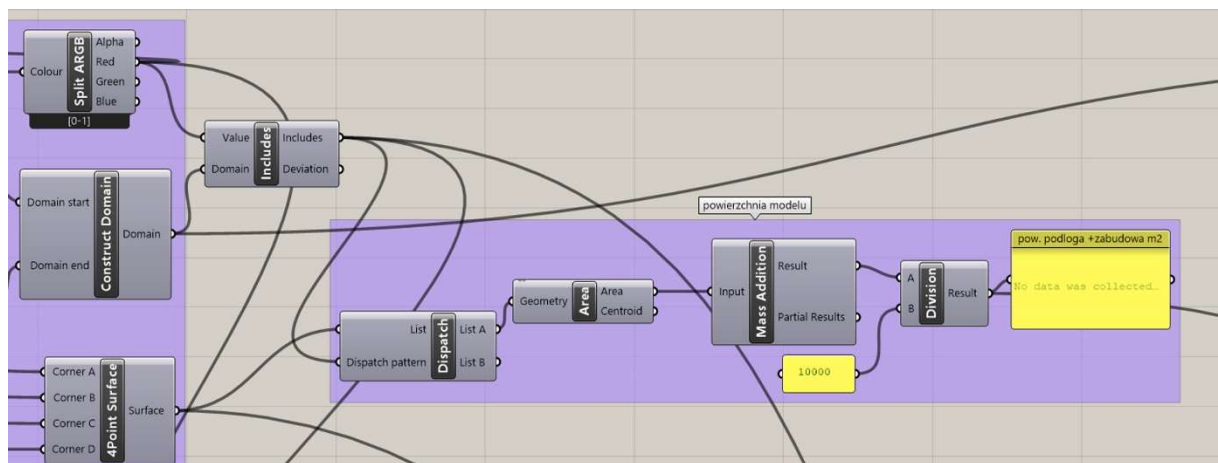
¹⁵⁷ Kolor pierwszego wierzchołka pojedynczego pola siatki w programie Grasshopper/Ladybug wyznacza kolor płaszczyzny tego pola.

na legendzie wytypowane do analizy. Do zliczenia powierzchni wskazanych przez wybranie odpowiedniego pola/pól legendy wykorzystano komponent Area oraz Mass Addition. Wynik w jednostkach modelu zbudowanego w Rhino podzielono przez 10 000, aby uzyskać metraż powierzchni w m² (rys. 39).



Rysunek 38. Algorytm pozwalający na wybór powierzchni o danym kolorze lub kolorach, które występują w analizie SHA na testowanej geometrii

Źródło: Opracowanie własne.



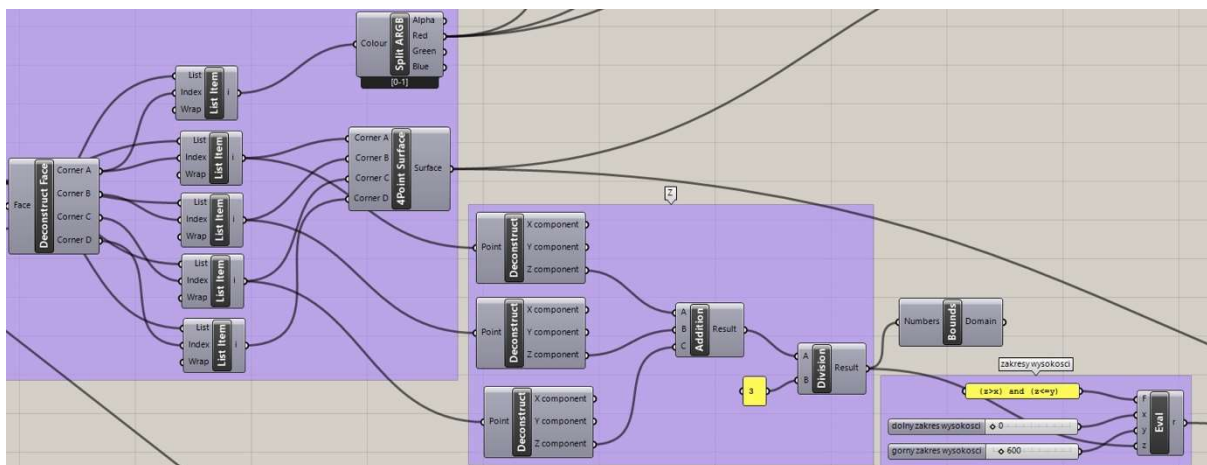
Rysunek 39. Algorytm pozwalający na obliczenie powierzchni wybranych uprzednio płaszczyzn o danym kolorze

Źródło: Opracowanie własne.

W celu ograniczenia analizy zacielenia wyłącznie do powierzchni elewacji modelu dodano algorytm pozwalający na wyodrębnienie pionowych płaszczyzn w wybranym kolorze, które tworzą siatkę zabudowy. Zaproponowane rozwiązanie pozwala na zdefiniowanie współrzędnej „z” punktów tworzących moduły siatki SunlightHoursMesh (rys. 40). Do wyznaczenia „z” przyjęto średnią wartość z trzech wierzchołków elementów siatki¹⁵⁸. Następnie wykorzystano funkcję w komponencie Evaluate do zaznaczenia dolnego i górnego zakresu wysokości „z”. Dzięki temu system wybierze tylko te płaszczyzny zdefiniowane przez

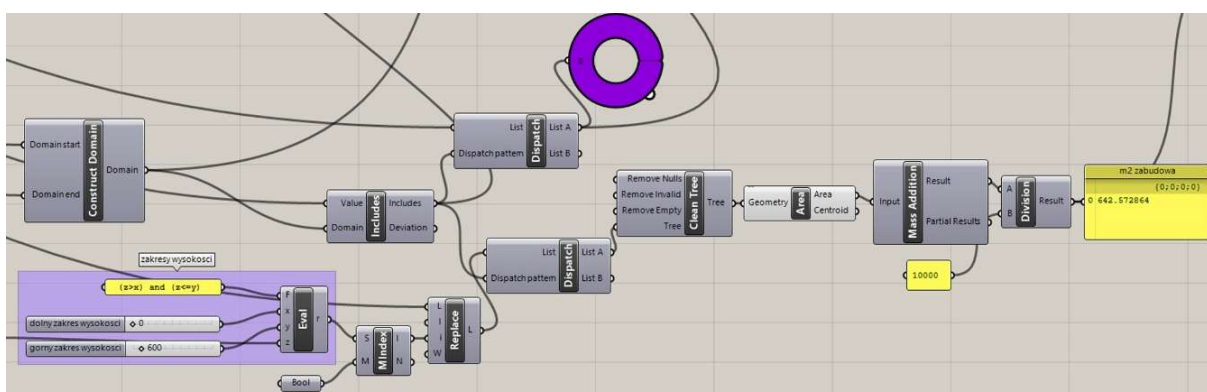
¹⁵⁸ Przez dodanie trzech wartości i podzielenie rezultatu przez trzy.

punkty, których współrzędne wysokości zostały określone przez wskazaną liczbę bądź zakres liczb¹⁵⁹.



Rysunek 40. Algorytm pozwalający na zdefiniowanie współrzędnej „z” punktów tworzących moduły siatki SunlightHoursMesh

Źródło: Opracowanie własne.



Rysunek 41. Algorytm pozwalający na obliczenie powierzchni o wskazanym kolorze oraz współrzędnej „z”

Źródło: Opracowanie własne.

Algorytm zawierający listę punktów podłączono do komponentu Dispatch, by przyporządkować dane wejściowe do dwóch grup według przyjętej klasyfikacji (rys. 41). W tym przypadku kryterium wyboru są kolory wyznaczone przez wskazanie odpowiedniego numeru pola legendy. Następnie zastosowano komponent Clean Tree, który usuwa z listy wybranych płaszczyzn pozycje o wartości „Null”¹⁶⁰, które uniemożliwiłyby zsumowanie pola powierzchni wszystkich pozycji. W celu zliczenia powierzchni płaszczyzn utworzonych przez punkty o wskazanym kolorze i współrzędnej „z” wykorzystano komponent Area i Mass

¹⁵⁹ Przykładowo, dla wartości 0 wybrane zostaną wszystkie punkty tworzące płaszczyzny znajdujące się na terenie, a przy zakresie 300-600 – te znajdujące się od 3 m do 6 m nad terenem.

¹⁶⁰ „Puste” elementy, określane jako „Null”, powstały, gdy komponent Dispatch rozdzielił listę płaszczyzn na dwie, nie zmieniając struktury. Stąd w pozycjach listy zakwalifikowanej jako wyjście A, w których przed rozdzieleniem znajdowały się elementy skierowane do wyjścia B, powstały „puste” pozycje.

Addition. Wynik podzielono przez 10 000, by uzyskać metraż powierzchni w metrach kwadratowych.

W niniejszych badaniach przeprowadzono analizę powierzchni zacienienia:

- całej pierzei, z zakresem wysokości „z” od 0 do wartości „z” równej wysokości zabudowy,
- elewacji parteru, z zakresem wysokości „z” od 0 do 300,
- ścian na wysokości I piętra, z zakresem wysokości „z” od 300 do 600.

Komponent SHA uzupełniony o dodatkowe algorytmy nie rozróżnia powierzchni zacienionej przez budynki i zieleni. W celu wyodrębnienia udziału zabudowy i roślin w zacienianiu pierzei przeprowadzono analizę godzin nasłonecznienia dla dwóch układów: referencyjnego z ulicą bez zieleni oraz modelu z drzewami.

Geometria, dla której przeprowadzona jest symulacja godzin nasłonecznienia, powinna być wymodelowana jako bryła lub powierzchnia (ang. *brep*), siatka (ang. *mesh*) bądź jako ich lista. Istnieje możliwość zbudowania modelu w programie Rhino, wykorzystania w tym celu graficznego edytora algorytmów Grasshopper albo zaimportowania modelu z innego programu.

4.3.2. Model zabudowy

Model zbudowano w programie Rhino 6 w oparciu o przedstawione wcześniej założenia dotyczące przekrojów ulicy (parametr H/W) oraz wysokości zabudowy. Do badań przyjęto odcinek ulicy o długości 40 m. Uznano, że przyjęta długość ulicy pozwala na przeprowadzenie analizy zacienienia oraz umożliwia sformułowanie wniosków, które mogą być wiążące także dla dłuższych pierzei. Charakterystyczne parametry wymodelowanych wariantów przedstawiono w tabeli 24.

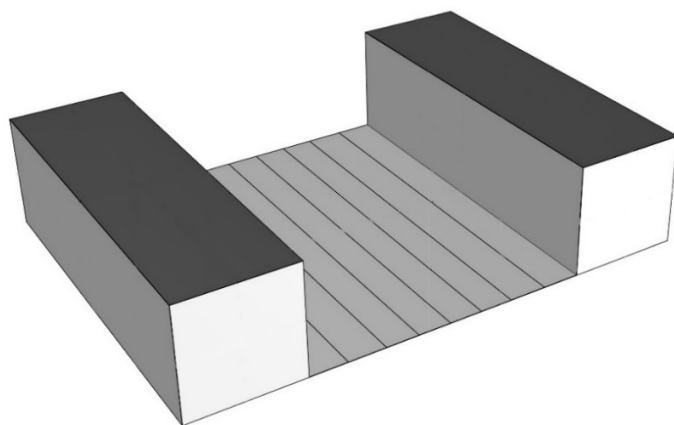
Tabela 25. Charakterystyczne parametry modelu ulicy zbudowanego na potrzeby symulacji

H/W	Długość ulicy [m]	Szerokość ulicy [m]	Wys. budynków [m]	Liczba kondygnacji	Pow. pozioma w liniach rozgraniczających ulicy [m ²]	Pow. elewacji jednej pierzei ulicy [m ²]
2	40	30	60	20	1200	2400
1	40	30	30	10	1200	1200
0,6	40	30	18	6	1200	720
0,4	40	30	12	4	1200	480
0,2	40	30	6	2	1200	240

Źródło: Opracowanie własne.

W budowie modelu przyjęto uproszczenia zgodne z założeniami oraz celem badań, dla którego istotna jest przede wszystkim geometria budynków, w tym głównie ich wysokość. Ponadto zdefiniowanie zabudowy za pomocą prostych brył znacznie przyspiesza proces obliczeń w symulacji komputerowej. Pierzeje zyskały formę prostopadłościanów, w których

pominięto otwory okienne i drzwiowe, inne detale architektoniczne oraz rozwiązania materiałowe (rys. 42). W modelu nie uwzględniono podstawy oraz górnej płaszczyzny, aby wykluczyć te powierzchnie z analizy godzin nasłonecznienia SHA, pozostawiając jedynie ściany boczne oraz teren jako geometrię wejściową.



Rysunek 42. Model jednego z wariantów ulicy o $H/W = 0,4$ bez zieleni zbudowany w programie Rhino
Źródło: Opracowanie własne.

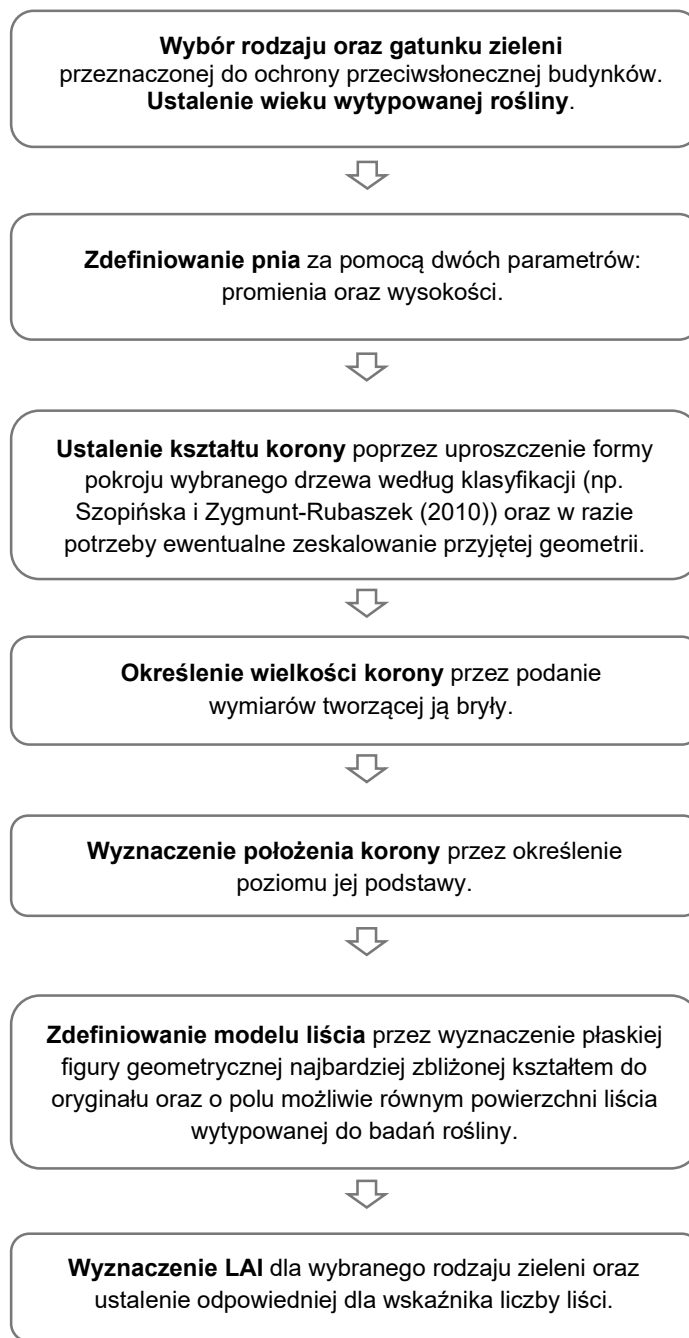
4.3.3. Model zieleni

Na potrzeby badań zbudowano parametryczny model zieleni przy wykorzystaniu graficznego edytora algorytmów Grasshopper na podstawie geometrii wybranego gatunku drzewa – klonu jawor (*Acer pseudoplatanus* L.).

Podstawowym założeniem odnośnie do zieleni jest ograniczenie jej roli wyłącznie do wolnostojącego obiektu osłaniającego zabudowę przed bezpośrednim promieniowaniem słonecznym¹⁶¹. Z uwagi na wyznaczony w rozprawie cel badawczy pominięto wpływ ewapotranspiracji drzew, który w kontekście możliwości wykorzystania roślin wyłącznie jako elementów zacieniających jest nieistotny. Skupiono się na geometrii drzewa, która zdaniem Simpsona i McPhersona (1996) ma kluczowe znaczenie w ochronie przeciwsłonecznej osłanianych obiektów.

Poniższy schemat (schemat 4) obrazuje kolejne działania w definiowaniu modelu zieleni na potrzeby badań nad stopniem zacieniania osłanianych przez nią powierzchni według wypracowanej metody. Każdy etap, z wyjątkiem pierwszego, wymaga przyjęcia większych lub mniejszych uproszczeń opartych na fachowej wiedzy z dziedziny architektury krajobrazu.

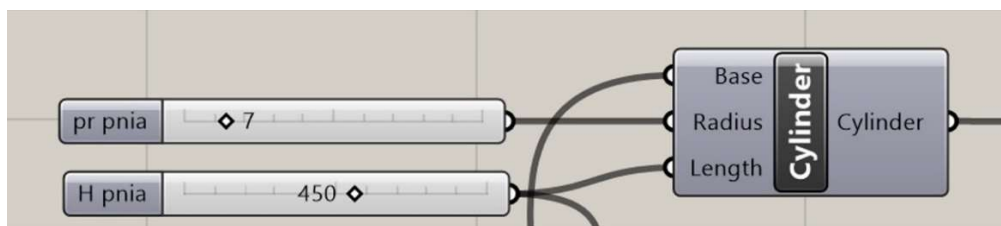
¹⁶¹ Podobne podejście, sprowadzające roślinność jedynie do funkcji elementu zmniejszającego przepuszczalność światła, prezentuje m.in. Meier (1990).



Schemat 4. Etapy definiowania modelu zieleni w opracowanej metodyce
Źródło: Opracowanie własne.

Ze względu na złożoną oraz różnorodną geometrię drzew przyjęto nieuniknione uproszczenia zarówno w budowie modelu pnia, jak i korony.

Pień drzewa wymodelowano jako walec o zadanym promieniu i wysokości, które można dowolnie definiować poprzez ustawienie odpowiednich wartości w komponencie Cylinder (rys. 43).



Rysunek 43. Zdefiniowanie modelu pnia w programie Rhino przy użyciu graficznego edytora algorytmów Grasshopper

Źródło: Opracowanie własne.

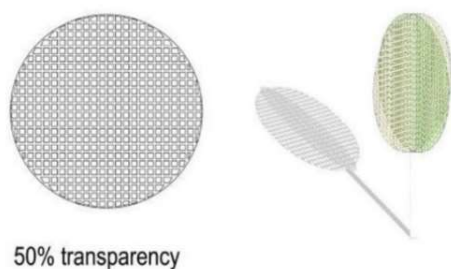
Kluczowy dla oceny stopnia zacieniania osłanianych przez drzewa powierzchni jest sposób prezentacji korony drzewa. Jej najważniejszymi parametrami, z perspektywy prowadzonych badań, są:

- pokrój,
- rozmiar,
- stopień przepuszczalności promieniowania słonecznego, który zależy głównie od liczby, ukierunkowania, kształtu i wielkości liści.

O ile zdefiniowanie korony według dwóch pierwszych atrybutów nie rodzi problemów, to głównym wyzwaniem jest jej wymodelowanie z uwzględnieniem stopnia przepuszczalności bezpośrednich promieni słońca. Jednym z rozwiązań, opracowanym przez Hes i in. (2011), jest uproszczone zobrazowanie korony drzewa przez dwie pojedyncze płaszczyzny koła przecinające się pod kątem prostym w przestrzeni. Natomiast stopień przepuszczalności modelu korony uzyskano przez perforację definiujących ją powierzchni (rys. 44)¹⁶².

Z kolei innym rozwiązaniem jest wymodelowanie uproszczonej formy rośliny, a następnie nadanie jej współczynnika zacieniania określonego na podstawie badań przeprowadzonych w terenie na wybranych pierwowzorach (Hes i in., 2011). Ten sposób prezentacji drzew wykorzystali w swojej pracy m.in. Thayer i in. (1985), którzy zastosowali uproszczenie rzędu zieleni wysokiej do walca o szerokości równej rozpiętości dojrzałego drzewa, a następnie nadali mu współczynnik zacieniania odpowiadający typowym liściastym nasadzeniom ulicznym (rys. 45).

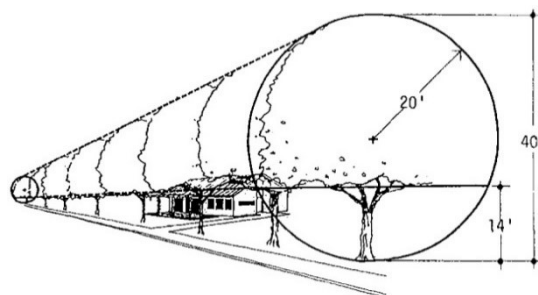
¹⁶² W badaniach założono płaszczyzny pełne i perforowane maksymalnie do 50% reprezentujące korony wybranych do badań gatunków drzew. Jednak jak zauważają sami autorzy, ten sposób kształtowania zielonego elementu zaciężającego jest mało precyzyjny, ponieważ nie uwzględniono szeregu czynników, w tym przede wszystkim gęstości pokrycia liściowego.



Rysunek 44

Rysunek 44. Model reprezentujący drzewo wykorzystany w pracy Hes i in. (2011)

Źródło: Hes i in. (2011: 163).



Rysunek 45

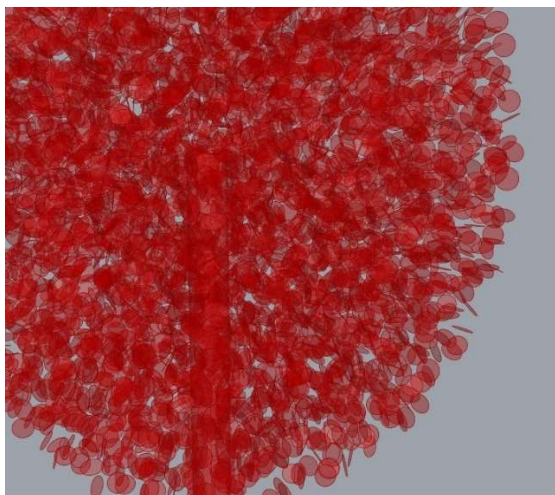
Rysunek 45. Model przedstawiający szpaler drzew w badaniach, które zrealizowali Thayer i in. (1985)

Źródło: Thayer i in. (1985: 4).

Natomiast na potrzeby niniejszych badań zbudowano dokładniejszy model, oddający wierniej niż w dotychczasowych pracach złożoną geometrię wybranego gatunku drzewa. Główna różnica tkwi w budowie korony, która składa się z wymodelowanych losowo zorientowanych i zlokalizowanych liści. Stopień przepuszczalności korony określony jest przez parametry pokrycia liściowego:

- kształt,
- rozmiar,
- liczbę liści.

Budowa modelu zieleni pozwala na modyfikację powyższych atrybutów, a tym samym na uwzględnienie stopnia ulistnienia modelowanej rośliny LAI (*leaf area index*). W modelu przyjęto również uproszczenia, pomijając w jego budowie gałęzie, gałązki oraz pędy. Ponadto zmieniono kształt zielonych organów wegetatywnych, gdzie nieregularne, pięcioklapowe liście klonu wymodelowano jako proste płaszczyzny o kształcie koła (rys. 46).

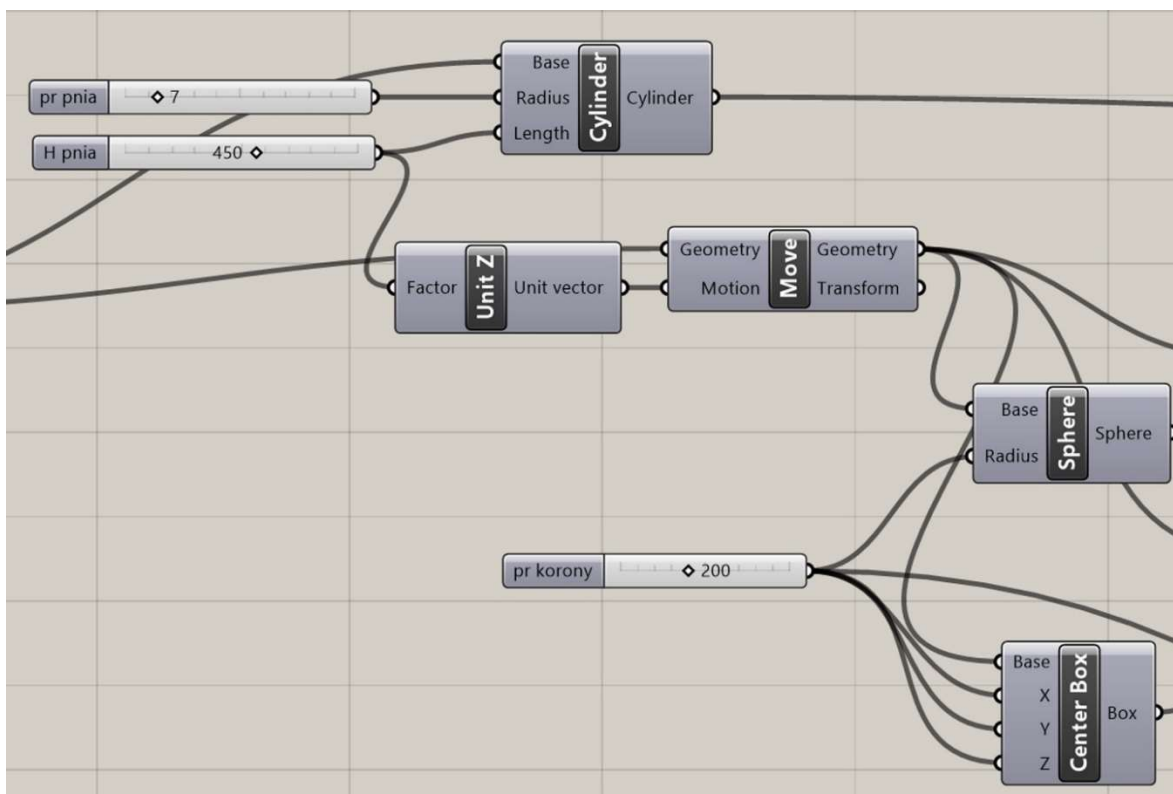


Rysunek 46. Fragment korony modelu drzewa zbudowanego na potrzeby symulacji SHA

Źródło: Opracowanie własne.

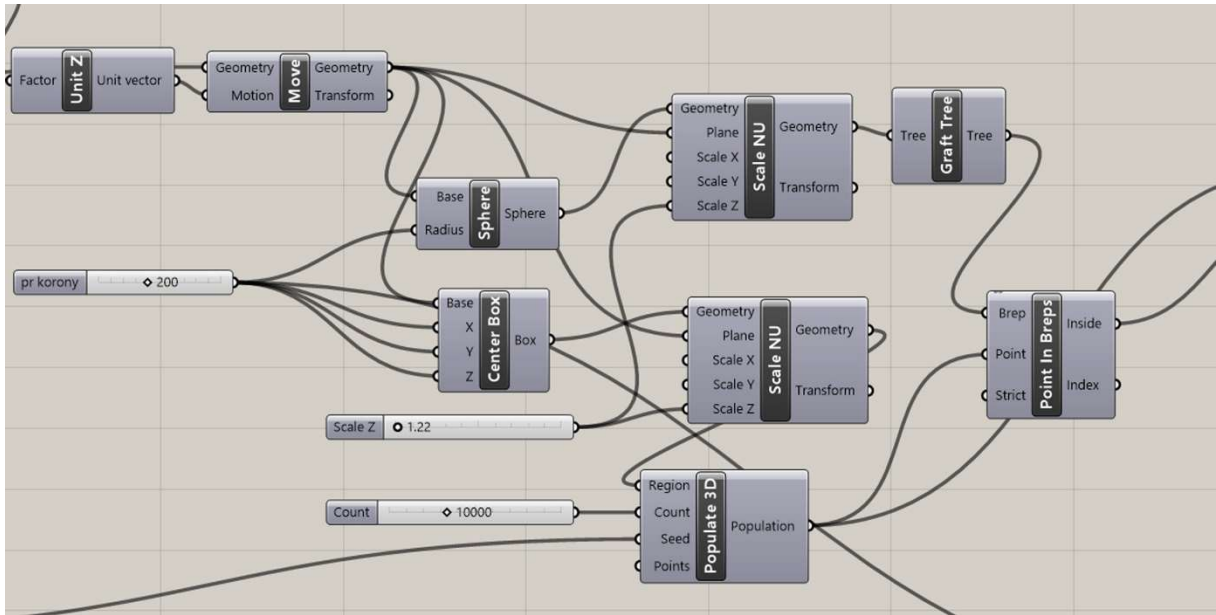
O ile forma modelu liści różni się od oryginału, to parametry określające jego wielkość są tak dobrane, by pole powierzchni odpowiadało przyjętemu pierwowzorowi. To uproszczenie było niezbędne ze względu na konieczność ograniczenia skomplikowanej geometrii, szczególnie przy dużej liczbie elementów biorących udział w symulacji komputerowej.

Budowę modelu korony rozpoczęto od wyznaczenia kuli o zadanym promieniu i o podstawie położonej na wysokości równej wysokości cylindra reprezentującego pień (rys. 47).



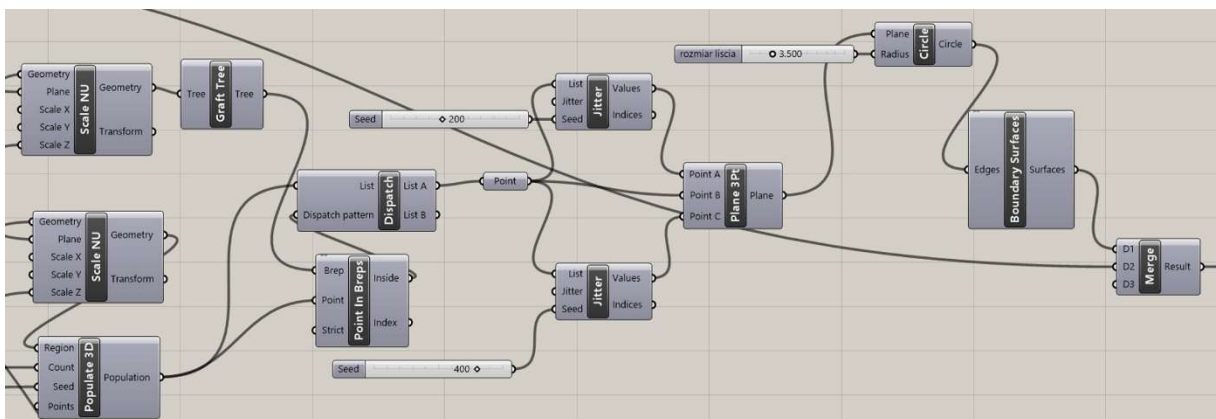
Rysunek 47. I etap definiowania modelu korony drzewa wybranego do badań
Źródło: Opracowanie własne.

Następnie na podstawie danych dla kuli utworzono sześcian, wewnątrz którego znalazła się sfera. Pozwoliło to na zdefiniowanie zbioru punktów w obu tych geometriach za pomocą komponentów Populate 3D oraz Point In Brep (rys. 48). Wybrana liczba punktów przekłada się w dalszym etapie na liczbę utworzonych na ich podstawie liści (wejście count komponent Populate 3D). Pozwala to na dowolne kształtowanie gęstości modelu korony, a tym samym na zmianę parametru LAI. W celu oddania właściwego pokroju korony wykorzystano narzędzie Scale NU do zeskalowania tych geometrii wzdłuż osi Z do uzyskania bardziej owalnej formy (rys. 48).



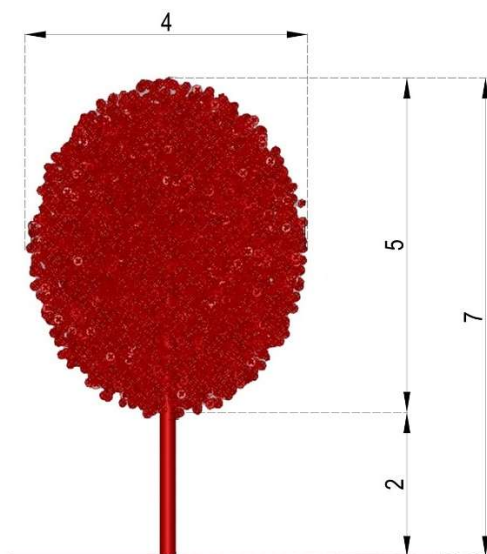
Rysunek 48. Etap definiowania zbioru punktów
Źródło: Opracowanie własne.

Z utworzonej puli punktów przy wykorzystaniu narzędzi: Point in Brep oraz Dispatch wybrano tylko ten zbiór, który znajduje się wewnątrz kuli. Następnie z tego zakresu wybrano trzy punkty, które wyznaczają płaszczyznę. Dla większego zróżnicowania wyboru tych punktów zastosowano dwa algorytmy Jitter, które losowo wskazują wartości wejściowe w zależności od podanej liczby (Seed) (rys. 49). Tak zdefiniowanym płaszczyznom nadano kształt koła o zadany promieniu, a następnie przy wykorzystaniu Boundary Surface dodano granice powierzchni płaskich. Przyjęto jednakowy wymiar dla wszystkich liści kształtujących koronę modelu, natomiast ich lokalizacja i sposób ukierunkowania jest losowy, co w założeniu ma oddać charakter ulistnienia (rys. 48-49).



Rysunek 49. II etap definiowania modelu korony drzewa wybranego do badań
Źródło: Opracowanie własne.

Parametry modelu drzewa zbudowanego według powyższej metody z uwzględnieniem przyjętych założeń zostały przedstawione w tabeli 26, z kolei graficzną formę prezentuje poniższa ilustracja (rys. 50).



Rysunek 50. Model klonu javor wykorzystany w symulacji. Wymiary w metrach
Źródło: Opracowanie własne.

Tabela 26. Główne parametry modelu drzewa reprezentującego 20-25-letni klon javor „Rotterdam” (*Acer pseudoplatanus* ‘Rotterdam’) zbudowanego na potrzeby symulacji komputerowej

Charakterystyka	Model klonu javor „Rotterdam” (<i>Acer pseudoplatanus</i> ‘Rotterdam’)
Obwód pnia	0,44 m
Szerokość korony	4 m
Wysokość korony	5 m
Kształt korony	owalna
Wysokość do podstawy korony	2 m
Wysokość drzewa	7 m
LAI	6 ¹⁶³
Kształt liścia	koło
Rozmiar liścia	średnica 7 cm ¹⁶⁴

Źródło: Opracowanie własne.

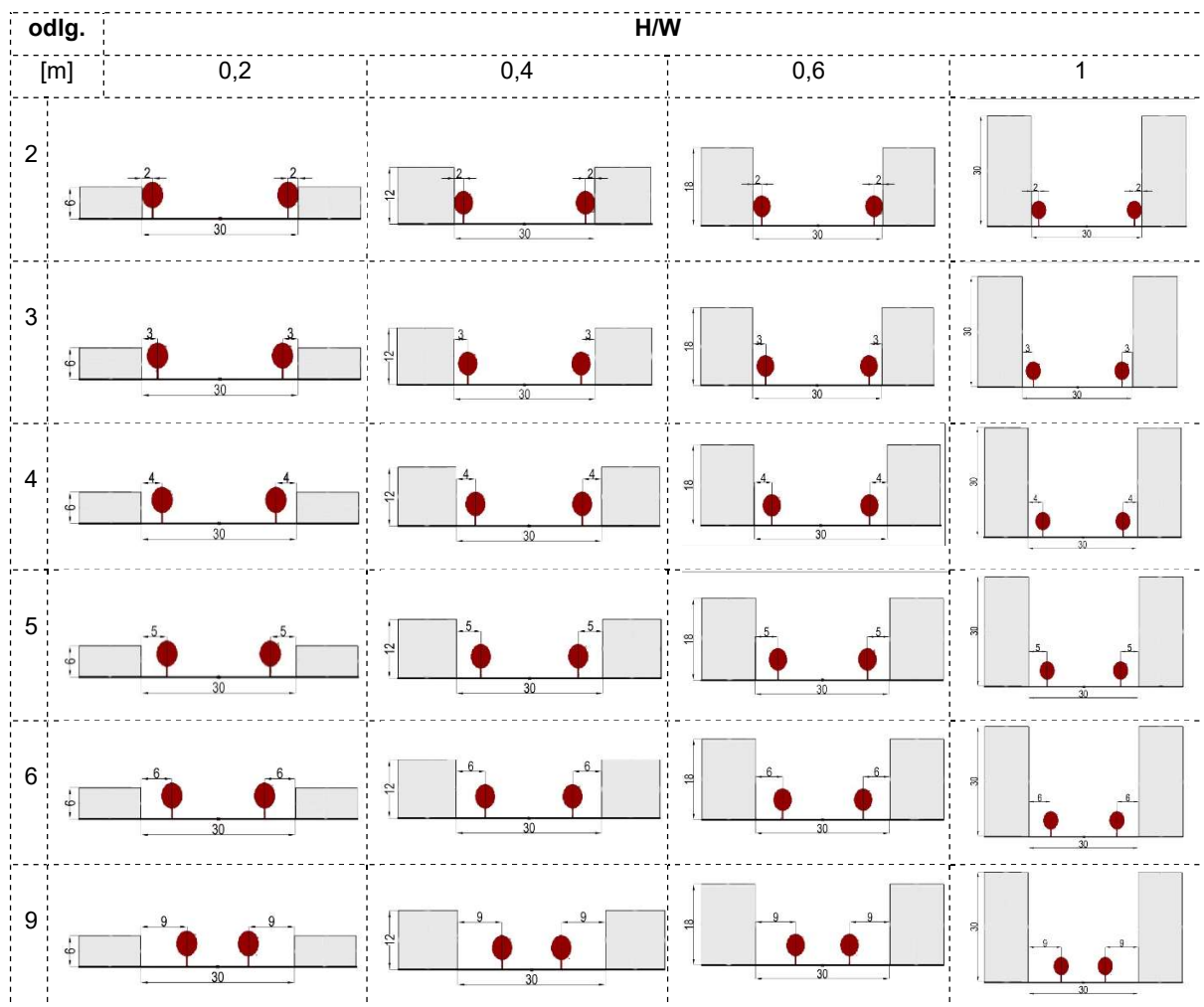
W wypracowanej metodzie nie zakładano definiowania materiałów dla modelu drzew, przyjmując wszystkie jego części jako elementy całkowicie nieprzezierne. Nie uwzględniono także tak szczegółowych parametrów, jak np. wskaźnik odbicia liści, ponieważ z perspektywy prowadzonych symulacji nie ma on istotnego wpływu na wyniki badań¹⁶⁵.

¹⁶³ LAI według Borowskiego i Pstrągowskiej (2015).

¹⁶⁴ Jako wzór dla pola powierzchni modelu liścia przyjęto liść klonu o długości 15 cm i rozpiętości około 17 cm.

¹⁶⁵ Bardziej zasadne jest wykorzystanie szczegółowych parametrów liści w badaniach dotyczących tak złożonych kwestii jak wpływ zieleni na mikroklimat przestrzeni (m.in. Shashua-Bar i in., 2010) czy oddziaływanie roślin na zużycie energii niezbędnej do ogrzewania bądź chłodzenia osłanianego budynku.

Modele drzew ustawiono na prostej linii, tak by tworzyły szpaler równoległy do zabudowy. W zależności od rozpatrywanego wariantu linię oddalono o: 2 m, 3 m, 4 m, 5 m, 6 m i 9 m od brył reprezentujących pierzeję ulicy. Rysunek 51 przedstawia lokalizację zieleni w wytypowanych do badań wariantach modelu ulicy o różnej geometrii zarówno dla orientacji północ-południe, jak i wschód-zachód.

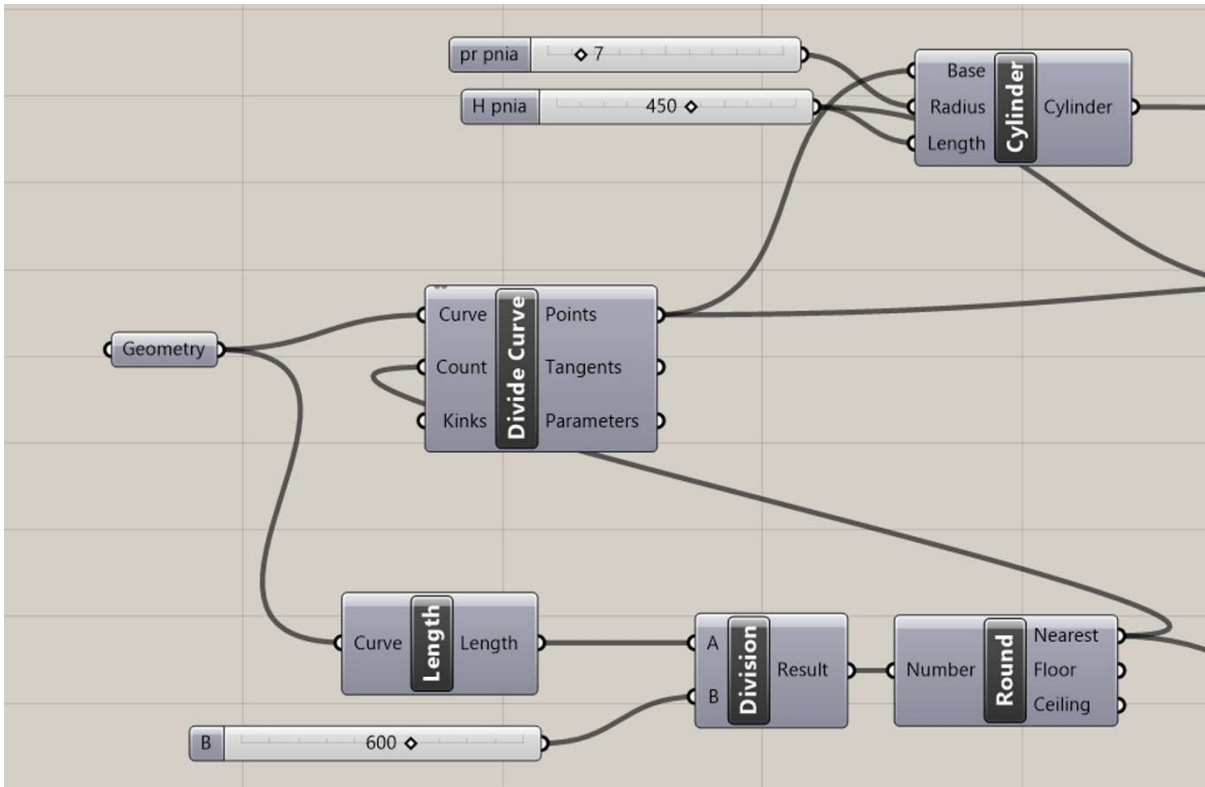


Rysunek 51. Profile wariantów modelu ulicy o różnej odległości [m] szpalerów drzew od pierzei i geometrii zabudowy wykorzystane w badaniach

Źródło: Opracowanie własne.

W Grasshopper na linii za pomocą narzędzia Divide Curve wyznaczono punkty w równych odległościach od siebie, w tym przypadku w odstępie 6 metrów. Za pomocą tych punktów, które stanowią środek podstawy walca, tj. modelu pnia, określono odległość między zielenią w szpalerze (rys. 52)¹⁶⁶. Dystans ten można dowolnie zmieniać, ustawiając dowolną wartość w suwaku odleglosc, przy czym wraz ze zmianą odległości modyfikacji ulega również liczba drzew, ponieważ prosta wyznaczająca długość szpaleru jest stałą daną wejściową.




¹⁶⁶ Linię reprezentującą usytuowanie drzew można w dowolnym momencie zmienić, dzięki czemu badany szpaler zieleni wysokiej może mieć różną formę i długość.



Rysunek 52. Definiowanie odległości pomiędzy modelami drzew w szpalerze
 Źródło: Opracowanie własne.

Rozdział 5. Wynik badań własnych

Wyniki badań przedstawiono dla modeli referencyjnych i układów roślinno-architektonicznych kolejno o orientacji wschód–zachód i północ–południe. Dla uporządkowania danych przyjęto następującą kolejność opisu oraz oznaczanie odpowiednimi symbolami:

- opis metrażu zacienionych powierzchni elewacji [m²] 
- czas trwania zacienienia pierzei [h] 
- informacje o zacienieniu w godzinie 
o największym całkowitym natężeniu promieniowania słonecznego na powierzchni pionowe o wybranej orientacji.

W zakresie powierzchni elewacji zacienionych przez zielen dla różnych wariantów analizowano:

- maksymalną i minimalną powierzchnię zacienienia w dniu 7 czerwca,
- łączną powierzchnię zacienienia, tzn. powierzchnię elewacji, która przez 9 badanych godzin znalazła się w cieniu drzew,
- powierzchnię osłoniętą przed bezpośrednim promieniowaniem słonecznym w ciągu następujących po sobie jednogodzinnych przedziałów czasowych między 8.00 a 17.00,
- powierzchnię zacienienia ścian na poziomie parteru, tj. do 3 m nad terenem i na wysokości I piętra, tzn. od 3 m do 6 m.

Analiza dotycząca czasu trwania zacienienia pierzei przez badany szpaler obejmuje:

- porównanie czasu zacienienia elewacji przez drzewa z czasem ekspozycji słonecznej tych powierzchni,
- minimalną i maksymalną liczbę godzin, w których część powierzchni ścian jest zacieniona,
- godziny, w których zacienienie pierzei jest największe.

5.1. Modele referencyjne

Prace rozpoczęto od przeprowadzenia symulacji godzin nasłonecznienia (SHA) dla układów referencyjnych, tj. dla wybranej ulicy i jej wariantów zdefiniowanych według przyjętych powyżej założeń, bez uwzględnienia zielonych elementów zacieniających. Obserwacja warunków insolacji w tych modelach dla wybranego przedziału czasowego pozwoliła na:

- wytypowanie powierzchni narażonych na długotrwałą ekspozycję słoneczną¹⁶⁷,
- wskazanie korzystnego usytuowania drzew (ze względu na ich rolę zacieniającą) dla badanych wariantów geometrii ulicy i jej lokalizacji względem stron świata,
- analizę powierzchni zacienienia elewacji przez zabudowę.

Zestawienie i porównanie danych z symulacji dla modeli referencyjnych i dla układów z zielenią umożliwiło ocenę zmian w powierzchni zacieniania pierzei ulicy przez drzewa.

5.1.1. Zacienienie elewacji przez zabudowę



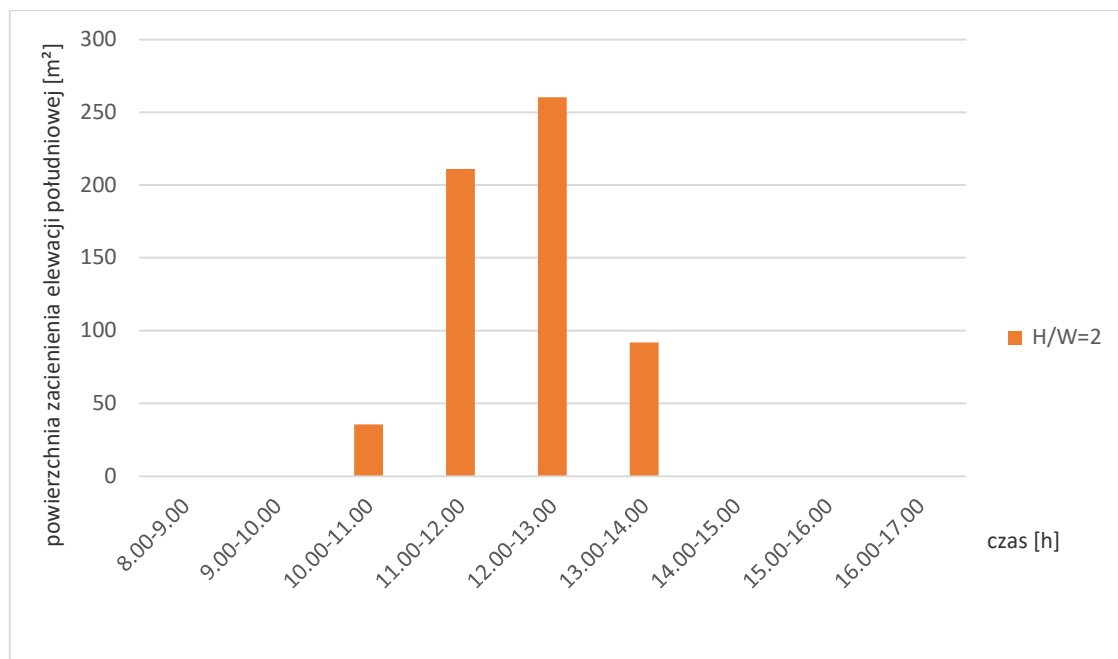
Przeprowadzona analiza godzin nasłonecznienia (SHA) wariantów modelu referencyjnego wykazała, że narażone na długotrwałą ekspozycję słoneczną są przede wszystkim południowe pierzeje ulicy na osi **wschód–zachód**. W tych ulicach dla godzin od 8.00 do 17.00 odnotowano:

- brak zacienienia południowych elewacji przez przeciwległą zabudowę w wariantach o płytkich profilach, tj. o $H/W \leq 0,6$, i tych o $H/W = 1$,
- częściowe zacienienie południowych ścian ulicy dla modelu o głębokim przekroju o $H/W = 2$ (rys. 53),

W tym przypadku południowa pierzeja jest zacieniona co najmniej w 1,48%, maksymalnie do 10,85% powierzchni przez 4 z 9 godzin ekspozycji słonecznej. Przy czym od 29% do 88% powierzchni elewacji parteru pozostaje osłonięte przed bezpośrednim promieniowaniem.

- zacienienie ścian północnych niezależnie od geometrii badanych układów.

¹⁶⁷ Powierzchnie wyeksponowane na promieniowanie słoneczne przez cały czas między 8.00 a 17.00 lub przez przeważającą (ponad 50%) jego część.



Rysunek 53. Powierzchnia zacielenia elewacji południowej przez przeciwległą zabudowę w modelu ulicy na osi wschód–zachód z zabudową wysokościową i parametrem $H/W = 2$ w wybranej lokalizacji w dniu 7 czerwca w godzinach 8.00–17.00

Źródło: Opracowanie własne.



Dla godziny o największym natężeniu bezpośredniego promieniowania słonecznego na powierzchnię pionową o orientacji południowej¹⁶⁸ w dniu 7 czerwca, tj. między 10.00 a 11.00:

- elewacja południowa pozostaje w pełnej ekspozycji słonecznej w ulicach o profilach płytkich ($H/W \leq 0,6$) i z zabudową wysoką o $H/W = 1$,
- przeciwległa zabudowa zacielenia w sumie niecałe 30% południowych ścian parteru (do wysokości 3 m) w przypadku modelu o parametrze proporcji $H/W = 2$.



Natomiast w układach referencyjnych na osi **południe–północ** czas ekspozycji słonecznej pierzei ulicznych jest krótszy niż dla orientacji wschód–zachód. W tym przypadku budynki w różnym stopniu osłaniają się przed bezpośrednim promieniowaniem słonecznym przez (tab. 27):

- maksymalnie 55% badanego czasu w modelach o płytkich profilach, o $H/W \leq 0,6$,
- nie więcej niż 66% czasu między 8.00 a 17.00 w układach o parametrze $H/W = 1$,
- $\frac{3}{4}$ czasu w przypadku ulic o przekroju głębokim, gdzie $H/W = 2$.

¹⁶⁸ Według informacji udostępnionych przez Ministerstwo Inwestycji i Rozwoju dotyczących typowych lat meteorologicznych i statystycznych danych klimatycznych do obliczeń energetycznych – w lokalizacji Płock Trzepowo w dniu 7 czerwca w godzinie między 10.00 a 11.00 odnotowano największe całkowite natężenie promieniowania słonecznego na powierzchnię pionową o orientacji południowej (541,8–619,1 W/m²).



Tabela 27. Liczba godzin, w których pierzeje modelu referencyjnego na osi północ-południe są zacienione w 100%, częściowo lub pozostają w pełnej ekspozycji słonecznej, tj. przez 9 godzin

Pierzeja	H/W	Liczba godzin, w których elewacja jest zacieniona w 100%	Liczba godzin, w których elewacja jest zacieniona częściowo	Pow. częściowo zacieniona [m ²]	Godziny, w których pow. jest częściowo zacieniona	Liczba godzin, w których elewacja jest w pełnej ekspozycji słonecznej*
wschodnia	2	5	2	538,08–1141,0	8.00–10.00	2
	1	5	1	163,0	8.00–9.00	3
	≤0,6	5	0	0	–	4
zachodnia	2	4	3	316,46–1510,43	14.00–17.00	2
	1	4	2	48,0–388,96	15.00–17.00	3
	≤0,6	4	0	0	–	5

* Pełna ekspozycja słoneczna elewacji oznacza 100% powierzchni, która pozostaje niezacieniona przez cały czas, dla którego przeprowadzono symulację SHA.

Źródło: Opracowanie własne.



Z kolei w dniu 7 czerwca podczas godziny o największym bezpośrednim natężeniu promieniowania słonecznego na powierzchnię pionową o orientacji wschodniej, tj. między 8.00 a 9.00, pierzeja **wschodnia**¹⁶⁹:

- jest wyeksponowana na słońce w 100% w wariantach, gdzie wskaźnik proporcji $H/W \leq 0,6$,
- jest zacieniona przez przeciwległą zabudowę w blisko 14% w układzie o $H/W = 1$,
- jest zacieniona w blisko 48%¹⁷⁰ przez przeciwległą zabudowę w ulicy o głębokim profilu ($H/W = 2$).

W tym okresie w przypadku modelu o parametrze $H/W = 2$ blisko 1141 m² powierzchni elewacji wschodniej¹⁷¹ pozostaje częściowo w cieniu zachodniej pierzei, w tym 100% powierzchni ścian do wysokości 3 m.

Natomiast między 14.00 a 15.00¹⁷², kiedy bezpośrednie natężenie promieniowania słonecznego na powierzchnię pionową o orientacji **zachodniej** osiąga największą wartość w dniu 7 czerwca:

- pierzeja zachodnia pozostaje całkowicie nieosłonięta przed bezpośrednim promieniowaniem słonecznym w modelach o $H/W \leq 1$,

¹⁶⁹ Według danych z polskiego Ministerstwa Inwestycji i Rozwoju dotyczących typowych lat meteorologicznych i statystycznych danych klimatycznych do obliczeń energetycznych budynków dla wybranej stacji Płock Trzepowo największe całkowite natężenie promieniowania słonecznego na powierzchnie pionowe o orientacji wschodniej dla dnia 7 czerwca między godziną 8.00 a 9.00 wynosi od 489,0 W/m² do 544,0 W/m².

¹⁷⁰ Dokładnie 47,54% powierzchni pozostaje w cieniu pierzei zachodniej.

¹⁷¹ Dokładnie 538,08 m², tj. 22,42% powierzchni pierzei wschodniej, jest zacienione przez zabudowę znajdującą się po drugiej stronie ulicy.

¹⁷² Według danych z polskiego Ministerstwa Inwestycji i Rozwoju dotyczących typowych lat meteorologicznych i statystycznych danych klimatycznych do obliczeń energetycznych budynków dla wybranej stacji Płock Trzepowo największe całkowite natężenie promieniowania słonecznego na powierzchnie pionowe o orientacji zachodniej dla dnia 7 czerwca między godziną 14.00 a 15.00 wynosi od 597,6 W/m² do 604,90 W/m².



- zachodnie ściany są częściowo zacienione przez przeciwległą zabudowę w ulicach o głębokim przekroju ($H/W = 2$).

W przypadku modelu o $H/W = 2$ 13,18% powierzchni zachodniej pierzei pozostaje w cieniu budynków.

Uwzględniając warunki insolacji w rozpatrywanych wariantach modeli referencyjnych, do badań z udziałem drzew wybrano te układy, w których czas pełnej ekspozycji słonecznej pierzei wynosi nie mniej niż 3 z 9 rozpatrywanych godzin (tj. co najmniej 33% badanego czasu) (tab. 28). Przy czym do dalszej analizy nie wybrano ulicy na osi wschód–zachód o głębokim profilu $H/W = 2$, gdzie potrzeba zacieniania dolnych kondygnacji pierzei przez zielen jest wyraźnie mniejsza w porównaniu do pozostałych układów o tej orientacji. W tym przypadku większe znaczenie niż osłona przeciwsłoneczna mogą mieć inne funkcje szpaleru drzew, takie jak m.in.: wpływ na mikroklimat przez ewapotranspirację czy role psychologiczne, socjologiczne¹⁷³. W pozostałych modelach ulic drzewa mogą stanowić główny lub uzupełniający element zacieniający dla części wyeksponowanych na słońce elewacji.

Tabela 28. Procentowy udział czasu, w którym elewacje są w pełnej ekspozycji słonecznej w dniu 7 czerwca między godziną 8.00 a 17.00 dla wybranej lokalizacji. Wyróżniono te pola dla których czas pełnej ekspozycji słonecznej elewacji pierzei wynosi co najmniej 30% badanego czasu

Orientacja ulicy	Pierzeja	H/W	≥80% badanego czasu	≥40% badanego czasu	≥30% badanego czasu	≥20% badanego czasu
wschód–zachód	południowa	2		X		
		1	X			
		≤0,6	X			
północ–południe	wschodnia	2				X
		1			X	
		≤0,6		X		
	zachodnia	2				X
		1			X	
		≤0,6		X		

Źródło: Opracowanie własne.

Za powyższym wyborem wariantów do dalszych badań przemawiają również dane uzyskane z symulacji godzin nasłonecznienia terenu ulicy¹⁷⁴. Obszar pomiędzy przeciwległymi pierzejami może być narażony na długotrwałą ekspozycję słoneczną zwłaszcza w ulicach o orientacji **wschód–zachód** i parametrze $H/W \leq 1$ (rys. 54).

Dla płtykich przekrojów przy $H/W \leq 0,6$ oraz z parametrem proporcji H/W równym 1 w ciągu 9 badanych godzin łącznie w cieniu zabudowy pozostaje od 11,33% do 57,29% powierzchni

¹⁷³ W wariacie modelu na osi wschód–zachód i o wskaźniku proporcji H/W równym 2 pierzeja południowa pozostaje w znacznej części niezacieniona z racji przyjętej wysokości zabudowy równej 60 m. Wprowadzenie drzew nie przełoży się na zwiększoną ochronę przed bezpośrednim promieniowaniem słonecznym w skali całej elewacji z uwagi na rozmiar zastosowanych elementów ochrony przeciwsłonecznej.

¹⁷⁴ Teren ulicy nie był przedmiotem badań, jednak przeprowadzona analiza pozwoliła na dokładniejsze poznanie warunków insolacji w badanych modelach.

podłogi¹⁷⁵. Z kolei w przypadku układu o głębokim profilu, tj. $H/W = 2$, przez 9 godzin zabudowa ulicy zacięniła w sumie całą powierzchnię terenu. Przy czym blisko $\frac{3}{4}$ tej powierzchni¹⁷⁶ pozostaje w cieniu zabudowy przez nie więcej niż 5 godzin.

Natomiast w modelach referencyjnych na osi **północ–południe** (rys. 54):

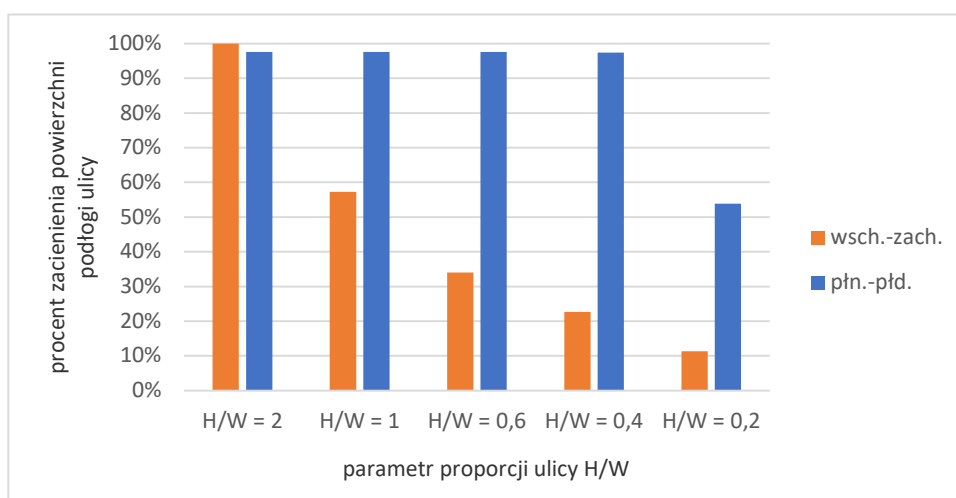
- w układzie o bardzo płytkim profilu o $H/W = 0,2$ teren jest osłonięty przed bezpośrednią insolacją łącznie w około 50%,

W tym modelu z zabudową niską ($H = 6$ m) $645,88$ m², tj. 53,82% powierzchni terenu pomiędzy pierzejami ulicy, jest łącznie zacięniowane w ciągu 9 godzin, dla których przeprowadzono symulację. W tym 96,45% łącznej powierzchni zacięniowanej to teren osłonięty przez zabudowę maksymalnie przez 4 z 9 godzin, a blisko $\frac{1}{3}$ tej powierzchni pozostaje w cieniu tylko przez 1 godzinę.

- w wariantach o parametrze H/W równym 0,4; 0,6; 1 i 2 teren jest w sumie zacięniowany przez 9 godzin prawie w całości (97,56% powierzchni).

Przy czym jedynie dla modeli o $H/W \geq 1$ zauważono, że powierzchnia jest częściowo zacięniowana przez więcej niż połowę czasu, dla którego przeprowadzono symulację godzin nasłonecznienia¹⁷⁷.

Dla ulic o płytkich profilach, o $H/W \leq 0,6$ oraz o $H/W = 1$ ¹⁷⁸, przede wszystkim o orientacji wschód–zachód, ale i północ–południe, wskazane jest wykorzystanie różnego rodzaju rozwiązań zacięniających, w tym m.in. zieleni wysokiej.



Rysunek 54. Procent [%] powierzchni podłogi ulicy w cieniu zabudowy w modelu na osi wzdłuż kierunku wschód–zachód i północ–południe przy różnych parametrach proporcji układu H/W dla badanego przedziału czasowego między 8.00 a 17.00 w dniu 7 czerwca w wybranej lokalizacji

Źródło: Opracowanie własne.

¹⁷⁵ „Podłoga w znaczeniu urbanistycznym jest to teren stanowiący podstawę całego zespołu, dobrze widoczny w części lub całości, pozwalający na odczytanie i odczucie rozległości wnętrza w stosunku do skali człowieka” (Wejchert, 1974: 109).

¹⁷⁶ $890,94$ m², tj. 74,24% powierzchni terenu pomiędzy przeciwległą zabudową badanej ulicy.

¹⁷⁷ Dla wariantu o parametrze proporcji $H/W = 1$ przez co najmniej 5 godzin łącznie 43,71% powierzchni terenu jest zacięniowane przez zabudowę, a w ulicy o głębokim przekroju o $H/W = 2$ – 65,90% powierzchni. Dla ulicy o $H/W = 0,6$ i $0,4$ część powierzchni podłogi ulicy pozostaje zacięniowana przez nie więcej niż 5 godzin między 8.00 a 17.00.

¹⁷⁸ W ulicach o orientacji północ–południe i parametrze $H/W > 1$ odnotowano dyskomfort termiczny jedynie dla krótkiego przedziału czasowego w okolicach południa (Ali-Toudert i Mayer, 2005), stąd nie zdecydowano się na dalszą analizę układów o tej orientacji i parametrze $H/W = 2$.

5.2. Modele ulicy z drzewami jako elementami zacieniającymi elewacje

5.2.1. Drzewa w modelu ulicy na osi wschód–zachód

We wszystkich badanych wariantach modelu zorientowanego wzdłuż kierunku wschód–zachód nie odnotowano istotnego wpływu parametru proporcji H/W na stopień zacienienia wyeksponowanych na słońce elewacji przez szpaler drzew usytuowany równolegle do południowej pierzei (tab. 29).

Istniejące różnice w powierzchni zacienienia ścian budynków przez zielenie pomiędzy modelami o płtykich przekrojach ($H/W \leq 0,6$), a tymi z zabudową wysoką o $H/W = 1$ są nieznaczne (nie przekraczają 2 m^2).



Drzewa, w przyjętych do analiz uwarunkowaniach, w zależności od ich lokalizacji względem południowej pierzei:

- nie stanowią ochrony przed bezpośrednim promieniowaniem słonecznym przy ich usytuowaniu w odległości 5 m lub więcej od pierzei południowej,
- w przypadku najmniejszej z badanych odległości od zabudowy, tj. 2 m, mogą zacienić w sumie przez cały badany czas od 15% do blisko 77% powierzchni południowej elewacji – w zależności od wysokości zabudowy (tab. 29).

Przy tej lokalizacji zieleni wysokiej maksymalna powierzchnia osłonięta przed bezpośrednim promieniowaniem w ciągu badanego okresu wynosi około 122 m^2 , co w zależności od wariantów zabudowy stanowi od 10,25% powierzchni ścian w budynkach wysokich ($H = 30 \text{ m}$) do 50,83% w przypadku niskich ($H = 6 \text{ m}$).

Zauważono, że zwiększenie dystansu roślinnych elementów osłaniających od budynków o 1 m (z 2 m do 3 m) zminimalizowało łączną powierzchnię osłoniętą przed bezpośrednią insolacją o około $\frac{1}{3}$ ¹⁷⁹. Z kolei zachowanie odległości 4 m między zielenią a ścianami południowej pierzei zmniejszyło ponad trzykrotnie (3,47 razy)¹⁸⁰ całkowitą powierzchnię cienia drzew na elewacji odnotowaną w godzinach między 8.00 a 17.00.

W przypadku zmiany lokalizacji drzew względem budynku o 2 m (z 2 m do 4 m) możliwa do osiągnięcia maksymalna powierzchnia zacienienia cień drzew zmniejszyła się prawie 6-krotnie (5,82 razy).

¹⁷⁹ Dla wariantu z zabudową wysoką ($H = 30$ i $H/W = 1$) łączna powierzchnia zacienienia elewacji południowej zmniejszyła się o 34,50%, a w pozostałych przypadkach o 35,06%.

¹⁸⁰ W odniesieniu do łącznej powierzchni cienia drzew na elewacji południowej przy zieleni wysokiej usytuowanej 2 m od osłanianej zabudowy.

Tabela 29. Powierzchnia zacienienia południowo zorientowanej pierzei w wariantach o różnych parametrach proporcji H/W przez szpaler drzew ustawiony w różnej odległości od zabudowy w dniu 7 czerwca w godzinach 8.00–17.00 dla wybranej lokalizacji (Płock)

Odl. drzew od zabudowy [m]	H/W	Min. pow. cienia [m ²]	Max. pow. cienia [m ²]	Łączna pow. zacienienia elewacji przez 9 godzin [m ²]	% pow. elewacji w sumie zacieniony przez drzewa
2	1	96,52	122,96	182,84	15,24%
	0,6	96,84	121,77	184,12	25,57%
	0,4				38,48%
	0,2				76,77%
3	1	19,72	59,0	119,76	9,98%
	0,6	18,57	57,41	119,56	16,61%
	0,4				24,90%
	0,2				49,82%
4	1	4,18	21,48	52,66	4,39%
	0,6	4,24	20,94	51,74	7,18%
	0,4				10,77%
	0,2				21,54%
5, 6, 9	1	0	0	0	0
	0,6				
	0,4				
	0,2				

Źródło: Opracowanie własne.

Tabela 30. Powierzchnia zacienienia elewacji parteru o powierzchni 120 m² południowo zorientowanej pierzei w wariantach o różnych parametrach proporcji H/W przez szpaler drzew ustawiony w różnej odległości od zabudowy w dniu 7 czerwca w godzinach 8.00–17.00 dla wybranej lokalizacji (Płock)

Odl. drzew od zabudowy [m]	H/W	Min. pow. cienia [m ²]	Max. pow. cienia [m ²]	Łączna pow. zacienienia elewacji parteru przez 9 godzin [m ²]	% pow. elewacji parteru w sumie zacieniony przez drzewa
2	1	66,60	90,20	119,88	99,90%
	0,6	67,30	88,92	119,92	99,93%
	0,4				
	0,2				
3	1	19,72	56,36	113,24	94,37%
	0,6	18,57	56,48	113,13	94,28%
	0,4				
	0,2				
4	1	4,18	21,48	52,66	43,88%
	0,6	4,24	20,94	51,74	43,12%
	0,4				
	0,2				
5, 6, 9	1	0	0	0	0
	0,6				
	0,4				
	0,2				

Źródło: Opracowanie własne.

Przeprowadzona analiza wykazała, że przyjęta do badań forma zieleni może zapewnić ochronę przeciwsłoneczną dla ponad 90% powierzchni ścian parteru¹⁸¹ przy usytuowaniu roślin w odległości 2 m i 3 m od zabudowy (tab. 30).

Odnotowano, że w tych układach zmiana lokalizacji drzew z 2 m do 3 m nie powoduje znacznych różnic w sumarycznej powierzchni zacielenia parteru przez zieleń. Drzewa zlokalizowane 2 m od południowej pierzei ulicy zacieleniają przez cały okres symulacji od 56% do 74% ścian do wysokości 3 m, co łącznie daje 99,90% powierzchni elewacji parteru objętej ochroną przed bezpośrednim promieniowaniem słonecznym (tab. 30). Niewiele mniej, bo także ponad 90% elewacji parteru, jest w sumie osłonięte przez drzewa w przypadku ich usytuowania w odległości 3 m, przy maksymalnym zacieleniu nieprzekraczającym 47,07% powierzchni.

Z kolei zieleń wysoka oddalona o 4 m od południowej pierzei ulicy w sumie może zacielenić połowę mniejszy metraż – do 43,88% powierzchni ścian parteru w porównaniu do szpaleru zlokalizowanego bliżej (2 m i 3 m).

Dane zawarte w tabelach 29 i 30 wskazują, że drzewa o przyjętych parametrach mogą zacielenić część ścian powyżej poziomu parteru, tj. powyżej 3 m, o ile nie będą oddalone o 4 m od osłanianej elewacji. Jedynie bardzo bliskie zlokalizowanie drzew, tj. 2 m od pierzei południowej, może stanowić dodatkowy element ochrony przeciwsłonecznej elewacji I piętra¹⁸².

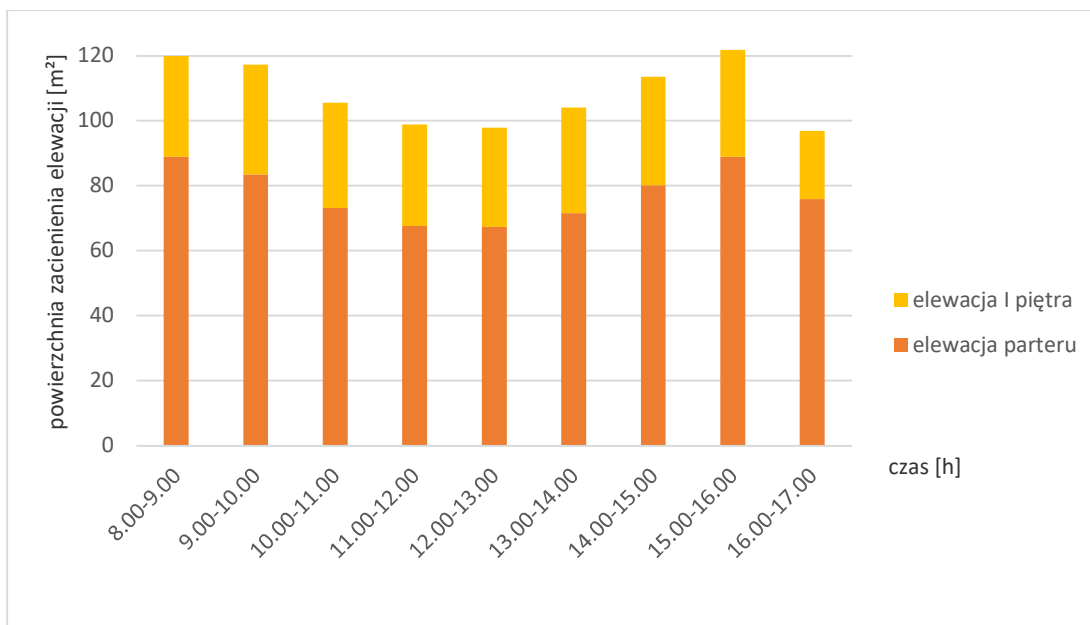
Drzewa znajdujące się 2 m od zabudowy mogą zacielenić w sumie do 53,50% powierzchni¹⁸³ ścian I piętra przez cały czas, dla którego przeprowadzona została symulacja, uwzględniając wszystkie rozpatrywane profile ulicy (rys. 55). Odsunięcie szpaleru o jeden metr od południowej pierzei powoduje znaczny, bo 10-krotny spadek zakresu osłonięcia ścian przed bezpośrednim promieniowaniem słonecznym na poziomie I piętra przez zieleń¹⁸⁴ (rys. 56). Ponadto przy tej odległości czas, w którym powierzchnia elewacji I piętra jest częściowo zacieleniona przez drzewa, skrócił się z 9 do 4 godzin.

¹⁸¹ Przyjęto wysokość ściany parteru równą 3 m.

¹⁸² Według przyjętych założeń I piętro jest na poziomie 3 m i ma wysokość równą 3 m.

¹⁸³ 20,98 m² do 33,85 m² powierzchni południowej elewacji I piętra może zostać zacielenione przez szpaler 20-25-letnich klonów oddalony o 2 m od zabudowy w modelu ulicy zorientowanej wschód–zachód w zależności od parametru H/W.

¹⁸⁴ W sumie 5,35% powierzchni elewacji na poziomie I piętra pozostaje w cieniu drzew w ciągu badanego przedziału czasowego od 8.00 do 17.00.



Rysunek 55. Powierzchnia parteru oraz I piętra elewacji południowej zacienniona przez szpaler 20-25-letnich klonów jawor zlokalizowanych w ulicy o kierunku wschód–zachód i parametrze H/W równym 0,6 w odległości 2 m od zabudowy w dniu 7 czerwca w godzinach 8.00–17.00 w wybranej lokalizacji

Źródło: Opracowanie własne.



Rysunek 56. Powierzchnia parteru oraz I piętra elewacji południowej zacienniona przez szpaler 20-25-letnich klonów jawor zlokalizowanych w ulicy o kierunku wschód–zachód i parametrze H/W równym 0,6 w odległości 3 m od zabudowy w dniu 7 czerwca w godzinach 8.00–17.00 w wybranej lokalizacji

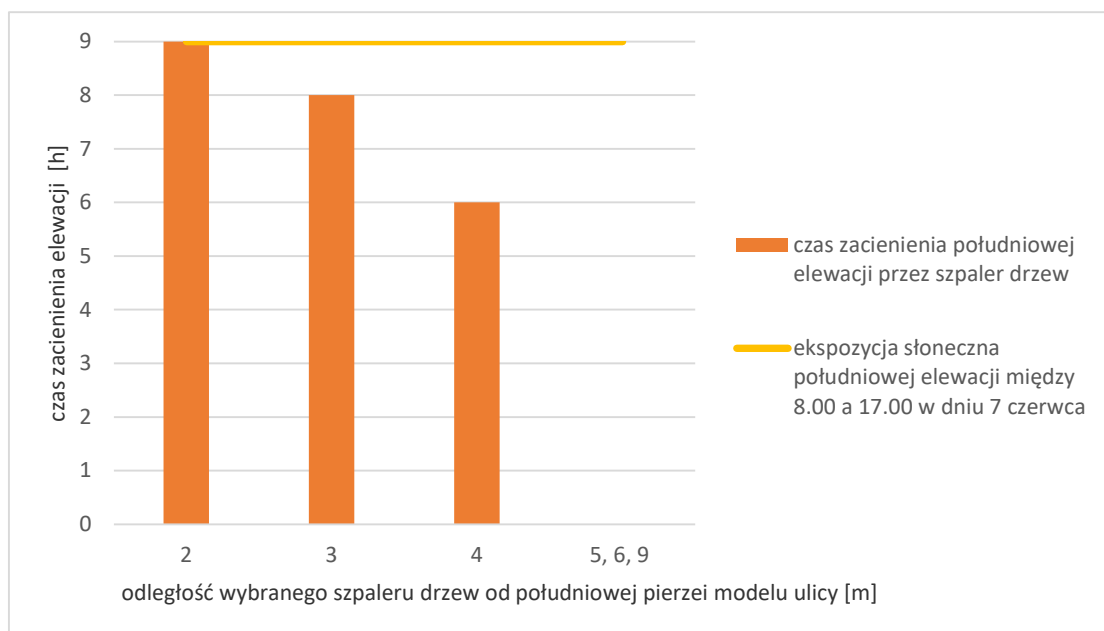
Źródło: Opracowanie własne.



We wszystkich rozpatrywanych wariantach profilów ulic południowe elewacje są w różnym stopniu zacienione przez zieleni przez co najmniej 66% czasu w godzinach 8.00–17.00 (rys. 57). 20-25-letnie klony jawor mogą w ciągu dnia stanowić długotrwałą ochronę przed bezpośrednim promieniowaniem słonecznym dla południowych elewacji, o ile ustawione są bardzo blisko ścian, tj. 2 m i 3 m (rys. 57).

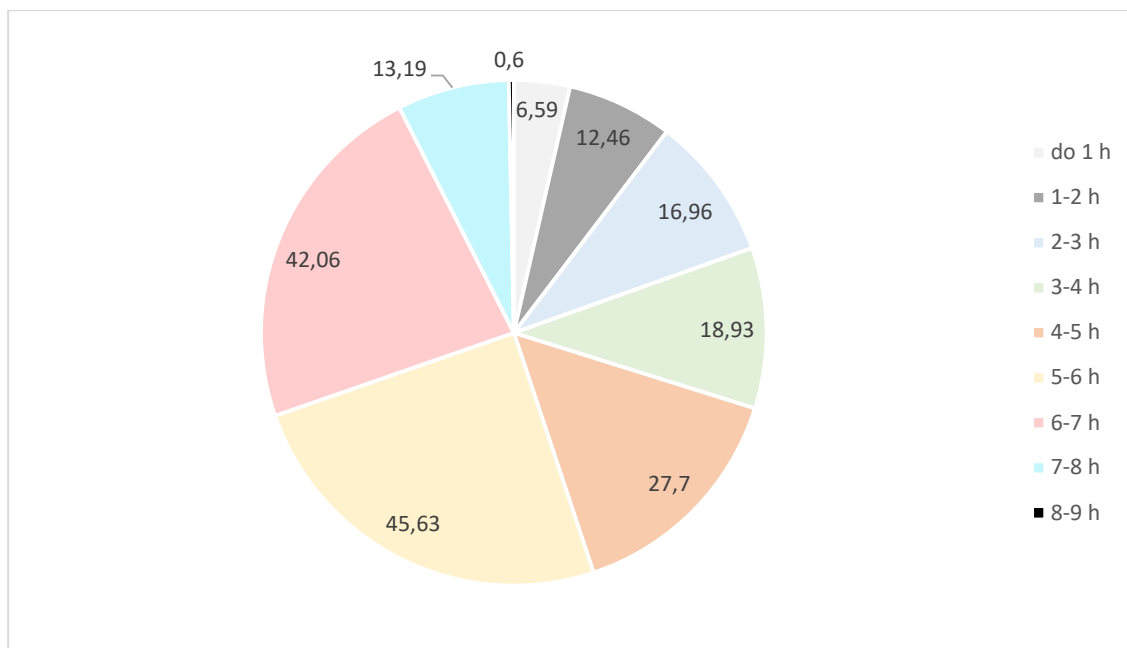
W tym co najmniej przez połowę czasu ekspozycji słonecznej, tj. minimum przez 5 godzin, drzewa oddalone o 2 m od zabudowy zacieniają około 101 m² powierzchni pierzei południowej, a te odsunięte o 3 m – mniej niż 30 m² (28,67 m²). Natomiast przez co najmniej 44% badanego czasu, tj. przez 4 godziny, drzewa zlokalizowane 2 m od zabudowy zacieniają blisko 130 m² powierzchni południowej elewacji, a w przypadku zachowania 3-metrowej odległości przez ten czas osłonięte będzie około 28 m² (rys. 58 i 59). Z kolei przy ustawieniu szpaleru klonów w odległości 4 m od zabudowy najdłuższy czas, w którym część elewacji pozostaje w cieniu, wynosi 4 godziny (rys. 60).

Analiza wykazała również, że przy usytuowaniu drzew w odległości 2 m od zabudowy największa powierzchnia zacieniona przez te rośliny będzie osłonięta przez 5 do 6 godzin (rys. 58). Zwiększenie o 1 m dystansu między zielenią a osłanianymi budynkami nie tylko zmniejsza zakres elewacji objęty ochroną przeciwsłoneczną, ale też skraca ten czas dwukrotnie (rys. 59). Natomiast lokalizacja drzew w odległości 4 m od południowej pierzei zapewni największe zacienienie ścian elewacji przez 1 godzinę (rys. 60).

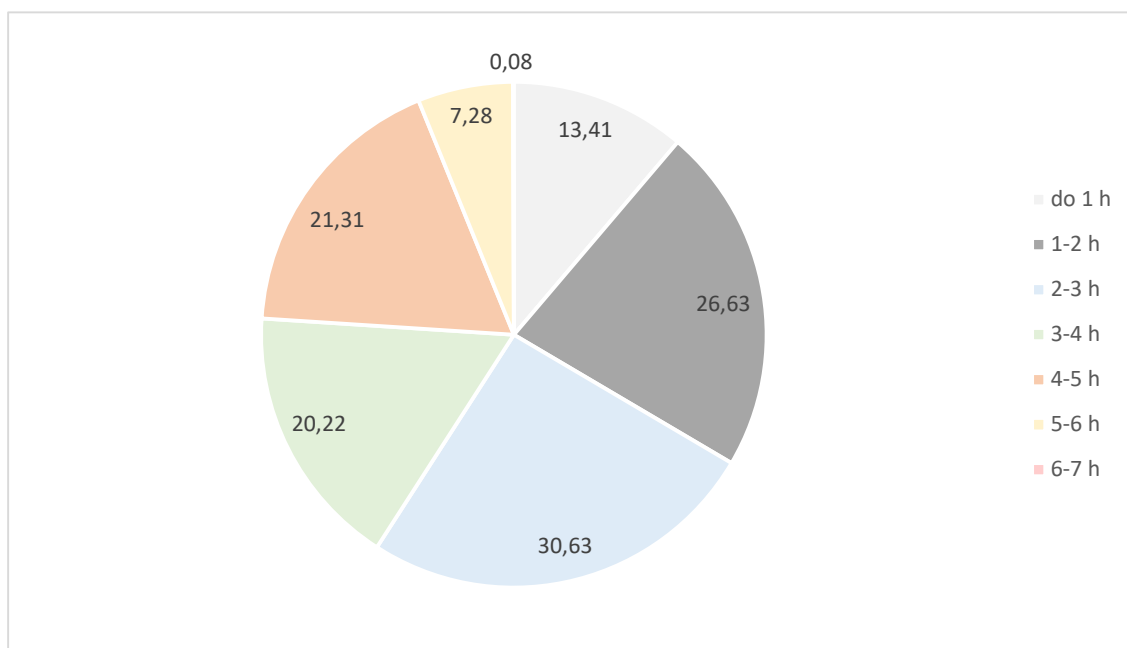


Rysunek 57. Czas zacienienia pierzei zwróconej ku południu przez szpaler 20-25-letnich drzew (*Acer pseudoplatanus*) ustawionych w różnych odległościach [m] od osłanianej zabudowy dla przedziału czasu od godziny 8.00 do 17.00 w dniu 7 czerwca w wybranej lokalizacji

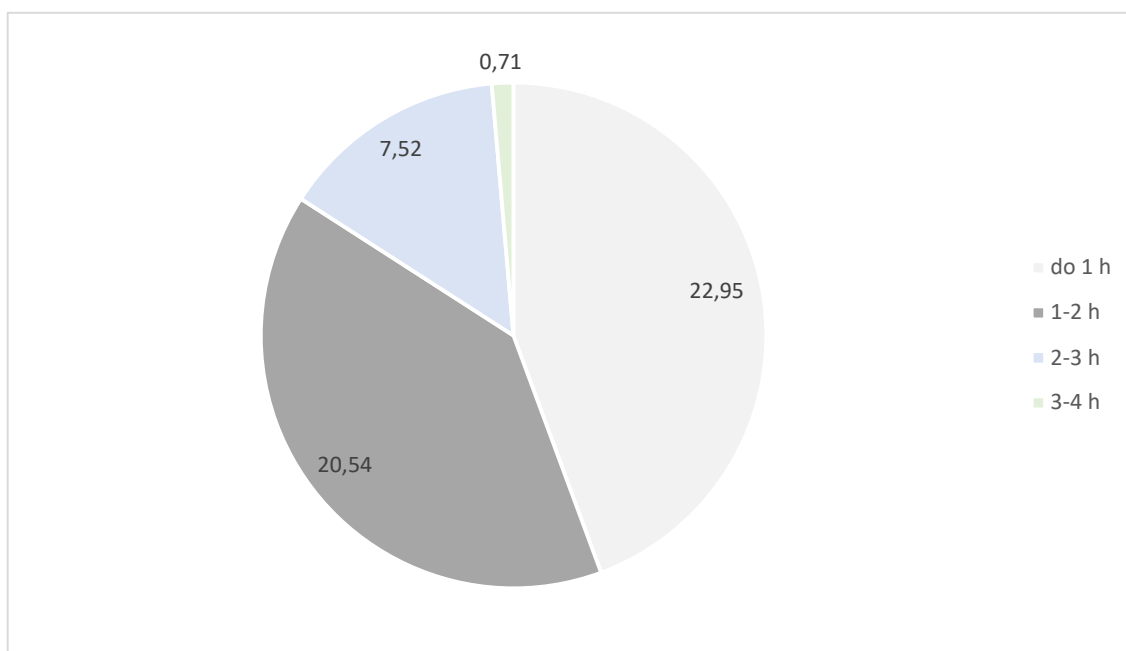
Źródło: Opracowanie własne.



Rysunek 58. Schemat obrazujący powierzchnię i długość zacienienia pierzei południowej przez szpaler drzew w odległości 2 m od zabudowy w godzinach między 8.00 a 17.00 w dniu 7 czerwca dla wybranej lokalizacji
Źródło: Opracowanie własne.



Rysunek 59. Schemat obrazujący powierzchnię i długość zacienienia pierzei południowej przez szpaler drzew w odległości 3 m od zabudowy w godzinach między 8.00 a 17.00 w dniu 7 czerwca dla wybranej lokalizacji
Źródło: Opracowanie własne.

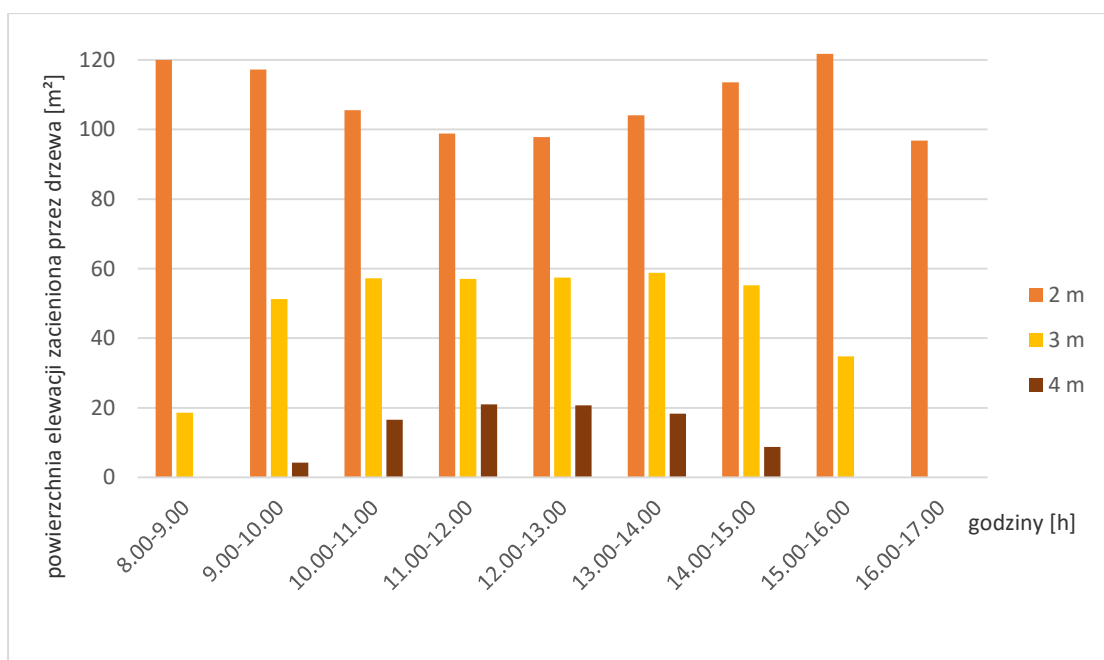


Rysunek 60. Schemat obrazujący powierzchnię i długość zacienienia pierzei południowej przez szpaler drzew w odległości 4 m od zabudowy w godzinach między 8.00 a 17.00 w dniu 7 czerwca dla wybranej lokalizacji
Źródło: Opracowanie własne.

W rozpatrywanych wariantach modelu ulicy na osi wschód–zachód godziny, w których zieleń wysoka zapewnia największe zacienienie elewacji, są różne w zależności od lokalizacji zieleni (rys. 61):

- dla drzew w odległości 2 m od zabudowy okres ten przypada w godzinach 15.00–16.00,
- dla drzew oddalonych o 3 m od ścian – między 13.00 a 14.00,
- najwcześniej, bo od 11.00 do 12.00, przy zachowaniu dystansu 4 m.

Największe różnice w powierzchni zacieniania pomiędzy rozpatrywanymi wariantami z zielenią w odległości: 2 m, 3 m i 4 m od zabudowy odnotowano w godzinach 8.00–10.00 oraz 14.00–17.00 (rys. 61). Z kolei najmniejsze różnice w powierzchni zacieniania południowych ścian występują w przypadku lokalizacji drzew w odległości 3 m od zabudowy między 9.00 a 15.00.



Rysunek 61. Powierzchnia zacienienia elewacji południowej pierzei ulicy na osi wschód–zachód na przykładzie modelu o $H/W \leq 0,6$ przez drzewa zlokalizowane w odległości 2 m, 3 m i 4 m w dniu 7 czerwca w godzinach 8.00–17.00 w wybranej lokalizacji
Źródło: Opracowanie własne.



W godzinach o największym całkowitym natężeniu promieniowania słonecznego na powierzchni pionowej o orientacji południowej (powyżej 400 W/m^2)¹⁸⁵, tj. od 8.00 do 13.00¹⁸⁶, przyjęta w badaniach zieleń osłania te elewacje przed bezpośrednim promieniowaniem słonecznym przy usytuowaniu jej w odległości 2 m, 3 m oraz 4 m od zewnętrznych ścian budynków (rys. 61).

W przypadku szpaleru drzew w odległości 4 m od zabudowy ochrona przed bezpośrednim promieniowaniem słonecznym jest zapewniona od godziny 9.00 i w znacznie mniejszym zakresie¹⁸⁷.

Natomiast w czasie, gdy całkowite natężenie promieniowania słonecznego na powierzchni pionowej o orientacji południowej osiąga maksymalną wartość w ciągu dnia, tj. między 10.00 a 11.00, wybrana zieleń:

- może osłaniać od 46% do 60% ścian¹⁸⁸ na poziomie parteru przy usytuowaniu jej blisko pierzei, tzn. w odległości 2 m bądź 3 m,

¹⁸⁵ Przyjęto sześć najwyższych wartości natężenia promieniowania słonecznego na powierzchni pionowej o orientacji południowej w dniu 7 czerwca dla wybranej lokalizacji.

¹⁸⁶ Dane według polskiego Ministerstwa Inwestycji i Rozwoju dotyczące typowych lat meteorologicznych i statystycznych danych klimatycznych do obliczeń energetycznych budynków dla wybranej stacji Płock Trzepowo w dniu 7 czerwca.

¹⁸⁷ Szpaler 20-25-letnich klonów jawor (*Acer pseudoplatanus*) oddalony od zabudowy o 4 m może zaciemnić w tym czasie od 3 do blisko 28 razy mniejszą powierzchnię wyeksponowanej na słońce elewacji niż w przypadku drzew zlokalizowanych w odległości 2 m i 3 m.

- może zaciemnić nie więcej niż 14% powierzchni elewacji parteru w przypadku jej lokalizacji w odległości 4 m od zabudowy.

Ponadto w badaniach odnotowano, że w wariantach modelu na osi wschód–zachód dwa szpalery drzew zlokalizowane równoległe do zabudowy w większym stopniu zaciemniają pierzeję ulicy niż teren jedynie w przypadku ich lokalizacji bardzo blisko budynków, tj. 2 m (tab. 30). W przypadku pozostałych odległości, tj.:

- dla 3 m od zabudowy – 40% łącznej powierzchni zaciemnionej przez zieleń przypada na południowe ściany, z wyjątkiem ulicy o płytkim profilu o $H/W = 0,2$, gdzie około $1/4$ całego cienia rzucanego przez rośliny osłania ściany,
- dla 4 m od zabudowy – ponad $3/4$ całkowitej powierzchni cienia drzew osłania teren ulicy bez względu na badany profil.

W tym wariantcie nie więcej niż 16% całkowitej powierzchni zaciemnionej przez zieleń otrzymują południowe elewacje w modelach o profilach płytkich z $H/W = 0,2$ i $0,4$.

Tabela 31. Udział procentowy całkowitej powierzchni cienia rzucanego przez rozpatrywaną w badaniach zieleń na ściany i podłogę modelu ulicy o różnych wariantach parametru proporcji H/W w dniu 7 czerwca w godzinach 8.00–17.00

Odl. drzew od zabudowy [m]	H/W	% całego zaciemnienia przez zieleń przypadający na południową pierzeję	% całego zaciemnienia przez zieleń przypadający na teren w liniach rozgraniczających ulicy
2	1	60,23%	39,77%
	0,6	60,40%	39,60%
	0,4	60,14%	39,89%
	0,2	58,06%	41,94%
3	1	42,76%	57,24%
	0,6	42,72%	57,28%
	0,4	37,77%	62,23%
	0,2	26,33%	73,67%
4	1	20,82%	79,18%
	0,6	20,52%	79,48%
	0,4	15,81%	84,19%
	0,2	11,12%	88,88%

Źródło: Opracowanie własne.

5.2.2. Modele ulicy na osi północ–południe

Przeprowadzona symulacja godzin nasłonecznienia (SHA) ulicy na osi północ–południe wskazała różnice w stopniu zaciemnienia wschodnich i zachodnich elewacji przez drzewa pomiędzy modelami o parametrze proporcji H/W równym 1 a pozostałymi wariantami o bardziej płytkich profilach, tj. z $H/W \leq 0,6$ ¹⁸⁹ (tab. 32 i 33).

¹⁸⁸ Dokładnie 60,91% powierzchni elewacji parteru jest osłonięte przed bezpośrednim promieniowaniem słonecznym przez szpaler zlokalizowany 2 m od zabudowy, a 46,63% powierzchni w przypadku lokalizacji zieleni o 1 m dalej.

¹⁸⁹ Przy jednakowych odległościach roślinnych elementów zaciemniających od zabudowy w poszczególnych wariantach modelu.

We wszystkich rozpatrywanych przypadkach szpalery 20-25-letnich klonów jawor nie zapewniają osłony dla wyeksponowanych na słońce elewacji przy ich równoległej lokalizacji w odległości 9 m od budynków (tab. 32 i 33).



W modelach ulic o orientacji północ-południe i o parametrze proporcji $H/W = 1$ drzewa, w przyjętych do badań uwarunkowaniach (tab. 32 i 33):

- mogą zacienić ponad 10% powierzchni wyeksponowanych na słońce ścian zabudowy wysokiej o $H = 30$ m przy najbliższej z badanych odległości, tj. 2 m od zabudowy,

W sumie przez cały badany okres zieleń może osłonić przed bezpośrednim promieniowaniem słonecznym ponad 130 m² pierzei wschodniej¹⁹⁰ oraz 136 m² zachodniej.

- mogą w niewielkim stopniu zapewnić ochronę przeciwsłoneczną dla elewacji w przypadku ich usytuowania w odległości 5 m i 6 m od budynków.

Szpalery 20-25-letnich klonów jawor w tym przypadku w przeciągu badanego czasu zacienia w sumie maksymalnie do 2,75% powierzchni pierzei.

W tym wariantcie modelu zwiększenie odległości zielonych elementów ochrony przeciwsłonecznej:

- o 1 m od pierzei, tj. z 2 m do 3 m, zmniejsza łączną powierzchnię zacienienia elewacji wschodnich o 30%, a zachodnich o blisko 24%,
- dwukrotnie (z 2 m do 4 m) – prowadzi do zmniejszenia łącznej powierzchni cienia o ponad połowę na elewacji wschodniej (54,85%) i zachodniej (50,11%).

Dla pozostałych wariantów geometrii ulic o kierunku północ-południe o profilach płytkich, tj. przy $H/W \leq 0,6$, odnotowano (tab. 32 i 33):

- od blisko 20% do ponad 60% powierzchni pierzei wschodniej, jak i zachodniej zacienionej przez drzewa oddalone o 2 m od ścian w zależności od wariantu wysokości zabudowy,
- możliwość częściowej osłony wyeksponowanych na słońce elewacji przy oddaleniu szpalery drzew do 6 m od osłanianych powierzchni.

Drzewa w odległości 5 m od zabudowy w przeciągu badanego czasu mogą w sumie zacienić od 9% do 27% powierzchni wschodniej elewacji, a zachodniej – od 12% do 37% w zależności od wysokości budynków. Natomiast w modelach o przekrojach bardzo płytkich, o $H/W = 0,2$, zieleń oddalona o 6 m od pierzei może zapewnić osłonę dla maksymalnie 17,42% powierzchni elewacji wschodnich i blisko 30% zachodnich.

W tych układach zmiana lokalizacji wybranej do badań zieleni wysokiej jako elementu zacieniającego:

¹⁹⁰ Od 131,79 m² w modelach o $H/W = 1$ do 141,40 m² w pozostałych wariantach.



- o 1 m (z 2 m do 3 m) – powoduje spadek łącznej powierzchni zacienienia na elewacjach przez drzewa nie większy niż 20%,

W przypadku pierzei wschodniej odnotowano spadek równy 17,65%, a zachodniej: 12,65%.

- dwukrotnie zwiększająca odległość (z 2 m do 4 m) – prowadzi do 1,6-krotnego spadku łącznej powierzchni zacienionej przez drzewa dla pierzei wschodnich i 1,3-krotnego dla zachodnich,

W tych wariantach badane drzewa oddalone o 4 m od budynków osłaniają mniej niż połowę powierzchni elewacji (maksymalnie blisko 38% powierzchni wschodniej i 47% zachodniej pierzei).

- o 3 m (z 2 m do 5 m) – powoduje spadek łącznej powierzchni zacienionej o ponad połowę dla wschodnich ścian i o 40% dla zachodnich,

W tym przypadku powierzchnia możliwego do osiągnięcia maksymalnego cienia drzew na elewacji zmniejszyła się o 76 m² i o blisko 60 m² odpowiednio dla wschodniej i zachodniej ściany ulicy.

- o 4 m (z 2 m do 6 m) – wpływa na zmniejszenie łącznej powierzchni osłoniętej przez drzewa na ścianach wschodnich o blisko 100 m² (tj. spadek o 70,44%), a dla zachodnich o 80,16 m² (spadek o ponad 50%).

Ponadto przy lokalizowaniu zieleni wysokiej 6 m od zabudowy różnica w maksymalnej powierzchni zacienienia elewacji pomiędzy modelami o różnych profilach ($H/W = 1$ a $H/W \leq 0,6$) może być znaczna – nawet o około 84% dla wschodnich pierzei.

Tabela 32. Powierzchnia zacienienia wschodnio zorientowanej pierzei w ulicy na osi północ-południe w wariantach o różnym parametrze proporcji H/W przez szpaler drzew ustawiony w kilku odległościach od zabudowy w dniu 7 czerwca w godzinach 8.00–17.00

Odl. drzew od zabudowy [m]	H/W	Min. pow. cienia [m ²]	Max. pow. cienia [m ²]	Łączna pow. zacienienia elewacji przez 9 godzin [m ²]	% pow. elewacji w sumie zacieniony przez drzewa
2	1	24,82	111,52	131,79	10,98%
	0,6				19,64%
	0,4	71,24	110,92	141,40	29,46%
	0,2				58,92%
3	1	15,53	83,06	92,27	7,69%
	0,6				16,17%
	0,4	50,48	95,93	116,44	24,26%
	0,2				48,52%
4	1	9,33	54,07	59,50	4,96%
	0,6				12,41%
	0,4	9,40	79,24	89,36	18,62%
	0,2				37,23%
5	1	9,18	25,17	29,73	2,48%
	0,6				9,02%
	0,4	24,72	60,76	64,96	13,53%
	0,2				27,07%
6	1	3,82	6,29	9,18	0,77%
	0,6				5,81%
	0,4	4,08	41,20	41,80	8,71%
	0,2				17,42%
9	1	0	0	0	0
	0,6				
	0,4				
	0,2				

Źródło: Opracowanie własne.

Tabela 33. Powierzchnia zacienienia zachodnio zorientowanej pierzei w ulicy na osi północ-południe w wariantach o różnych parametrach proporcji H/W przez szpaler drzew ustawiony w kilku odległościach od zabudowy w dniu 7 czerwca w godzinach 8.00–17.00

Odl. drzew od zabudowy [m]	H/W	Min. pow. cienia [m ²]	Max. pow. cienia [m ²]	Łączna pow. zacienienia elewacji przez 9 godzin [m ²]	% pow. elewacji w sumie zacienienia przez drzewa
2	1	46,28	111,52	136,08	10,84%
	0,6	46,43	110,11	150,59	20,92%
	0,4				31,37%
	0,2				62,75%
3	1	33,16	76,12	103,28	8,61%
	0,6	33,13	96,77	131,54	18,27%
	0,4				27,40%
	0,2				54,80%
4	1	40,52	41,96	67,88	5,66%
	0,6	41,37	88,32	111,72	15,52%
	0,4				23,28%
	0,2				46,55%
5	1	10,12	21,68	33,1	2,75%
	0,6	11,10	75,74	90,33	12,55%
	0,4				18,82%
	0,2				37,64%
6	1	15,20	15,20	5,34	0,45%
	0,6	29,23	62,03	70,43	9,78%
	0,4				14,15%
	0,2				29,35%
9	1	0	0	0	0
	0,6				
	0,4				
	0,2				

Źródło: Opracowanie własne.

Przeprowadzona analiza wykazała, że w modelu ulicy na osi północ-południe i parametrze **H/W = 1** powierzchnia elewacji parteru przez 9 godzin może być w sumie zacieniona co najmniej w połowie:

- jedynie przez zieleń zlokalizowaną blisko budynku, tj. 2 m i 3 m w przypadku pierzei wschodniej (tab. 34),
- przez drzewa usytuowane nie dalej niż 4 m od ścian dla elewacji zachodnich (tab. 35).

Natomiast przy odsunięciu szpalera 5 m lub więcej od zabudowy łącznie w cieniu drzew pozostaje mniej niż $\frac{1}{3}$ powierzchni ścian do wysokości 3 m zarówno wschodniej, jak i zachodniej pierzei. Z kolei zlokalizowanie w tym układzie zieleni wysokiej 6 m od budynków w niewielkim stopniu wpływa na ochronę przeciwsłoneczną elewacji na poziomie parteru.

Szpaler 20-25-letnich klonów jawor oddalony o 6 m od zabudowy w ciągu całego czasu, dla którego prowadzone były badania, może zacienić w sumie 7,65% powierzchni wschodniej elewacji parteru i 4,45% zachodniej.

Dla ulicy o profilu płytkim, gdzie **H/W ≤ 0,6**, co najmniej połowa powierzchni ścian parteru jest w sumie zacieniona przez drzewa:

- oddalone o od 2 m do 5 m w przypadku pierzei wschodniej (tab. 34),
- zlokalizowane do 6 m od ściany zachodniej ulicy (tab. 35).

Tabela 34. Powierzchnia zacienienia elewacji parteru o powierzchni 120 m² wschodnio zorientowanej pierzei w wariantach o różnych parametrach proporcji H/W przez szpaler drzew ustawiony w różnej odległości od zabudowy w dniu 7 czerwca w godzinach 8.00–17.00

Odl. drzew od zabudowy [m]	H/W	Min. pow. cienia [m ²]	Max. pow. cienia [m ²]	Łączna pow. zacienienia elewacji parteru [m ²]	% pow. elewacji parteru w sumie zacieniony przez drzewa
2	1	9,33	74,09	83,72	69,77%
	0,6	55,52	73,96	88,56	73,80%
	0,4				
0,2					
3	1	9,73	68,18	74,87	62,39%
	0,6	50,24	68,80	85,04	70,87%
	0,4				
0,2					
4	1	9,17	54,07	57,44	47,87%
	0,6	9,40	65,72	75,84	63,20%
	0,4				
0,2					
5	1	8,24	25,17	29,73	24,78%
	0,6	24,72	59,20	63,40	52,83%
	0,4				
0,2					
6	1	3,82	5,47	9,18	7,65%
	0,6	4,08	41,20	41,80	34,83%
	0,4				
0,2					
9	1	0	0	0	0
	0,6				
	0,4				
	0,2				

Źródło: Opracowanie własne.

Tabela 35. Powierzchnia zacienienia elewacji parteru o powierzchni 120 m² zachodnio zorientowanej pierzei w wariantach o różnych parametrach proporcji H/W przez szpaler drzew ustawiony w różnej odległości od zabudowy w dniu 7 czerwca w godzinach 8.00–17.00

Odl. drzew od zabudowy [m]	H/W	Min. pow. cienia [m ²]	Max. pow. cienia [m ²]	Łączna pow. zacienienia elewacji parteru [m ²]	% pow. elewacji parteru w sumie zacieniony przez drzewa
2	1	37,36	72,44	86,96	72,47%
	0,6	38,71	72,44	91,06	75,88%
	0,4				
0,2					
3	1	33,16	67,0	77,60	64,67%
	0,6	33,13	66,73	90,13	75,10%
	0,4				
0,2					
4	1	34,08	40,52	60,24	50,20%
	0,6	41,37	64,80	87,12	72,60%
	0,4				
0,2					
5	1	10,12	21,68	33,1	27,58%
	0,6	11,10	62,24	78,75	65,63%
	0,4				
0,2					
6	1	15,20	15,20	5,34	4,45%
	0,6	29,23	59,90	67,94	56,62%
	0,4				
0,2					
9	1	0	0	0	0
	0,6				
	0,4				
	0,2				

Źródło: Opracowanie własne.



Analiza wykazała, że w układach na osi północ–południe istnieje możliwość wykorzystania zieleni (o parametrach przyjętych w założeniach) do częściowej ochrony przeciwsłonecznej ścian również na wysokości I piętra.

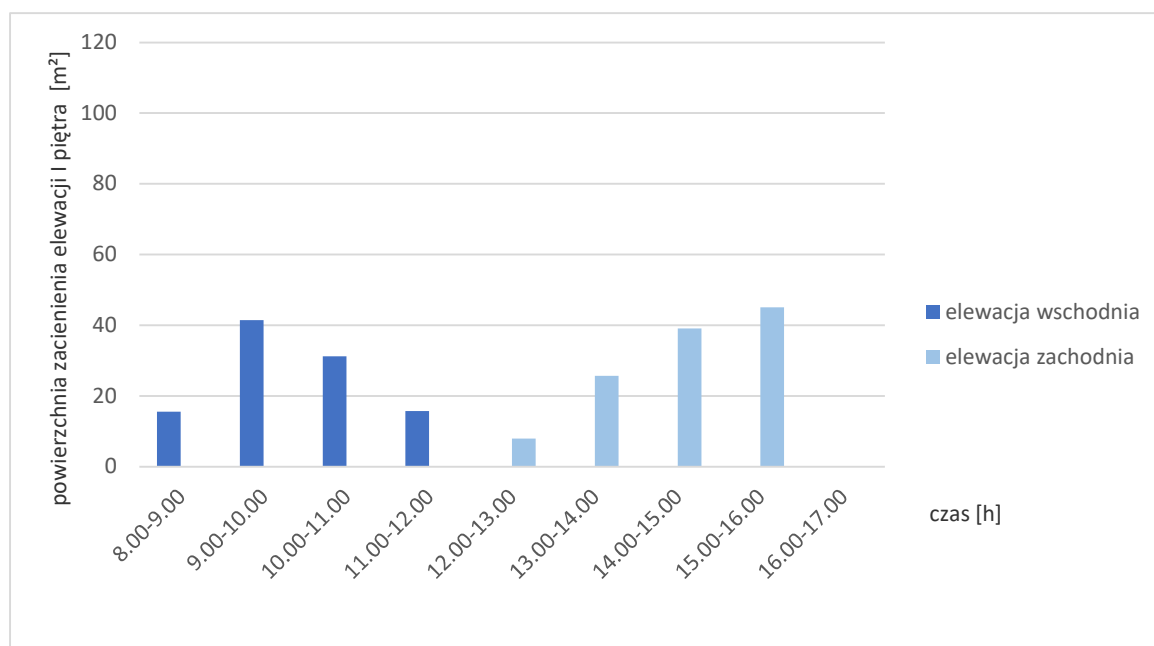
Dla modelu o parametrze H/W równym 1 w ciągu 9 badanych godzin odnotowano częściowe zacinienie ścian wschodnich, jak i zachodnich na wysokości od 3 m do 6 m przy lokalizacji zieleni wysokiej od 2 m do 4 m od budynku (rys. 62, 92 i 93 – załącznik):

- przy czym wyłącznie przy najbliższej odległości, tj. 2 m od zabudowy, drzewa mogą osłonić przed bezpośrednim promieniowaniem słonecznym przez 9 godzin w sumie powyżej $\frac{1}{3}$ powierzchni ścian I piętra (rys. 62),

Drzewa mogą zaciąć przez czas, dla którego przeprowadzono symulację, w sumie 48,07 m² wschodniej elewacji na wysokości I piętra oraz 49,12 m² zachodniej (tab. 33 i 34).

- przy usytuowaniu zieleni 3 m od budynków szpaler może zaciąć łącznie nie więcej niż 14,5% powierzchni wschodnich ścian I piętra i do 21,40% zachodnich (rys. 91 – załącznik),
- oddalenie szpalera 4 m od budynków nie zapewni odpowiedniej ochrony przeciwsłonecznej elewacji I piętra zarówno w przypadku pierzei wschodniej, jak i zachodniej.

Łączna powierzchnia zacięcia wschodniej elewacji I piętra przez drzewa w ciągu 9 godzin, dla których przeprowadzono symulację, wynosi nie więcej niż 1,72% powierzchni, a zachodniej – do 6,37% powierzchni.



Rysunek 62. Powierzchnia zacięcia elewacji na wysokości I piętra przez szpaler drzew zlokalizowany w odległości 2 m od zabudowy w modelu ulicy na osi północ–południe z zabudową wysoką o H/W = 1 w dniu 7 czerwca w godzinach 8.00–17.00 w wybranej lokalizacji

Źródło: Opracowanie własne.

Z kolei w przypadku wariantów ulic o płytkich profilach, tj. o $H/W \leq 0,6$, odnotowano większy zakres odległości, dla których wybrane do symulacji drzewa mogą zapewnić częściową osłonę dla ścian I piętra przed bezpośrednim promieniowaniem słonecznym. Ponadto czas zacielenia pierzei zachodniej wydłużył się o 1 godzinę (od 16.00 do 17.00) w porównaniu do wariantu z zabudową wysoką i wskaźnikiem $H/W = 1$.

Zlokalizowanie roślinnych elementów zacieleniających w odległości 2 m do 5 m od pierzei wschodniej, a w przypadku zachodniej – od 2 m do 6 m pozwala na ochronę w sumie od 1,3% do 44,03% powierzchni ścian wschodnich na wysokości I piętra i zachodnich od 2,08% do 50% w przeciągu badanego okresu (rys. 63 i 93-96 – załącznik).

Zlokalizowanie roślinnych elementów zacieleniających:

- blisko, tj. 2 m, od budynku umożliwia osłonięcie łącznie przez 9 godzin co najmniej $\frac{1}{3}$ powierzchni ścian na poziomie I piętra, podobnie jak w przypadku ulicy o parametrze proporcji $H/W = 1$ (rys. 63),

Przez 9 godzin, dla których przeprowadzono symulację godzin nasłonecznienia (SHA), ochroną przeciwsłoneczną przez drzewa w tej lokalizacji objęte jest łącznie 52,84 m² wschodniej elewacji I piętra (w tym od blisko 4,77% do 41,57% powierzchni) i 59,53 m² zachodniej (od 6,43% do 50,13% powierzchni) (rys. 63).

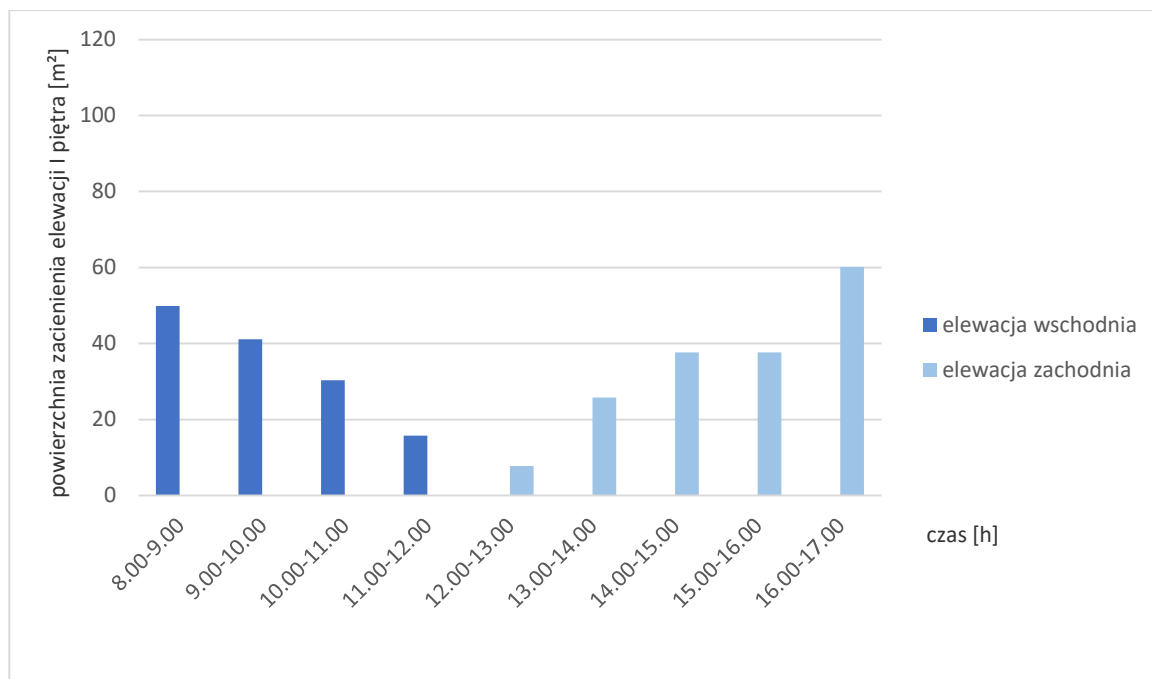
- 3 m od pierzei umożliwia łącznie zacielenie do 26,17% powierzchni ścian wschodnich i 34,51% zachodnich na wysokości od 3 m do 6 m (rys. 93 – załącznik),
- 4 m od budynków prowadzi do zacielenia w sumie nie więcej niż $\frac{1}{5}$ powierzchni elewacji I piętra (rys. 94 – załącznik),

13,52 m² powierzchni wschodniej elewacji powyżej parteru i 24,60 m² ścian zachodnich.

- w odległości 5 m od zabudowy nie zapewni wystarczająco dużej ochrony przeciwsłonecznej dla wschodnich ścian I piętra, z kolei pozwoli osłonić przed bezpośrednim promieniowaniem słonecznym blisko 10% powierzchni zachodnich elewacji na wysokości 3 m do 6 m (rys. 95 – załącznik),

Powierzchnia łącznego zacielenia wschodniej elewacji I piętra przez drzewa w ciągu 9 godzin nie przekracza 2% jej powierzchni.

- 6 m od zabudowy nie zapewni odpowiedniej osłony przed bezpośrednim promieniowaniem słonecznym dla ścian powyżej 3 m – zarówno wschodnich, w przypadku których odnotowano brak zacielenia, jak i zachodnich (2% powierzchni) (rys. 96 – załącznik).



Rysunek 63. Powierzchnia zacienienia elewacji na wysokości I piętra przez szpaler drzew zlokalizowany w odległości 2 m od zabudowy w modelu ulicy na osi północ-południe z zabudową wysoką o $H/W \leq 0,6$ w dniu 7 czerwca w godzinach 8.00–17.00

Źródło: Opracowanie własne.



Symulacja godzin nasłonecznienia (SHA) pierzei ulicy na osi północ-południe wykazała, że w modelach o parametrze proporcji $H/W = 1$ czas zacienienia elewacji **wschodnich** (rys. 64):

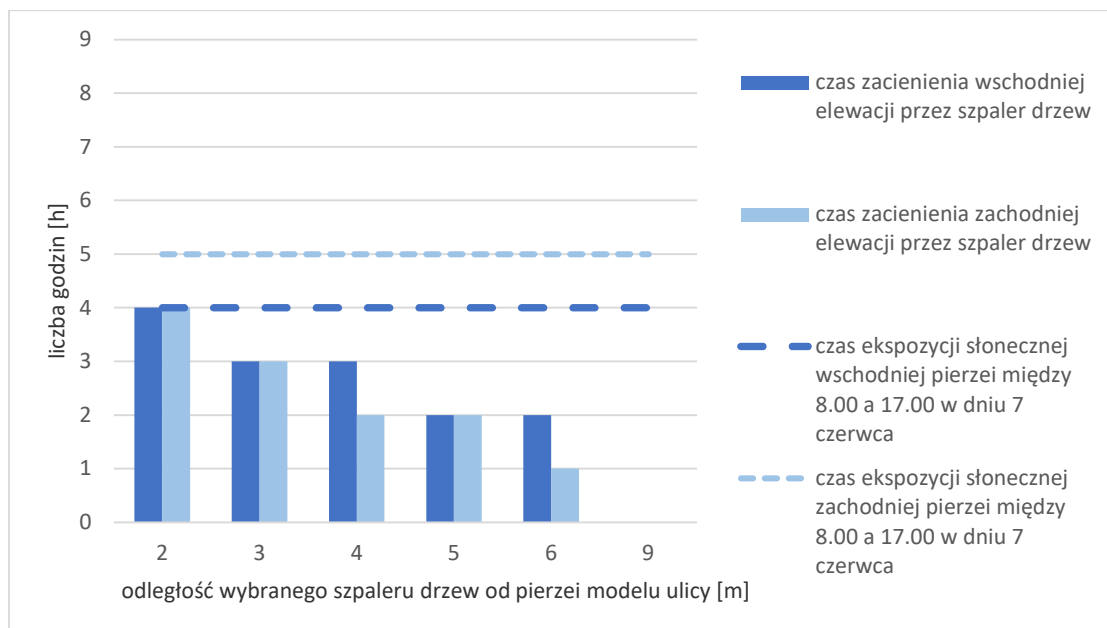
- może być równy ekspozycji słonecznej tych fasad jedynie w przypadku bliskiej lokalizacji zieleni, tj. 2 m od budynków,
- może być większy niż połowa czasu ekspozycji słonecznej tych ścian przy usytuowaniu roślin od 2 m do 4 m od osłanianych powierzchni,
- może być równy połowie czasu ekspozycji słonecznej elewacji przy oddaleniu szpalera od 5 m do 6 m od budynku.

W tym wariantcie oddalenie roślinnych elementów zaciężających o 1 m od zabudowy (z 2 m do 3 m) skutkuje skróceniem czasu osłony przed bezpośrednią insolacją o 1 godzinę. Natomiast w przypadku oddalenia drzew z 3 m do 4 m od pierzei nie odnotowano zmian w długości trwania zacienienia powierzchni (rys. 64).

Z kolei czas trwania zacienienia pierzei **zachodnich** przez szpaler zlokalizowany (rys. 64):

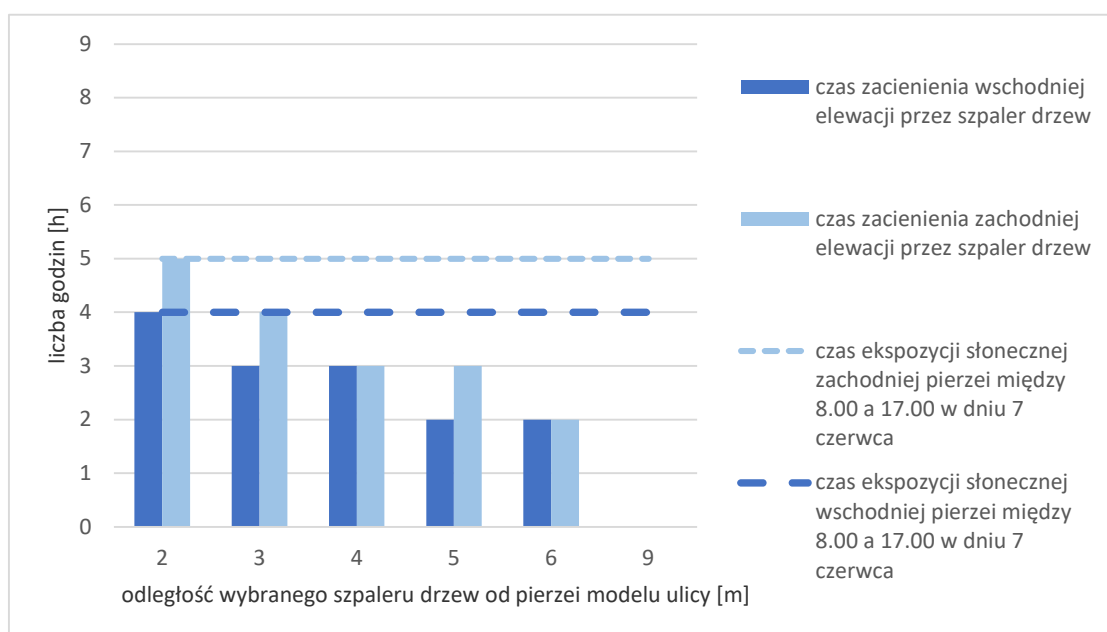
- 2 m od zabudowy jest o godzinę krótszy od czasu ekspozycji słonecznej tych ścian,
- 2 m i 3 m o budynku może wynosić ponad połowę czasu ekspozycji słonecznej elewacji,
- od 4 m do 6 m będzie krótszy niż połowa czasu, w którym pierzeja jest nasłoneczniona.





Rysunek 64. Czas zacieniania pierzei w modelu ulicy na osi północ-południe o $H/W = 1$ przez szpaler 20-25-letnich drzew (*Acer pseudoplatanus*) ustawionych w różnych odległościach od osłanianej zabudowy dla przedziału czasu od godziny 8.00 do 17.00 w dniu 7 czerwca w wybranej lokalizacji

Źródło: Opracowanie własne.



Rysunek 65. Czas zacieniania pierzei w modelu ulicy na osi północ-południe o $H/W \leq 0,6$ przez szpaler 20-25-letnich drzew (*Acer pseudoplatanus*) ustawionych w różnych odległościach od osłanianej zabudowy dla przedziału czasu od godziny 8.00 do 17.00 w dniu 7 czerwca w wybranej lokalizacji

Źródło: Opracowanie własne.

Natomiast w ulicy o profilu płytkim, o $H/W \leq 0,6$, drzewa oddalone o 2 m od zabudowy mogą zacienić elewacje zarówno wschodnie, jak i zachodnie przez tyle godzin, ile trwa ekspozycja słoneczna (rys. 65).

Pomiędzy modelami o parametrze proporcji $H/W = 1$ a tymi o $H/W \leq 0,6$ nie zauważono różnic w czasie zacieniania pierzei wschodnich przez drzewa. Z kolei różnice pojawiły się w przypadku elewacji zachodnich, gdzie w układach o profilach płytkich:

- odnotowano wzrost czasu trwania zacienienia o 1 godzinę w porównaniu do układu z zabudową wysoką,
- drzewa bardziej oddalone od budynków, tj. do 5 m, mogą osłonić ściany przez czas równy bądź większy niż połowa czasu ekspozycji słonecznej tych pierzei.

Dane w tabeli poniżej (tab. 36) przedstawiają wpływ badanej zieleni na wydłużenie czasu zacieniania elewacji w ulicach o przekrojach płytkich, o $H/W \leq 0,6$, i o parametrze proporcji H/W wynoszącym 1.

Tabela 36. Liczba godzin zacienienia całej lub części elewacji pierzei ulicznych w modelach referencyjnych i układach roślinno-architektonicznych z zielenią zlokalizowaną w różnej odległości od zabudowy między godziną 8.00 a 17.00 w dniu 7 czerwca dla wybranej lokalizacji

H/W	Odległość drzew od pierzei	Liczba godzin zacienienia elewacji wsch. w układzie roślinno-architektonicznym	Liczba godzin zacienienia elewacji zach. w układzie roślinno-architektonicznym	Liczba godzin zacienienia elewacji wsch. w modelu referencyjnym	Liczba godzin zacienienia elewacji zach. w modelu referencyjnym
H/W = 1	2	9	9	6	6
	3	8	8		
	4	8	8		
	5	7	7		
	6	7	6*		
H/W ≤ 0,6	2	9	9	5	4
	3	8	8		
	4	8	7		
	5	7	7		
	6	7	6		

* Podobnie jak w modelu referencyjnym pierzeja zachodnia między godziną 8.00 a 17.00 jest zacienniona przez 6 godzin, przy czym po wprowadzeniu drzew większa powierzchnia pozostała w cieniu przez 5 do 6 godzin.

Źródło: Opracowanie własne.

W badaniach odnotowano czas, w którym powierzchnia zacienienia elewacji przez wybrane drzewa jest największa w dniu 7 czerwca w godzinach 8.00–17.00. Godziny te są różne w zależności od lokalizacji roślin i geometrii zabudowy (H/W) (rys. 66-69).

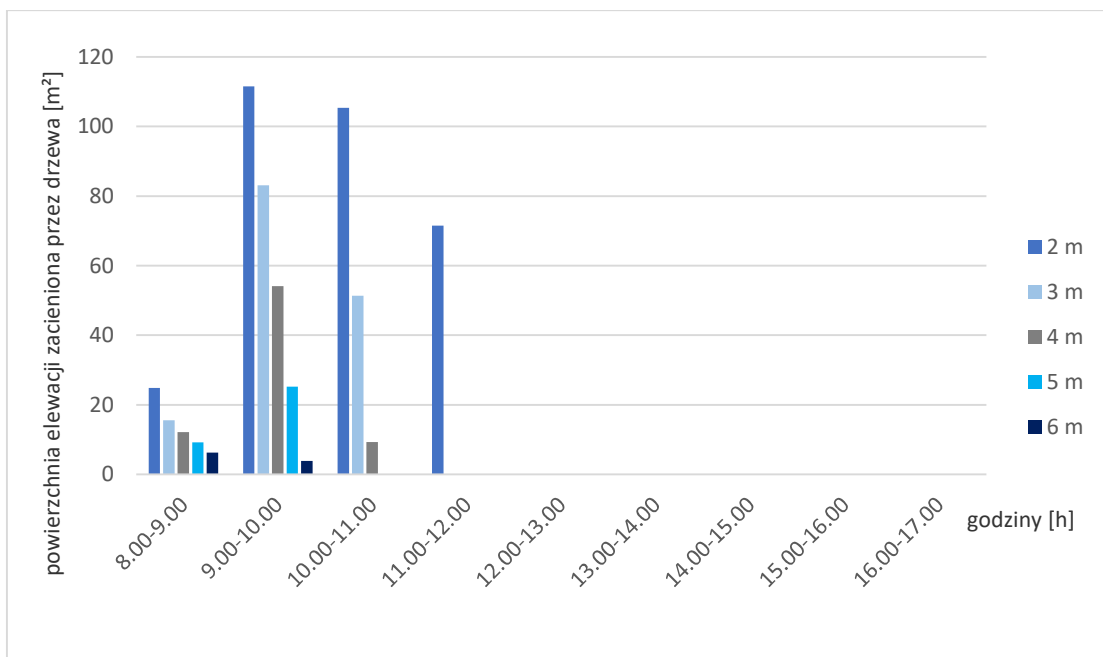
W ulicy o parametrze **$H/W = 1$ dla pierzei wschodnich** (rys. 66):

- zieleń zlokalizowana od 2 m do 5 m od zabudowy zacienna największą część ścian między 9.00 a 10.00,
- szpaler w odległości 6 m od ścian zapewnia największą ochronę przeciwsłoneczną w godzinach 8.00–9.00.

Natomiast największa część **elewacji zachodniej** pozostaje w cieniu drzew (rys. 67):

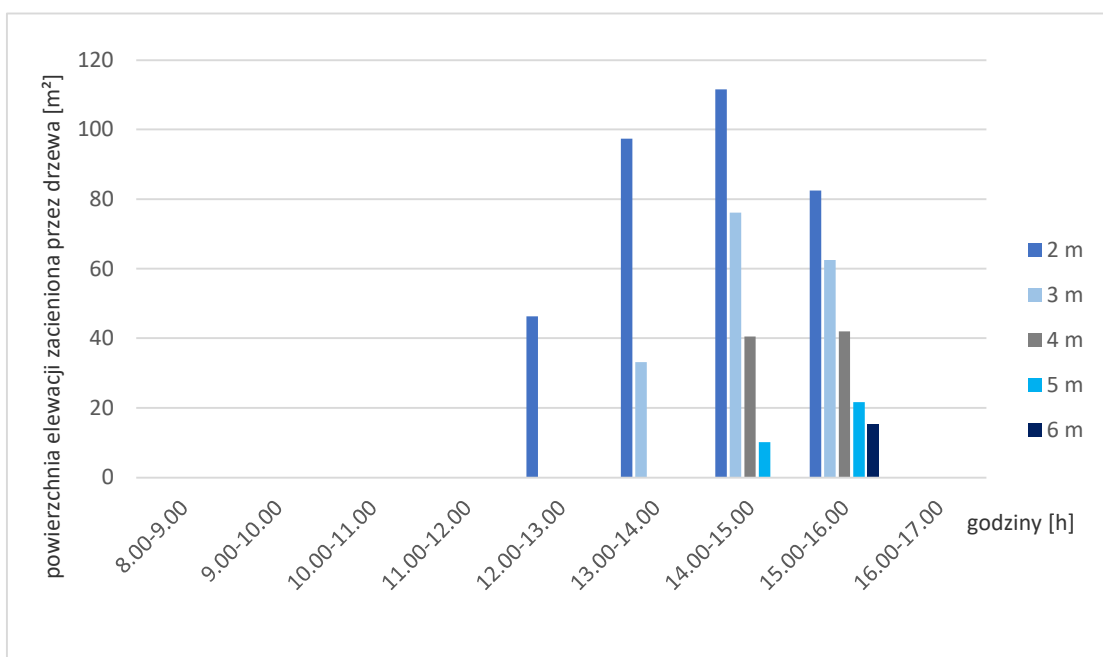
- między 14.00 a 15.00 przy lokalizacji zieleni blisko osłanianych ścian, tj. 2 m bądź 3 m,
- od 15.00 do 16.00 przy usytuowaniu drzew 6 m od pierzei.

Przy czym szpaler drzew odsunięty 6 m od osłanianych powierzchni zapewnia ochronę przeciwsłoneczną tylko przez 1 godzinę.



Rysunek 66. Powierzchnia zacienienia elewacji pierzei wschodniej ulicy na osi północ-południe o H/W równym 1 przez drzewa zlokalizowane w odległości od 2 m do 6 m w dniu 7 czerwca w godzinach 8.00–17.00 w wybranej lokalizacji

Źródło: Opracowanie własne.



Rysunek 67. Powierzchnia zacienienia elewacji pierzei zachodniej ulicy na osi północ-południe o H/W równym 1 przez drzewa zlokalizowane w odległości od 2 m do 6 m w dniu 7 czerwca w godzinach 8.00–17.00 w wybranej lokalizacji

Źródło: Opracowanie własne.

Z kolei w przypadku **wschodnich pierzei** ulicy o płytkich profilach, o $H/W \leq 0,6$, zieleni wysoka zapewnia największe zacienienie (rys. 68):

- od 9.00 do 10.00 przy usytuowaniu jej blisko budynków, tj. w odległości 2 m,
- między 8.00 a 9.00 przy oddaleniu jej o 3 m do 6 m od osłanianych ścian.

W tym wariantcie dla **zachodnich elewacji** (rys. 69):

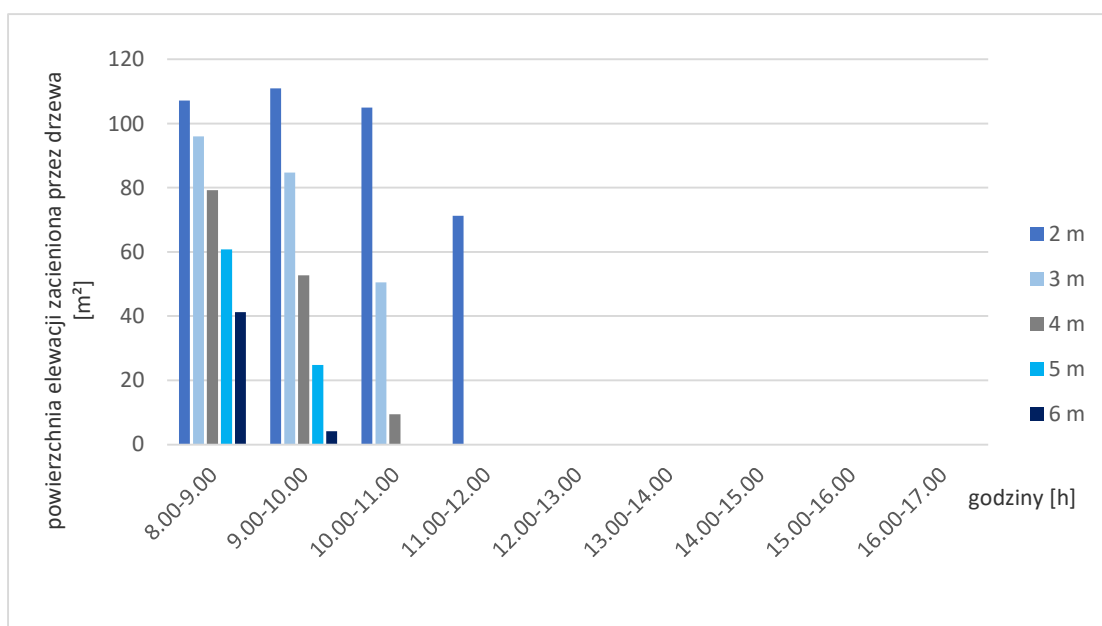
- szpaler klonów blisko budynku, tj. w odległości 2 m, zapewnia największe zacienienie w godzinach 14.00–15.00,
- przy usytuowaniu zieleni od 3 m do 6 m od pierzei maksymalny cień drzew pojawia się między 16.00 a 17.00.

Największy wzrost powierzchni zacieniania wschodniej elewacji przez szpaler klonów usytuowany w tej samej odległości od zabudowy pomiędzy wariantami ulic o różnych wskaźnikach H/W zauważono między godziną 8.00 a 9.00.

W tym czasie w ulicy o profilu płytkim ($H/W \leq 0,6$) dla drzew zlokalizowanych w odległości 2 m od zabudowy odnotowano wzrost powierzchni zacienienia o 76,84%, a dla zieleni oddalonej o 6 m od pierzei – o 84,73% w odniesieniu do układu o $H/W = 1$.

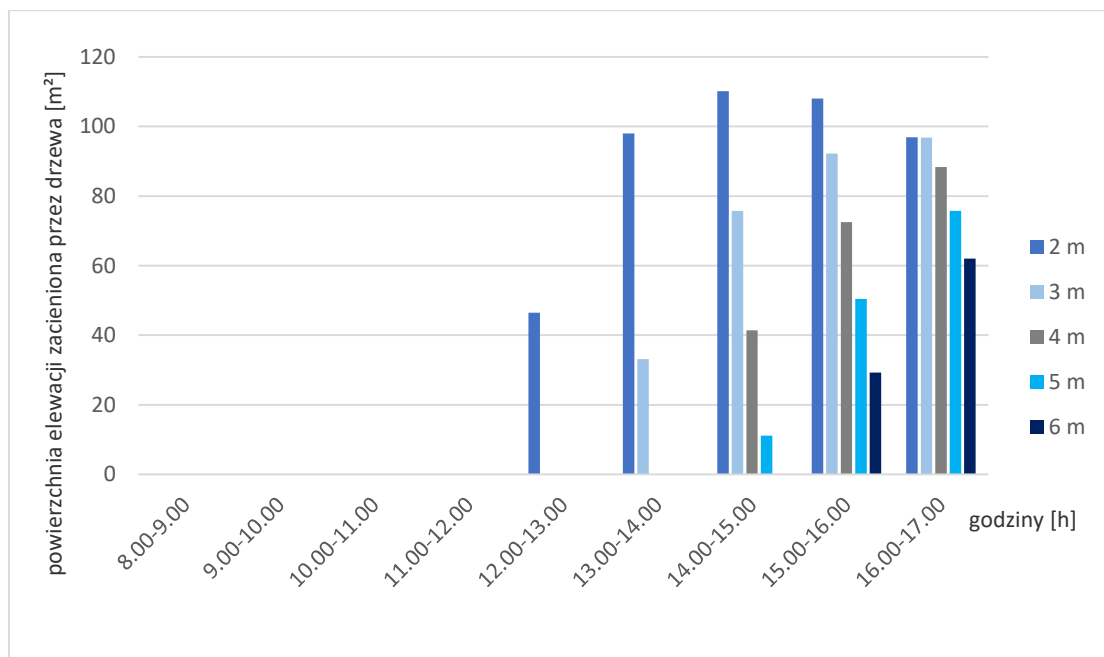
Natomiast największe różnice w powierzchni zacieniania na elewacji zachodniej pomiędzy modelami o $H/W = 1$ a $H/W \leq 0,6$ odnotowano w godzinach 15.00–17.00.

W tym przypadku w ulicy o wskaźniku $H/W \leq 0,6$ między 15.00 a 16.00 dla drzew w odległości 2 m od zabudowy odnotowano wzrost powierzchni zacienienia o 23,65%, a dla zieleni oddalonej o 6 m od pierzei o 48,00% w porównaniu do modelu o $H/W = 1$. Natomiast między 16.00 a 17.00 w wariantcie ulicy o głębszym przekroju drzewa w ogóle nie stanowiły osłony dla wyeksponowanych na słońce elewacji, a w modelach o płytkich profilach zacięniały od 62,03 m² do 96,88 m² w zależności od usytuowania drzew.



Rysunek 68. Powierzchnia zacienienia elewacji pierzei wschodniej ulicy na osi północ–południe o $H/W \leq 0,6$ przez drzewa zlokalizowane w odległości od 2 m do 6 m w dniu 7 czerwca w godzinach 8.00–17.00 w wybranej lokalizacji

Źródło: Opracowanie własne.



Rysunek 69. Powierzchnia zacienienia elewacji pierzei zachodniej ulicy na osi północ-południe o $H/W \leq 0,6$ przez drzewa zlokalizowane w odległości od 2 m do 6 m w dniu 7 czerwca w godzinach 8.00–17.00 w wybranej lokalizacji

Źródło: Opracowanie własne.



W godzinie o największym całkowitym natężeniu promieniowania słonecznego na powierzchni pionowej o orientacji wschodniej (powyżej 400 W/m^2)¹⁹¹, tj. od 8.00 do 9.00 (rys. 70):

- wykorzystana w symulacji zieleń wysoka może stanowić uzupełniający dla przeciwległej zabudowy element zacinający wschodnie elewacje w ulicy o parametrze proporcji $H/W = 1$,

W tym wariantcie geometrii zabudowy drzewa, w przyjętych do badań warunkach, mogą zapewnić dodatkową ochronę przeciwsłoneczną dla 2,07% wschodniej fasady przy ich usytuowaniu blisko budynku, tzn. w odległości 2 m. W przypadku pozostałych rozpatrywanych lokalizacji zieleń wysoka może zaciąć od $6,29 \text{ m}^2$ do $15,53 \text{ m}^2$ wschodniej pierzei, tj. nie więcej niż 1,5% powierzchni ścian¹⁹² zabudowy wysokiej.

¹⁹¹ Według danych polskiego Ministerstwa Inwestycji i Rozwoju dotyczących typowych lat meteorologicznych i statystycznych danych klimatycznych do obliczeń energetycznych budynków dla wybranej stacji Płock Trzepowo w dniu 7 czerwca w godzinach od 7.00 do 9.00 całkowite natężenie promieniowania słonecznego na powierzchni pionowej o orientacji wschodniej wynosi powyżej 400 W/m^2 . Ten przedział czasowy ograniczony został do 1 godziny (8.00–9.00) z racji przeprowadzonej symulacji komputerowej dla 9 godzin od 8.00 do 17.00.

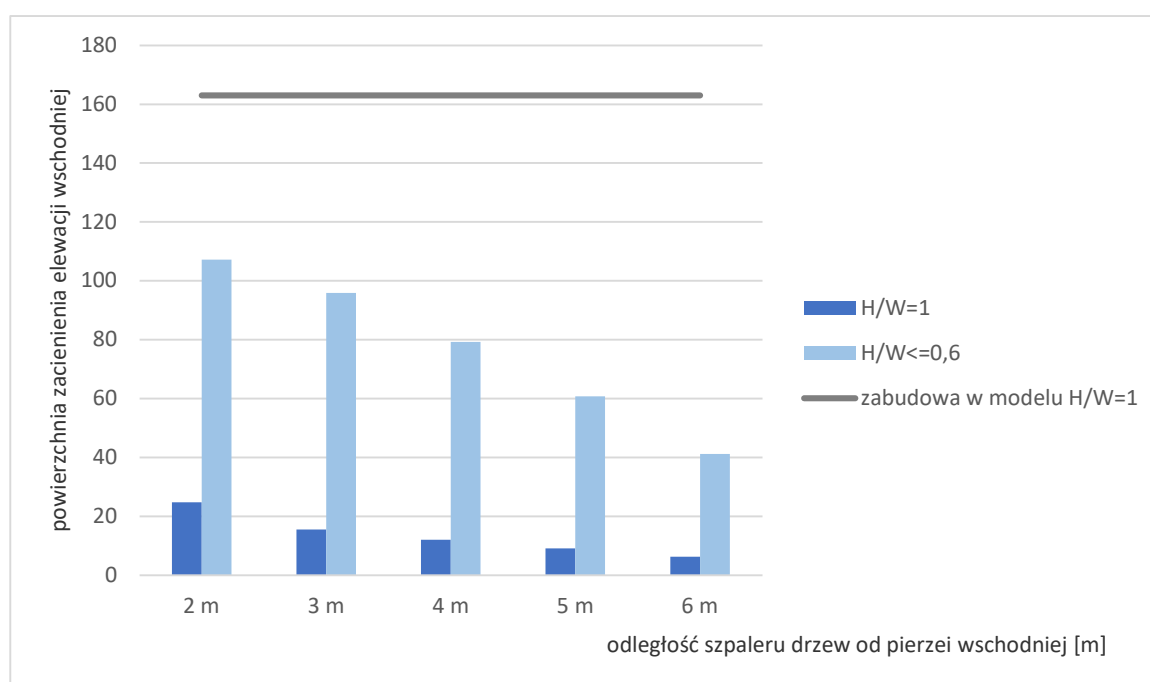
¹⁹² W tych wariantach wyłącznie jeden z sześciu klonów w szpalerze zacinający część wschodnich ścian, podczas gdy pozostałe pozostają w cieniu przeciwległej zabudowy.



- drzewa przy ich usytuowaniu od 2 m do 6 m od zabudowy mogą stanowić jedyny element osłaniający wschodnie ściany ulicy przed bezpośrednim promieniowaniem słonecznym w ulicy o $H/W \leq 0,6$.

W zależności od relacji przestrzennych pomiędzy elementami rozpatrywanego układu roślinno-architektonicznego zieleń może osłonić przed bezpośrednią insolacją od 41,20 m² do 107,16 m² powierzchni tej elewacji.

Ponadto między 8.00 a 9.00 zauważono znaczące różnice w powierzchni zacienienia elewacji wschodniej przez drzewa zlokalizowane w jednakowej odległości pomiędzy wariantami o różnej geometrii zabudowy, jak $H/W = 1$ a $H/W \leq 0,6$ (do blisko 85%).



Rysunek 70. Powierzchnia zacienienia elewacji pierzei wschodniej ulicy na osi północ-południe o różnym parametrze proporcji H/W przez drzewa zlokalizowane w odległości od 2 m do 6 m w godzinie o największym całkowitym natężeniu promieniowania słonecznego na powierzchni pionowej o orientacji wschodniej, tj. między 8.00 a 9.00 w dniu 7 czerwca w wybranej lokalizacji

Źródło: Opracowanie własne.

Z kolei w czasie o największym całkowitym natężeniu promieniowania słonecznego na powierzchni pionowej o orientacji zachodniej (powyżej 400 W/m²)¹⁹³, tj. od 12.00 do 16.00:

- drzewa w modelach o parametrze proporcji $H/W = 1$ mogą być uzupełniającym elementem zaciniającym dla systemów zintegrowanych z budynkiem¹⁹⁴,

W tym wariantcie szpaler blisko budynków, tj. w odległości 2 m, może osłonić przed bezpośrednim promieniowaniem słonecznym od 3,86% do 9,29% powierzchni ścian elewacji. Przy odsunięciu zieleni

¹⁹³ Według danych polskiego Ministerstwa Inwestycji i Rozwoju dotyczących typowych lat meteorologicznych i statystycznych danych klimatycznych do obliczeń energetycznych budynków dla wybranej stacji Płock Trzepowo w dniu 7 czerwca.

¹⁹⁴ Zachodnia pierzeja w tym wariantcie geometrii zabudowy zacinia 4,0% powierzchni przeciwległej fasady między 15.00 a 16.00 w dniu 7 czerwca dla wybranej do badań lokalizacji.

wysokiej o 1 m (do 3 m) zacienione może zostać nie więcej niż 6,34% powierzchni pierzei zachodniej przez 3 z 4 godzin między 12.00 a 16.00. Z kolei przy zachowaniu odległości 4 m i 5 m od budynków drzewa mogą osłonić maksymalnie 3,5% powierzchni zachodniej elewacji przez połowę czasu od 12.00 do 16.00¹⁹⁵. Natomiast w tym przedziale godzin usytuowanie szpaleru 20-25 klonów jawor w odległości 6 m od pierzei zachodniej nie zapewni wystarczającej osłony dla ścian¹⁹⁶.

- dla układów o $H/W \leq 0,6$ wprowadzona zieleń może stanowić jedyną ochronę przeciwsłoneczną części elewacji pierzei ulicznych wyeksponowanych na słońce.

W układach o $H/W \leq 0,6$ zieleń wysoka w odległości 2 m i 3 m może zapewnić ochronę przeciwsłoneczną przez podobny czas jak w ulicy o parametrze $H/W = 1$, tj. co najmniej przez 75% czasu¹⁹⁷ w godzinach między 12.00 a 16.00. Z kolei drzewa oddalone o 4 m i 5 m stanowią ochronę przeciwsłoneczną przez 50% tego czasu. W tym w przypadku 4 m osłaniają od 41,37 m² do 75,52 m², a przy odsunięciu 1 m dalej – od 11,10 m² do 50,45 m² powierzchni elewacji zachodniej. Natomiast zieleń wysoka w odległości 6 m od zachodniej pierzei zacienia 29,23 m² powierzchni ścian przez 1 godzinę między 12.00 a 16.00.

W czasie, kiedy całkowite natężenie promieniowania słonecznego na powierzchnie pionowe o orientacji zachodniej osiąga wartość maksymalną w ciągu dnia, tj. między 14.00 a 15.00¹⁹⁸.

- szpaler klonów równoległy do zachodnio zorientowanej pierzei stanowi jedyny element zacieniający we wszystkich rozpatrywanych wariantach geometrii modelu,

Warunkiem jest usytuowanie zielonych elementów ochrony przeciwsłonecznej bliżej niż 6 m od osłanianych budynków (rys. 71).

- usytuowanie zieleni 2 m bądź 3 m od budynków pozwala na osłonę także ścian powyżej wysokości parteru, tj. 3 m, w każdym z badanych wariantów,

Dla drzew w odległości 2 m od zachodniej pierzei około 32% powierzchni elewacji I piętra jest zacienione niezależnie od badanego parametru H/W . Z kolei przy usytuowaniu zieleni wysokiej 3 m od zabudowy niecałe 8% powierzchni ścian na wysokości od 3 m do 6 m jest zacienione przez rośliny w modelu o $H/W = 1$, jak i $H/W \leq 0,6$.

- zlokalizowanie klonów w odległości od 2 m do 4 m pozwala zaciemnić co najmniej 33% powierzchni elewacji parteru we wszystkich modelach z różnym parametrem proporcji H/W ,

¹⁹⁵ W godzinach, kiedy całkowite natężenie promieniowania słonecznego na powierzchnie pionowe o orientacji zachodniej przekracza 400 W/m², badana forma zieleni w odległości 4 m od zabudowy może zaciemnić od 3,38% do 3,50% powierzchni elewacji zachodniej, a przy oddaleniu jej 5 m od budynku – od 0,84% do 1,81%.

¹⁹⁶ W tym przypadku drzewa (o parametrach przyjętych w pracy) mogą zaciemnić 1,27% powierzchni elewacji przez 1 godzinę między 12.00 a 16.00.

¹⁹⁷ Drzewa oddalone o 2 m od zabudowy mogą w godzinach 12.00–16.00 zaciemnić od 46,43 m² do maksymalnie 110,11 m² powierzchni zachodniej elewacji, a te usytuowane 1 metr dalej – od 33,13 m² do nie więcej niż 92,18 m² powierzchni.

¹⁹⁸ Według danych z polskiego Ministerstwa Inwestycji i Rozwoju dotyczących typowych lat meteorologicznych i statystycznych danych klimatycznych do obliczeń energetycznych budynków dla wybranej stacji Płock Trzepowo największe całkowite natężenie promieniowania słonecznego na powierzchnie pionowe o orientacji zachodniej dla dnia 7 czerwca między godziną 14.00 a 15.00 wynosi od 597,6 W/m² do 604,90 W/m².

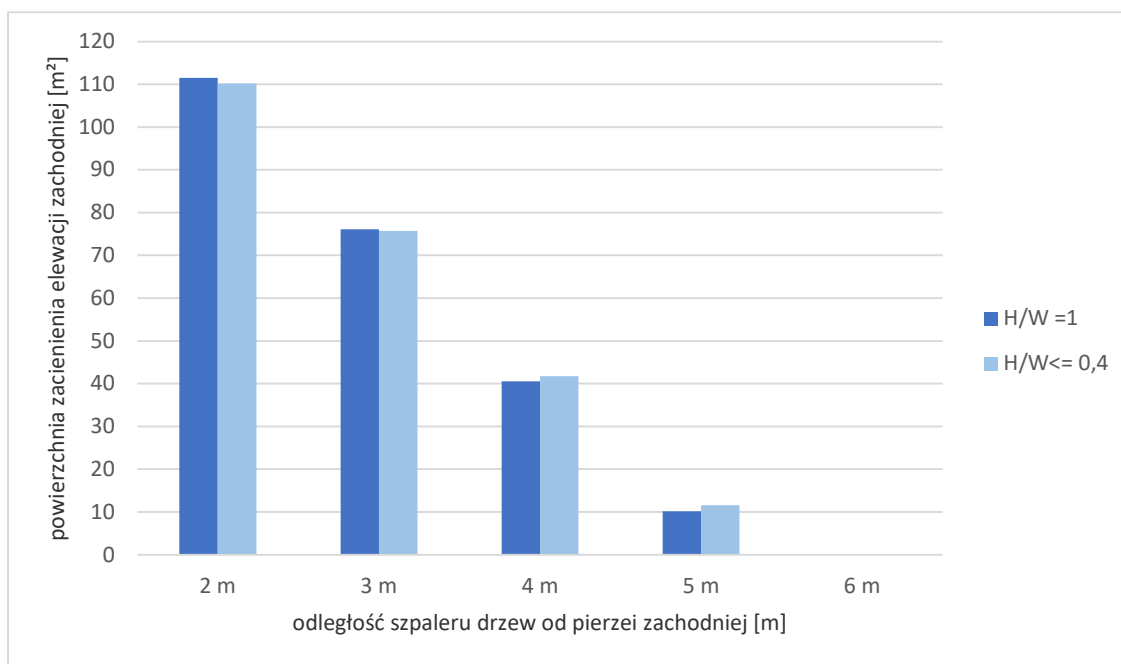
Lokalizacja drzew blisko zabudowy, tj. 2 m od niej, zapewnia ochronę dla ponad 100 m² powierzchni zachodniej elewacji we wszystkich rozpatrywanych profilach modelu.

- zachowanie dystansu 5 m pomiędzy drzewami a zabudową pozwala na osłonę przed bezpośrednim promieniowaniem słonecznym mniej niż 10% powierzchni ścian do wysokości 3 m,

Szpaler w tej odległości w modelu o $H/W = 1$ zaciemnia 8,43% elewacji na poziomie parteru, a w ulicach o bardziej płaskich przekrojach (przy $H/W \leq 0,6$) 9,25% powierzchni.

- usytuowanie roślinnych elementów zaciemniających w odległości 6 m od zachodniej pierzei nie zapewni żadnej ochrony przed bezpośrednim promieniowaniem słońca dla osłanianych ścian w modelach o różnych proporcjach H/W .

W badaniach nie odnotowano tak dużych różnic¹⁹⁹ w powierzchni zaciemnienia przez zieleni pomiędzy wariantami o różnych parametrach H/W , jak w przypadku wschodniej pierzei (rys. 70-71).



Rysunek 71. Powierzchnia zaciemnienia elewacji zachodniej pierzei ulicy na osi północ-południe o różnym parametrze proporcji H/W przez drzewa zlokalizowane w odległości od 2 m do 6 m w dniu 7 czerwca w godzinie o największym całkowitym natężeniu promieniowania słonecznego na powierzchni pionowe o orientacji zachodniej, tj. między 14.00 a 15.00 w wybranej lokalizacji

Źródło: Opracowanie własne.

¹⁹⁹ Największa różnica w powierzchni zaciemnienia elewacji zachodniej między 14.00 a 15.00 wynosi 1,42 m².

Rozdział 6. Wnioski i podsumowanie

6.1. Szpalery drzew liściastych jako system zacinający elewacje pierzei ulicznych. Ocena możliwości

Otrzymane wyniki symulacji godzin nasłonecznienia (SHA) wariantów badanego modelu roślinno-architektonicznego dla lokalizacji w wilgotnym klimacie kontynentalnym wskazują, że zieleń o przyjętych parametrach (m.in. o wysokości równej 7 m) przy pewnych uwarunkowaniach (np. orientacji układu) może pełnić rolę alternatywy dla innych systemów zacinających zintegrowanych z budynkami, przede wszystkim dla ścian parteru, tj. do wysokości 3 m. Z kolei dla części elewacji wyższych kondygnacji rozpatrywany szpaler stanowi głównie uzupełniającą do innych rozwiązań ochronę przeciwsłoneczną.

Analiza wykazała, że dla modelu ulicy o orientacji wschód–zachód zasadne jest wykorzystanie drzew do osłony południowych elewacji. Jest to zgodne z wnioskami zawartymi w pracach m.in. Ali-Toudert i Mayera (2005, 2006)²⁰⁰. W tym przypadku dla zabudowy pozbawionej systemów ochrony przeciwsłonecznej zieleń wysoka o parametrach zbliżonych do badanych może pełnić rolę jedyne go elementu zacinającego część południowych elewacji do wysokości 6 m.

Natomiast w modelach na osi północ–południe, w których przeciwległe pierzeje zacinają się nawzajem w różnym stopniu w zależności od przyjętych uwarunkowań (geometrii zabudowy, czasu), drzewa o podobnych do badanych parametrach mogą stanowić głównie dodatkowy, uzupełniający dla tej zabudowy element osłony przed insolacją dla ścian parteru i części I piętra²⁰¹, tj. do wysokości 6 m.

Analiza wszystkich badanych parametrów²⁰² wykazała, że największą skuteczność w zakresie zacinania pierzei (według przyjętych na wstępie kryteriów) w modelu na osi wschód–zachód mają drzewa zlokalizowane 2 m i 3 m od zabudowy niezależnie od wskaźnika H/W (tab. 37). Przy tej lokalizacji zieleni ponad 90% powierzchni elewacji parteru jest w sumie osłonięte przed bezpośrednim promieniowaniem słonecznym przez ponad połowę badanego czasu. Ponadto w strefie zacinanej oprócz parteru znajdują się również ściany I piętra. Można uznać, że w tym przypadku drzewa w wybranych uwarunkowaniach klimatycznych i dla badanego okresu mogą pełnić rolę:

²⁰⁰ Wykorzystanie zieleni jako ochrony przeciwsłonecznej ma większe znaczenie w przypadku ulic nawet o głębokich profilach o orientacji wschód–zachód niż układów o osi w kierunku północ–południe (Ali-Toudert i Mayer, 2006).

²⁰¹ W ulicach na osi północ–południe i parametrze H/W = 1 warunki niekomfortowe panują przez krótszy czas, tj. 3 godziny przed i po południu, niż w przypadku ulic o orientacji wschód–zachód i głębszym profilu (Ali-Toudert i Mayer, 2005).

²⁰² Powierzchni, czasu trwania i pojawienia się zacinania elewacji przez szpaler drzew.



- jedynego systemu zacieniającego dla ścian parteru, tj. do wysokości 3 m,
- uzupełniającego elementu dla rozwiązań ochrony przeciwsłonecznej elewacji I piętra, np. żaluzji, markiz itp.

Tabela 37. Najważniejsze parametry zacinienia elewacji przez wybrane do badań drzewa w modelach o orientacji wschód–zachód i północ–południe przy różnych relacjach geometrycznych pomiędzy zielenią a osłanianą zabudową dla wybranej lokalizacji w dniu 7 czerwca w godzinach 8.00–17.00. Wyróżniono te odległości pomiędzy szpalerem drzew a pierzeją, które zapewniają skuteczną ochronę przeciwsłoneczną dla elewacji według przyjętych w pracy kryteriów

Orientacja	H/W	Odl. drzew od zabudowy	Pow. zacinienia elewacji parteru $\geq 50\%$		Pow. zacinienia elewacji parteru $< 50\%$ i $\geq 30\%$		Pow. zacinienia elewacji parteru $< 30\%$		Zacinienie elewacji I piętra		Czas zacinienia $\geq 50\%$ czasu ekspozycji słonecznej	
			wsch.	zach.	wsch.	zach.	wsch.	zach.	wsch.	zach.	wsch.	zach.
			płd.		płd.		płd.		płd.		płd.	
wsch.–zach.	H/W ≤ 1	2	X						X		X	
		3	X						X		X	
		4			X							X
płn.–płd.	H/W = 1	2	X	X					X	X	X	X
		3	X	X					X	X	X	X
		4		X	X				X	X	X	
		5					X	X			X	
		6					X	X				
	H/W $\leq 0,6$	2	X	X					X	X	X	X
		3	X	X					X	X	X	X
		4	X	X					X	X	X	X
		5	X	X					X	X	X	X
		6		X	X					X	X	

Źródło: Opracowanie własne.

W ulicach na osi północ–południe o H/W = 1 drzewa o największej skuteczności w zakresie ochrony przeciwsłonecznej to te zlokalizowane 2 m i 3 m od zabudowy (tab. 37). W tym przypadku w strefie zaciemnionej w ciągu badanego okresu znajduje się ponad 60% powierzchni elewacji parteru i maksymalnie blisko 41% ścian I piętra. W ulicy o tym parametrze proporcji, gdzie pierzeje częściowo zaciemniają się nawzajem, zieleń może stanowić uzupełniające dla budynków rozwiązanie w zakresie ochrony przeciwsłonecznej. Badania wykazały także różną skuteczność drzew jako elementów zaciemniających w zależności od lokalizacji po wschodniej lub zachodniej stronie ulicy. Zieleń wysoka oddalona o 4 m od zachodniej pierzei zaciemnia większą powierzchnię niż ta w analogicznej odległości po wschodniej stronie²⁰³.

Z kolei w ulicy na osi północ–południe o płytkich przekrojach, tj. o H/W $\leq 0,6$, największą skuteczność w zakresie zaciemniania elewacji parteru mają drzewa zlokalizowane do 5 m od wschodniej i zachodniej pierzei (tab. 37). Zieleń usytuowana w tych odległościach od

²⁰³ W tym przypadku procent łącznej powierzchni zaciemnienia zachodniej elewacji parteru jest większa o około 12% od wschodniej.

osłanianych powierzchni w badanym przedziale czasowym zacienia ponad 50% powierzchni elewacji parteru oraz częściowo ściany I piętra. Ponadto może ona zapewnić ochronę przeciwsłoneczną przez ponad połowę czasu ekspozycji słonecznej tych powierzchni. Szpaler drzew oddalony do 3 m od pierzei wschodniej i zachodniej może pełnić rolę jedyne systemu zacieniającego dla ścian parteru, osłaniając w sumie do $\frac{3}{4}$ ich powierzchni w ciągu badanego okresu. W pozostałych przypadkach drzewa mogą pełnić rolę uzupełniającego elementu zacieniającego w stosunku do innych rozwiązań ochrony przed promieniowaniem słonecznym.

I. Badania wykazały, że relacje geometryczne pomiędzy zacieniającymi drzewami, a budynkami są niezwykle ważnym parametrem w zapewnianiu ochrony przeciwsłonecznej. Wniosek ten jest zgodny z pracami m.in. takich autorów jak Simpson i McPherson (1996), Donovan i Butry (2009) czy Abdel-Aziz (2014).

Przeprowadzona analiza ujawniła, że przy odpowiednio bliskim usytuowaniu elementów układu roślinno-architektonicznego drzewa, o parametrach zbliżonych do tych badanych, mogą pełnić funkcję rozwiązań zacieniających część elewacji parteru oraz I piętra przez większy czas jej ekspozycji słonecznej. W tabeli 37 w syntetyczny sposób przedstawiono powierzchnię i czas zacieniania elewacji przez wybrane do badań drzewa w modelach o orientacji wschód–zachód i północ–południe przy różnych relacjach geometrycznych pomiędzy zielenią a osłanianą zabudową.

Przy czym w modelach o orientacji wschód–zachód stwierdzono, że:

- wskazane jest lokalizowanie drzew jako elementów zacieniających elewacje blisko osłanianych ścian, tj. zachowanie 4 m jako maksymalnej odległości szpalera drzew od południowych elewacji²⁰⁴,

Lokalizacja zieleni wysokiej w odległości od 4 m do 5 m prowadzi do drastycznego zmniejszenia możliwości zacieniania powierzchni ścian przez rośliny (przy 5 m – do 0%).

- najkorzystniejszą ochronę przeciwsłoneczną południowej pierzei mogą zapewnić rośliny w odległości 2 m bądź 3 m od zabudowy, które prawie w całości zacieniają ściany parteru, tj. do wysokości 3 m w rozpatrywanym przedziale czasowym,

W tym przypadku co najmniej 94% powierzchni elewacji parteru jest osłonięte przez szpaler klonów jawor w ciągu badanego okresu. Ponadto różnice w stopniu zacieniania pomiędzy zielenią usytuowaną w odległości 2 m i 3 m są nieznaczące²⁰⁵.

- 20-25-letnie klony jawor usytuowane 2 m i 3 m od pierzei można wykorzystać jako dodatkowy element ochrony przeciwsłonecznej ścian I piętra,

²⁰⁴ Przez 9 godzin łącznie zacienione przez zielenią zostało do 43,12% elewacji parteru.

²⁰⁵ W ulicy zorientowanej wschód–zachód różnica ta wynosi 5,53% powierzchni południowej elewacji parteru dla modeli z zabudową wysoką ($H/W = 1$) i 5,65% powierzchni w przypadku pozostałych profili ($H/W \leq 0,6$).

Zwłaszcza dotyczy to szpaleru oddalonego o 2 m od budynków, który w badanym czasie może zaciąć blisko 54% powierzchni ścian na wysokości od 3 m do 6 m.

- co najmniej $\frac{1}{3}$ powierzchni elewacji parteru może być osłonięta przed bezpośrednim promieniowaniem słonecznym przez drzewa oddalone o 2 m bądź 3 m od ścian w czasie, gdy całkowite natężenie promieniowania słonecznego na powierzchni pionowe o orientacji południowej osiąga maksymalną wartość w dniu 7 czerwca, tj. między 10.00 a 11.00,
- zieleń wysoka usytuowana do 4 m od zabudowy wykorzystana do ochrony przeciwsłonecznej południowej pierzei może zapewnić długotrwałe zacięcie w ciągu dnia (7 czerwca), tj. co najmniej przez 66% czasu ekspozycji słonecznej fasad,
- szpaler klonów usytuowany w jednakowej odległości od budynków w modelach o różnej geometrii zabudowy, tj. pomiędzy układami o $H/W \leq 0,6$ a $H/W = 1$, zacięcia zbliżoną powierzchnią.

Z kolei w modelach na osi północ-południe:

- drzewa oddalone do 6 m od zabudowy mogą pełnić funkcję uzupełniającej ochrony przeciwsłonecznej dla części elewacji parteru w ulicy o parametrze proporcji $H/W \leq 1$,
- zieleń oddalona o tę samą odległość od zabudowy w ulicach o parametrze $H/W = 1$ i tych o $H/W \leq 0,6$ może zaciąć różną powierzchnią pierzei,
- o $H/W = 1$ – zasadne wydaje się zachowanie 3 m jako maksymalnej odległości zieleni od pierzei. Jednak łącznie ponad połowa powierzchni zachodnich ścian parteru może być osłonięta także przez szpaler oddalony maksymalnie o 4 m od budynku, przy czym przez okres krótszy niż połowa czasu ekspozycji słonecznej elewacji w badanym dniu,
- o $H/W \leq 0,6$ – racjonalne wydaje się sytuowanie drzew do 5 m od elewacji. Przy czym zachowanie odległości do 6 m między szpalerem a zachodnią pierzeją pozwoli zaciąć ponad połowę powierzchni ścian parteru, jednak przez mniej niż 50% czasu ekspozycji słonecznej zabudowy między 8.00 a 17.00 w dniu 7 czerwca.

W tych układach między 8.00 a 17.00 zieleń oddalona o 5 m od ścian może w sumie zaciąć 52,83% powierzchni wschodniej elewacji parteru, a 65,62% powierzchni zachodniej przy usytuowaniu drzew w odległości 6 m od budynku.

- największą ochronę przeciwsłoneczną elewacji może zapewnić szpaler w odległości 2 m lub 3 m od pierzei, który może zaciąć w sumie do $\frac{3}{4}$ powierzchni ścian parteru,

W ulicy o $H/W \leq 0,6$ drzewa w odległości 2 m od zabudowy zaciągają w sumie przez 9 godzin nie więcej niż 73,80% powierzchni wschodniej elewacji parteru i maksymalnie 75,88% zachodniej. Natomiast w przypadku lokalizacji zieleni wysokiej w odległości 3 m od pierzei łącznie osłonięte przed

bezpośrednią insulacją może być do 70,87% powierzchni wschodniej ścian do wysokości I piętra i 75,10% zachodniej²⁰⁶.

- 20-25-letnie klony jawor można wykorzystać jako elementy wspomagające zacienienie ścian I piętra, o ile zostaną zlokalizowane do 4 m od zabudowy w układach o $H/W = 1$,
- wybrane drzewa mogą stanowić zacienienie uzupełniające w stosunku do innych rozwiązań przeciwśłonecznych elewacji na wysokości od 3 m do 6 m przy ich lokalizacji bliżej niż 5 m od pierzei wschodnich i 6 m od zachodnich w ulicy o $H/W \leq 0,6$,

Zieleń w odległości równej 5 m od zabudowy nie zapewni wystarczająco dużego zacienienia wschodnich ścian I piętra (dla nie więcej niż 2% powierzchni), z kolei szpaler oddalony o 6 m – zachodnich (2% powierzchni).

- w układach o $H/W = 1$ wybrane do badań drzewa w odległości do 6 m od pierzei wschodniej i do 3 m od zachodniej mogą zapewnić zacienienie przez minimum połowę czasu ekspozycji słonecznej części ścian w ciągu badanego okresu,
- przy parametrze $H/W \leq 0,6$ szpaler zlokalizowany do 6 m od wschodnich ścian ulicy, a 5 m od zachodnich może pełnić rolę ochrony przeciwśłonecznej przez co najmniej połowę czasu ekspozycji słonecznej fasad,
- zieleń wysoka oddalona do 6 m od zabudowy może pełnić funkcję elementu zacieniającego dla części wschodnich elewacji parteru, w tym w godzinie o największym całkowitym natężeniu promieniowania słonecznego na powierzchni o orientacji wschodniej w dniu 7 czerwca, tj. między 8.00 a 9.00,

Przy czym skuteczniejszą ochronę przeciwśłoneczną w tej godzinie drzewa mogą zapewnić w układach o bardziej płtykich profilach, tj. $H/W \leq 0,6$.

- lokalizacja szpaleru drzew w odległości 5 m lub mniejszej od zachodniej pierzei pozwala na częściowe zacienienie ścian także w godzinie o największym całkowitym natężeniu promieniowania słonecznego na powierzchni pionowe o orientacji zachodniej w dniu 7 czerwca, tj. od 14.00 do 15.00.

Przy lokalizacji drzew w odległości 4 m od zachodniej elewacji niecałe 35% powierzchni ścian parteru znajdzie się w cieniu drzew w tym czasie.

- II. Badania potwierdzają wpływ orientacji ulicy względem stron świata na możliwość i potencjał wykorzystania drzew do ochrony przeciwśłonecznej pierzei. Wniosek pokrywa się z wynikami przedstawionymi w pracach autorstwa m.in. Ali-Toudert i Mayera (2005). W niniejszych badaniach porównano powierzchnię zacieniania elewacji przez drzewa

²⁰⁶ Różnica w powierzchni elewacji zacienionej przez drzewa oddalone o 2 m i 3 m od zabudowy jest niewielka. W modelu o $H/W = 1$ różnica ta w przypadku pierzei wschodniej wynosi 7,38% powierzchni, a zachodniej: 7,80% powierzchni. Natomiast w układach o parametrze $H/W \leq 0,6$ – 2,93% powierzchni wschodniej pierzei i 0,78% w przypadku zachodniej.

zlokalizowane w tej samej odległości od zabudowy przy różnej ekspozycji tych układów na kierunki świata. Analiza godzin nasłonecznienia (SHA) pierzei ulicy wykazała, że:

- większą powierzchnię zacienienia osłanianych ścian zapewnia zieleń wysoka w modelu na osi wschód–zachód niż północ–południe przy jej usytuowaniu blisko pierzei, tj. w odległości 2 m bądź 3 m, w przypadku wszystkich badanych profili ulicy (rys. 72 i 73). Wyjątek stanowi szpaler drzew oddalony o 3 m od zabudowy, który osłania w większym stopniu elewację zachodnią w modelu na osi północ–południe o płytkim profilu $H/W \leq 0,6$ (rys. 73),
- zmiana lokalizacji szpaleru wywołuje większe różnice w powierzchni zacienienia ścian przez drzewa w ciągu dnia w ulicy na osi wschód–zachód niż w przypadku orientacji północ–południe,

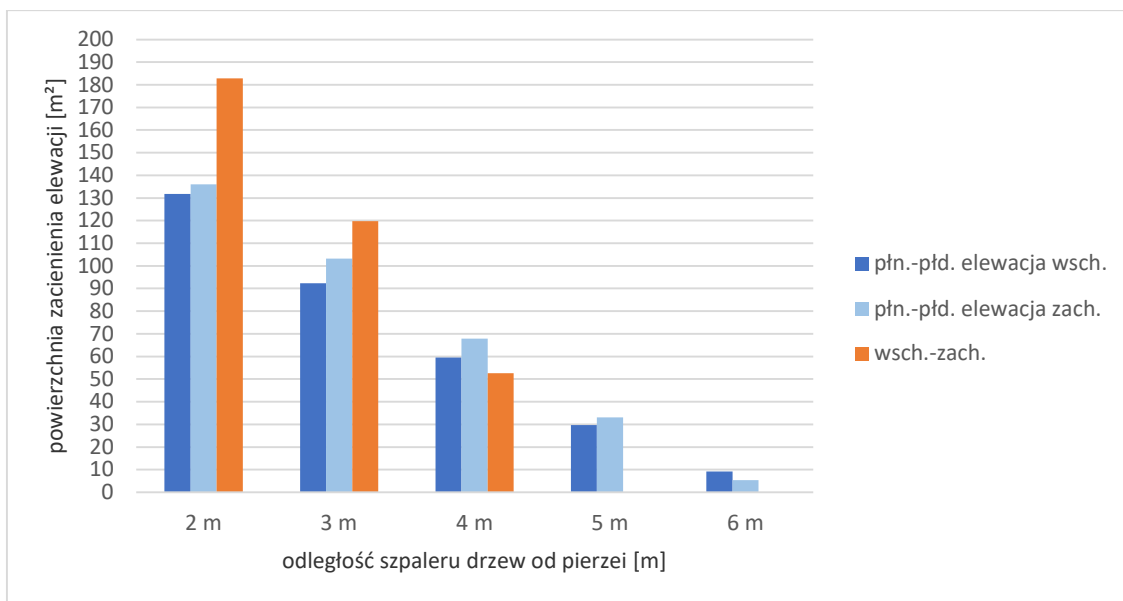
W modelach na osi północ–południe odnotowano mniejsze różnice w łącznej powierzchni zacienienia ścian osłanianych przez zieleń przy różnej odległości od budynku²⁰⁷ we wszystkich badanych relacjach przestrzennych pomiędzy elementami tego układu oraz przy rozpatrywanych parametrach H/W.

- w ciągu dnia od 8.00 do 17.00 stopień zacienienia pierzei przez rośliny jest bardziej równomierny w modelu na osi wschód–zachód niż północ–południe (rys. 74-77),

Dla jednogodzinnych przedziałów czasowych następujących po sobie między 8.00 a 17.00 odnotowano mniejsze różnice w powierzchni zacienienia elewacji w modelach na osi wschód–zachód niż północ–południe przez drzewa zlokalizowane w tej samej odległości od osłanianej zabudowy.

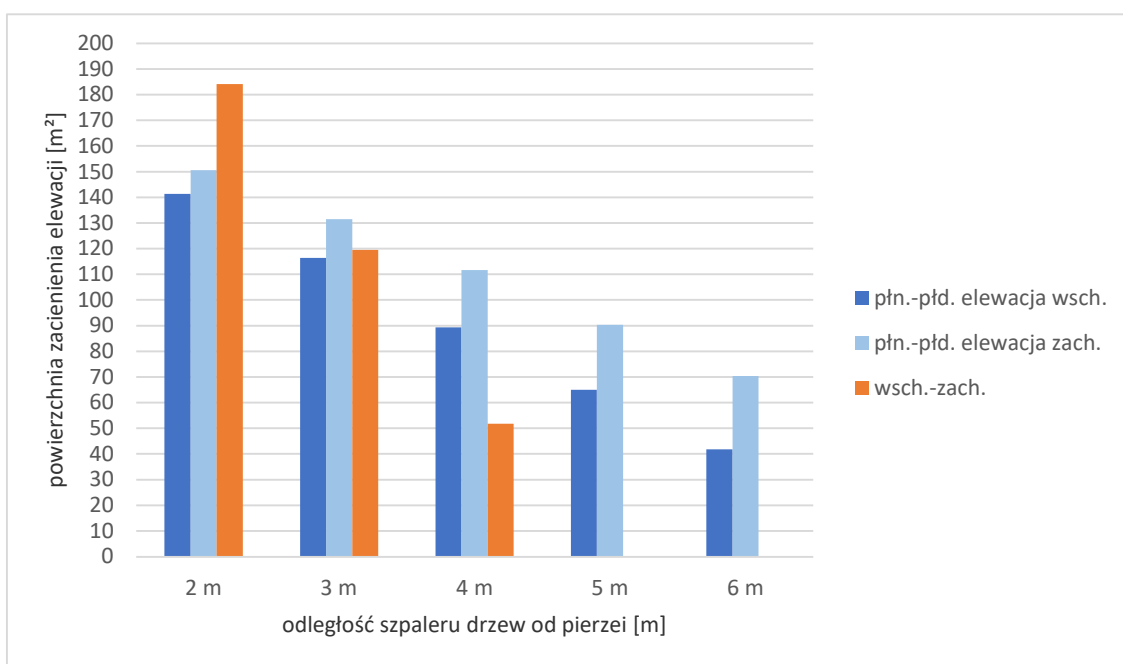
- różnica w powierzchni zacienienia elewacji przez drzewa zlokalizowane 2 m i 3 m od ścian pomiędzy układami na osi wschód–zachód i północ–południe jest mniejsza w ulicach o płytkich przekrojach, z $H/W \leq 0,6$, niż w wariantach o $H/W = 1$,
- orientacja ulicy względem stron świata wpływa na pionowy zasięg zacienienia ścian przez drzewa – w ulicach na osi północ–południe istnieje większy zakres możliwości usytuowania drzew względem zabudowy, co pozwala na ochronę przeciwsłoneczną ścian powyżej wysokości parteru (3 m).

²⁰⁷ Przykładowo w modelu o orientacji północ–południe z zabudową wysoką i $H/W = 1$ różnice w łącznej powierzchni zacienienia elewacji wschodniej przez zieleń wynikające ze zmiany jej odległości z 2 m do 3 m od zabudowy wynoszą 39,52 m², a w przypadku elewacji zachodniej 32,89 m². Z kolei dla modelu o kierunku wschód–zachód różnice te są prawie dwukrotnie większe (63,08 m²) (tabele 29 i 32-33).



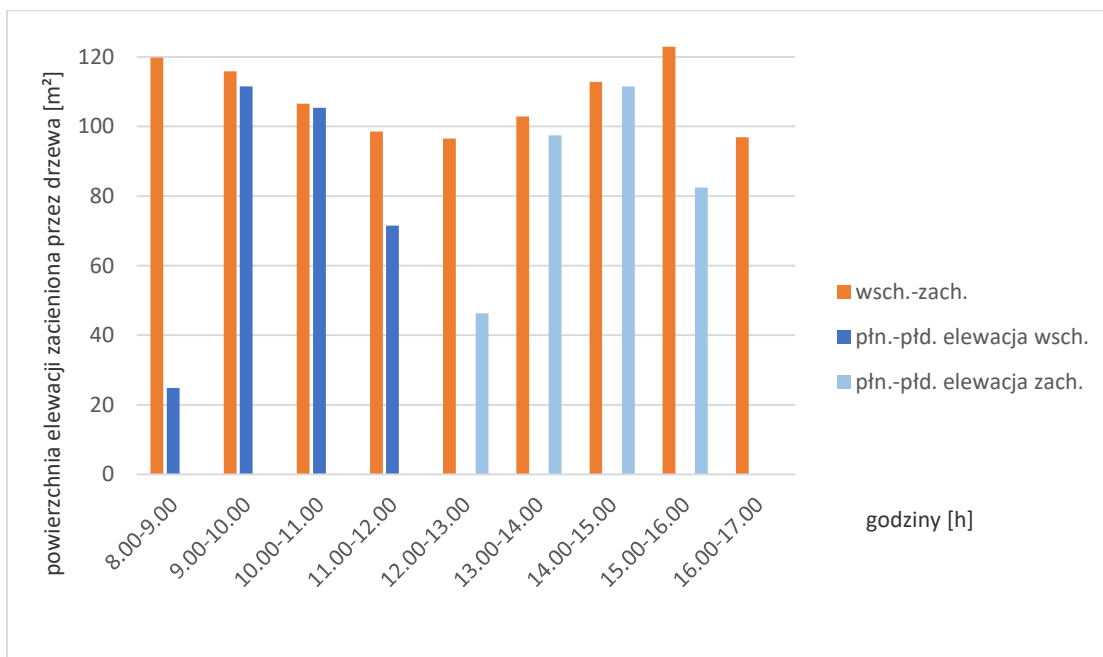
Rysunek 72. Łączna powierzchnia zacielenia elewacji pierzei ulicy na osi północ-południe i wschód-zachód o parametrze proporcji $H/W = 1$ przez drzewa zlokalizowane w odległości od 2 m do 6 m w dniu 7 czerwca w godzinach między 8.00 a 17.00 w wybranej lokalizacji

Źródło: Opracowanie własne.

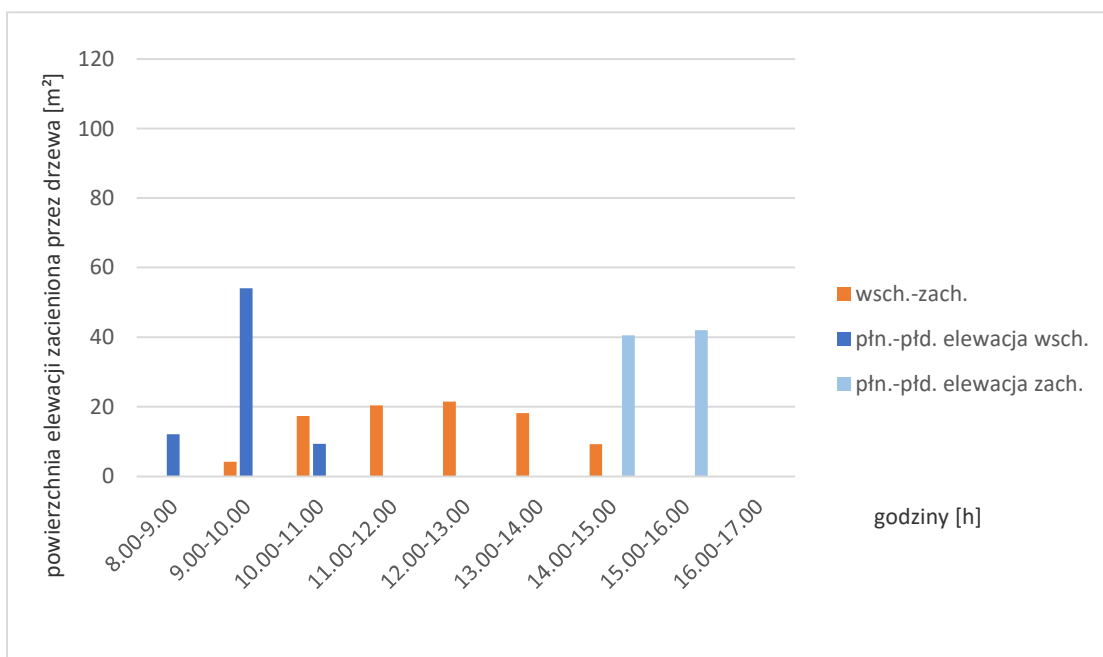


Rysunek 73. Łączna powierzchnia zacielenia elewacji pierzei ulicy na osi północ-południe i wschód-zachód o parametrze proporcji $H/W \leq 0,6$ przez drzewa zlokalizowane w odległości od 2 m do 6 m w dniu 7 czerwca w godzinach między 8.00 a 17.00 w wybranej lokalizacji

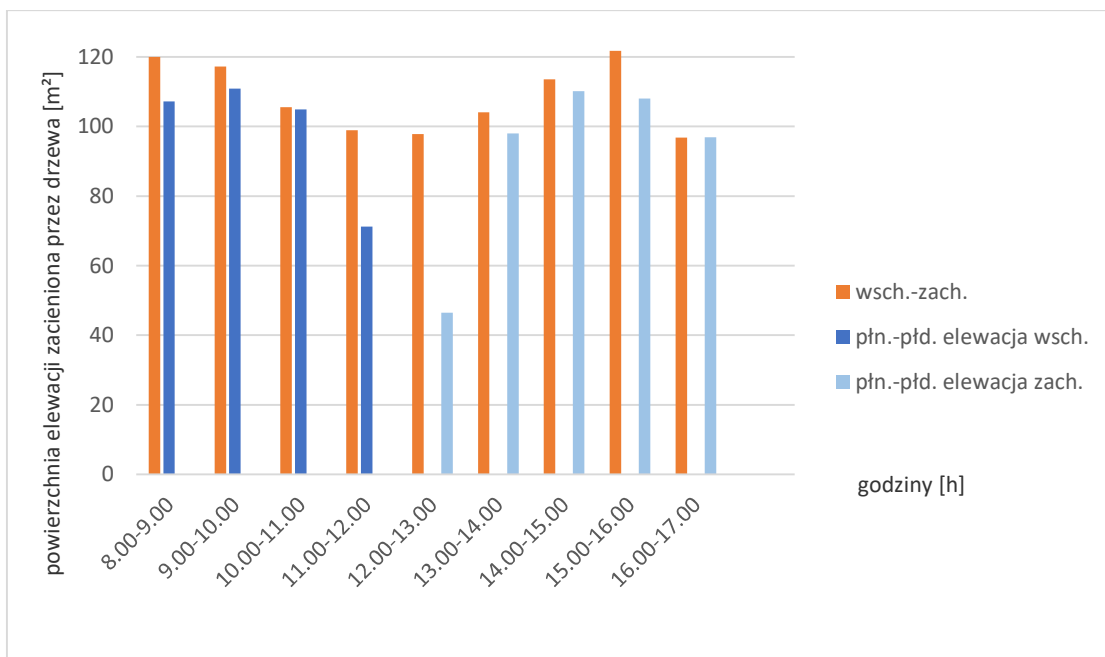
Źródło: Opracowanie własne.



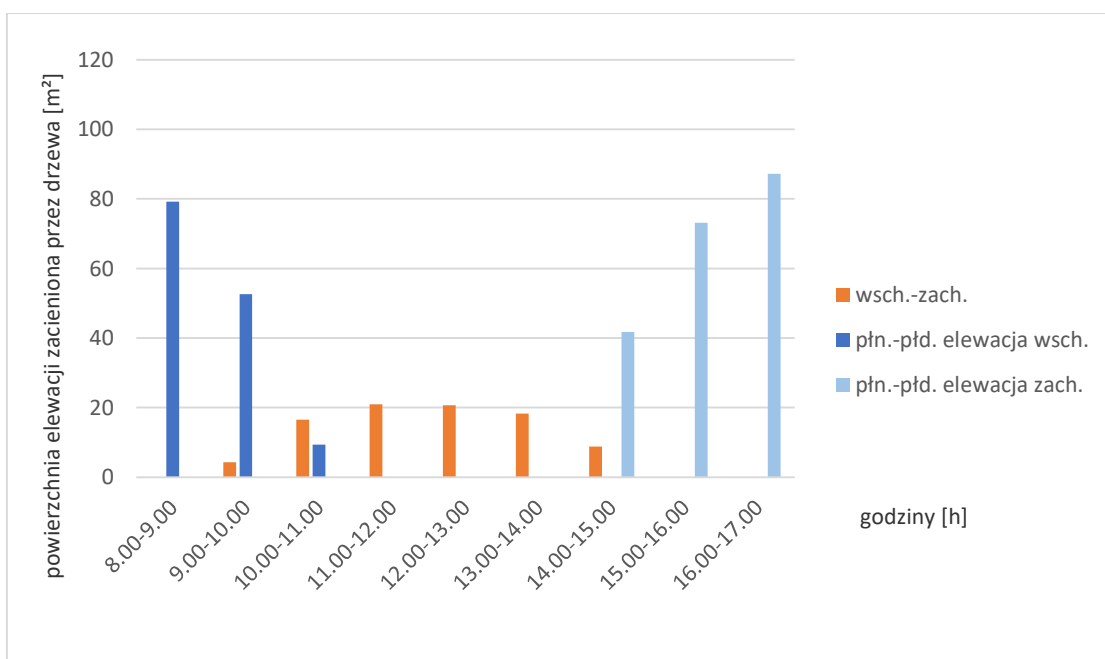
Rysunek 74. Powierzchnia zacienienia elewacji przez szpaler drzew zlokalizowany w odległości 2 m od zabudowy w modelu ulicy na osi północ-południe i wschód-zachód z zabudową wysoką o $H/W = 1$ w dniu 7 czerwca w godzinach 8.00–17.00 w wybranej lokalizacji
 Źródło: Opracowanie własne.



Rysunek 75. Powierzchnia zacienienia elewacji przez szpaler drzew zlokalizowany w odległości 4 m od zabudowy w modelu ulicy na osi północ-południe i wschód-zachód z zabudową wysoką o $H/W = 1$ w dniu 7 czerwca w godzinach 8.00–17.00 w wybranej lokalizacji
 Źródło: Opracowanie własne.



Rysunek 76. Powierzchnia zacielenia elewacji przez szpaler drzew zlokalizowany w odległości 2 m od zabudowy w modelu ulicy na osi północ–południe i wschód–zachód z zabudową wysoką o $H/W \leq 0,6$ w dniu 7 czerwca w godzinach 8.00–17.00 w wybranej lokalizacji
Źródło: Opracowanie własne.



Rysunek 77. Powierzchnia zacielenia elewacji przez szpaler drzew zlokalizowany w odległości 4 m od zabudowy w modelu ulicy na osi północ–południe i wschód–zachód o $H/W \leq 0,6$ w dniu 7 czerwca w godzinach 8.00–17.00 w wybranej lokalizacji
Źródło: Opracowanie własne.

III. W badaniach odnotowano także wpływ geometrii zabudowy ulicy na:

- powierzchnię zacienienia pierzei przez drzewa w układach o orientacji północ–południe, szczególnie w przypadku zachodnich elewacji (rys. 78 i 79)²⁰⁸,

Powierzchnia wschodniej elewacji zacieniona przez drzewa może być do 4,5 razy większa w układach o profilach płytkich, tj. o $H/W \leq 0,6$, w porównaniu do ulicy o $H/W = 1$. Z kolei w przypadku zachodnich pierzei różnica w stopniu zacieniania ścian przez drzewa z uwagi na parametr H/W może sięgać nawet 13 razy²⁰⁹.

- możliwości lokalizacji drzew względem osłanianych ścian w układach na osi północ–południe ze względu na ochronę przeciwsłoneczną,

W ulicy na osi północ–południe o płytkim przekroju ($H/W \leq 0,6$) drzewa jako elementy zacieniające zachodnie elewacje przez co najmniej połowę czasu ekspozycji słonecznej mogą być zlokalizowane w większej odległości od zabudowy w porównaniu do układów o głębszych profilach, tj. $H/W \geq 1$ (do 5 m zamiast 3 m).

- różnice w powierzchni zacieniania ścian przez drzewa przy zmianie lokalizacji roślinnych elementów zacieniających w układach zorientowanych północ–południe,

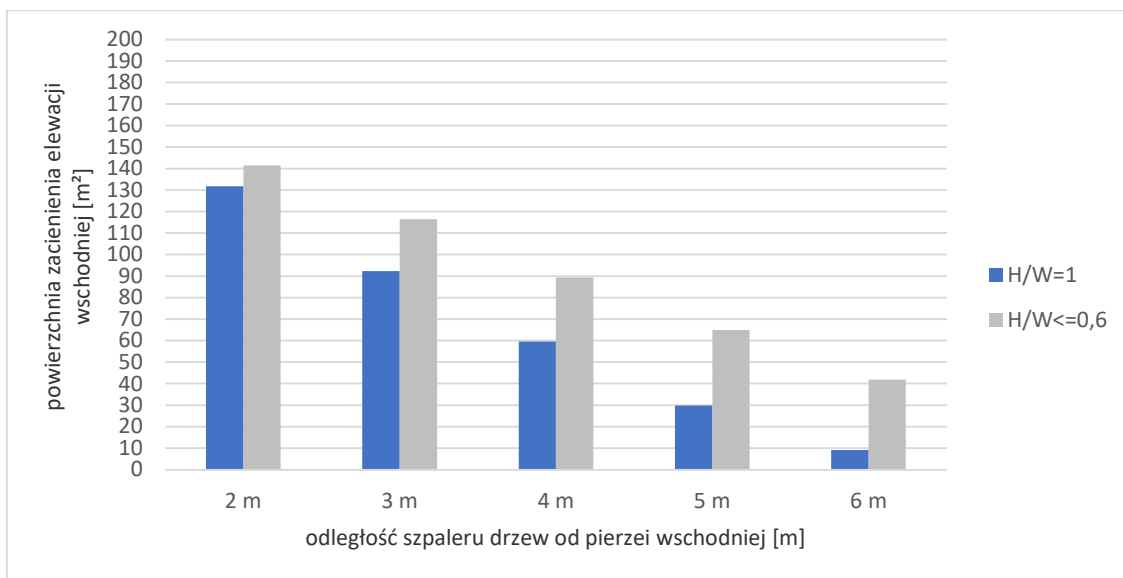
W ulicach o płytkich profilach ($H/W \leq 0,6$) na osi północ–południe wzrost odległości drzew od osłanianej zabudowy powoduje mniejszy spadek powierzchni zacienienia w porównaniu do zieleni w układach o wskaźniku $H/W = 1$. Przykładowo oddalenie zieleni o 1 m (z 2 m do 3 m) od ścian powoduje spadek łącznej powierzchni zacienienia o 24,10% dla elewacji zachodniej przy parametrze $H/W = 1$, a o 12,65% przy $H/W \leq 0,6$. Natomiast w modelach zorientowanych wschód–zachód różnice w łącznej powierzchni zacieniania wynikające ze zmiany lokalizacji zieleni w modelach o różnych parametrach H/W są nieznaczne (około 0,5%).

- czas trwania zacienienia ścian zachodniej pierzei przez drzewa.

Czas zacienienia elewacji zachodnich przez zielenią wydłużył się o jedną godzinę w ulicach o parametrze $H/W \leq 0,6$ w porównaniu do układów o $H/W = 1$ przy jednakowej odległości drzew od zabudowy, natomiast w przypadku pierzei wschodniej nie odnotowano zmian.

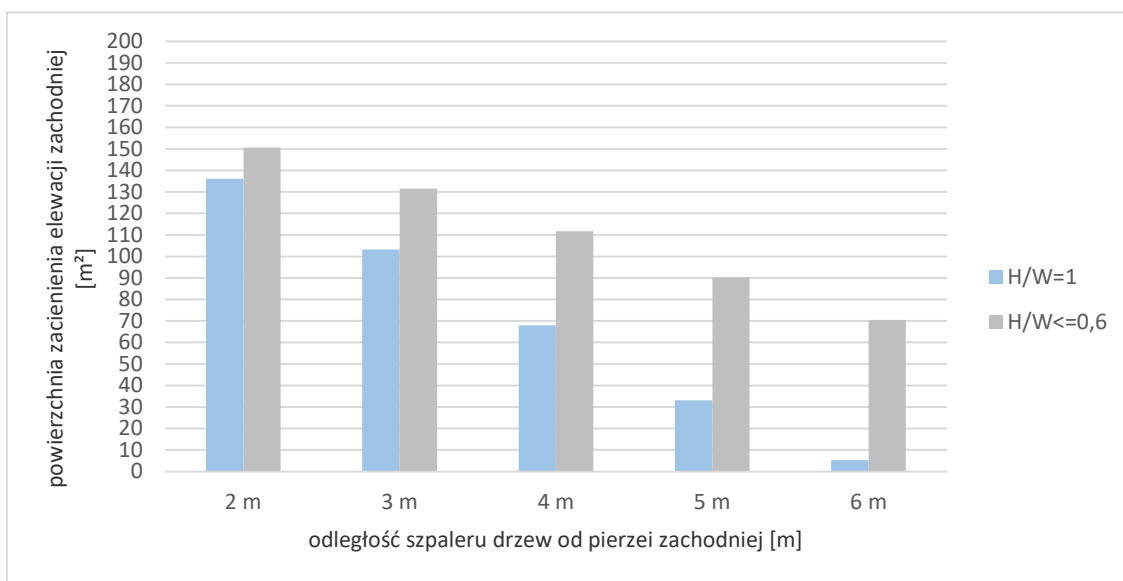
²⁰⁸ Z kolei wpływ geometrii ulicy na stopień zacieniania pierzei przez zlokalizowaną przed nią zielenią jest nieznaczny w modelu o orientacji wschód–zachód (nie przekracza 2 m²).

²⁰⁹ Dla modelu na osi północ–południe o parametrze $H/W \leq 0,6$ dla wschodnich elewacji odnotowano różnice w łącznej powierzchni zacienienia od 1,6 do 4,6 razy większą niż w wariancie z $H/W = 1$, z kolei dla zachodnich – od 1,6 do 13,1 razy większą dla tych samych odległości drzew od zabudowy.



Rysunek 78. Łączna powierzchnia zacielenia wschodniej elewacji przez szpaler drzew zlokalizowany w różnych odległościach [m] od zabudowy w modelu ulicy na osi północ-południe o różnych parametrach proporcji H/W w dniu 7 czerwca w godzinach 8.00–17.00 w wybranej lokalizacji

Źródło: Opracowanie własne.



Rysunek 79. Łączna powierzchnia zacielenia zachodniej elewacji przez szpaler drzew zlokalizowany w różnych odległościach [m] od zabudowy w modelu ulicy na osi północ-południe o różnych parametrach proporcji H/W w dniu 7 czerwca w godzinach 8.00–17.00 w wybranej lokalizacji

Źródło: Opracowanie własne.

6.1.1. Dyskusja

W ulicy zapewnienie ochrony przeciwsłonecznej dla jak największej powierzchni pierzei wymaga zlokalizowania drzew blisko zabudowy, tj. najlepiej w odległości 2 m²¹⁰. Takie usytuowanie zieleni może stwarzać pewne problemy z uwagi na obowiązujące przepisy przeciwpożarowe²¹¹ oraz ze względu na ewentualne uszkodzenia podziemnych części budynków przez korzenie drzew²¹² (Celadyn, 1992). Pod uwagę należy również wziąć rozwój korony wybranego gatunku, która wraz z upływem czasu może wymagać formowania z powodu bliskiego sąsiedztwa zabudowy. Różnice w skuteczności zacieniania pomiędzy szpalerem drzew usytuowanym 2 m i 3 m od zabudowy są nieznaczne we wszystkich analizowanych przypadkach, wobec czego odległość 3 m wydaje się bardziej racjonalna ze względu na zminimalizowanie tych problemów. Pozwala to także na lepsze rozplanowanie chodnika między zabudową a szpalerem drzew. W przypadku nasadzeń blisko zabudowy można wybrać gatunki lub odmiany o węższym pokroju (fot. 40). Rozwiązaniem jest także wykorzystanie szpalerów o formowanych koronach w kształcie palmety (z ang. *pleached trees*) (fot. 41 i 42).



Fot. 40. Szpaler drzew o wąskiej koronie i pokroju kolumnowym
Źródło: Nieroda i Gwizdak (2020: 91).

²¹⁰ Ponadto drzewa usytuowane blisko zabudowy mogą ograniczać również promieniowanie rozproszone, które dociera do osłanianych ścian (Thayer i in., 1985).

²¹¹ § 12 ust. 2 Rozporządzenia Ministra Spraw Wewnętrznych i Administracji z dnia 24 lipca 2009 r. w sprawie przeciwpożarowego zaopatrzenia w wodę oraz dróg pożarowych oraz § 266 ust. 4 Rozporządzeniu Ministra Infrastruktury w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie z dnia 12 kwietnia 2002 r. (t.j. Dz. U z 2019 poz. 1065).

²¹² Oferowane technologie pozwalają zminimalizować to ryzyko m.in. dzięki zastosowaniu ekranów (barier) dla korzeni ukierunkowujące ich wzrost np. technologia Arborsystem (Szulc, 2013).



Fot. 41



Fot. 42

Fot. 41. Lipa drobnolistna (*Tilia cordata*) z formowaną koroną w kształcie palmety
Źródło: Szulc, 2013: 143.

Fot. 42. Drzewa przyuliczne z niewielką formowaną koroną w kształcie palmety na ul. Jasnej w Warszawie
Źródło: Szulc, 2013: 143.

Zaproponowana ochrona przeciwsłoneczna w formie szpaleru drzew liściastych osłaniającego południową pierzeję może wpływać na obniżenie zysków słonecznych w sezonie grzewczym z racji znacznego cienia, jaki rzuca korona pozbawiona liści (Heisler, 1986a; Simpson i McPherson, 1996). W tym przypadku w ocenie lokalizacji drzew jako elementów ochrony przeciwsłonecznej południowych elewacji pomocna może okazać się analiza zysków energetycznych wynikających z zacienienia budynku latem oraz strat z tytułu zwiększonego zużycia energii do ogrzewania budynku zimą²¹³. Przy czym wybór odpowiedniego gatunku drzew, tzn. o wysokim pnium, a także formowanie zieleni, tj. zlikwidowanie nisko rosnących gałęzi, może ograniczyć blokowanie zimowego słońca przez te rośliny.

Zastosowanie zieleni wysokiej do ochrony przeciwsłonecznej pierzei może również zmniejszyć problem ośnienia w przestrzeni ulicy (Abdel-Aziz, 2014). Jednak w niektórych przypadkach²¹⁴ może prowadzić do niedostatecznego dostępu światła dziennego do pomieszczeń mieszkalnych.

Przy wykorzystaniu zieleni wysokiej do osłony przeciwsłonecznej budynków wskazane jest uwzględnienie skali wnętrza, w którym nasadzenia mają być zlokalizowane, co pozwoli na stworzenie odpowiednich ram dla otaczających zabudowań. Wpływ na rozplanowanie

²¹³ Analiza taka mogłaby okazać się pomocna w ocenie zieleni wysokiej jako elementu zacieniającego pierzeję ulicy o różnej zabudowie. Inne rozwiązania w zakresie rozplanowania i wyboru drzew w szpalerze, oraz lokalizacji zieleni wysokiej mogą być odpowiednie dla osłony przeciwsłonecznej historycznych kamienic, a inne dla nowej zabudowy z większym udziałem przeszkleń w elewacji.

²¹⁴ Przykładowo, gdy drzewa zlokalizowane są blisko budynku z ekspozycją północną lub wschodnią, gdzie zieleni osłania jedyne lub niewielkie okna małych pomieszczeń mieszkalnych.

drzew w ulicy jako elementów zacieniających zabudowę może mieć obecność zabytkowej architektury w pierzei, która powinna być odpowiednio wyeksponowana i zharmonizowana z sąsiadującym zadrzewieniem.

Jak wskazują wyniki niniejszych badań, przy odpowiedniej odległości drzew od pierzei ulicznych można zapewnić zacienienie ścian dolnych kondygnacji zabudowy, zwłaszcza parteru przez większość czasu w ciągu dnia (w czerwcu). Zacienienie tej części elewacji może być szczególnie istotne z uwagi na potencjalnie duży udział powierzchni przeszklonych, wynikający z lokalizacji na tym poziomie usług, np. sklepów²¹⁵. Wysoki stopień przeszklenia może prowadzić latem do wzrostu temperatury pomieszczeń²¹⁶, a w konsekwencji do wykorzystania chłodzących rozwiązań instalacyjnych, m.in. jednostek klimatyzacyjnych. Obecność drzew ulicznych jako alternatywnego lub uzupełniającego elementu do zewnętrznego systemu zacieniającego budynek może zmniejszyć ryzyko nagrzewania się pomieszczeń. Ponadto teren osłonięty przed promieniowaniem słonecznym przez zieleni wysoką stwarza dogodne warunki do zagospodarowania otoczenia, np. na ogródki gastronomiczne przyległych lokali.

Podjęte badania mogą być kontynuowane i rozbudowane o kolejne analizy, które pozwolą dostarczyć nowych informacji w zakresie potencjału i możliwości wykorzystania drzew jako elementów zacieniających pierzeje uliczne. Dla tych układów roślinno-architektonicznych według opracowanej metody można przeprowadzić analizy:

- o dłuższym horyzoncie czasowym, np. całego miesiąca,
- dla innych orientacji względem stron świata, zwłaszcza dotyczy to układów na osi północny wschód–południowy zachód oraz północny zachód–południowy wschód, które mogą zapewnić lepsze warunki dla komfortu termicznego przechodniów niż ulica na osi wschód–zachód,

Przeprowadzono analizę godzin nasłonecznienia (SHA) dla wariantów modelu o orientacji północny wschód–południowy zachód o parametrach H/W wynoszących 0,2 oraz 1 przy odległości drzew od pierzei równej 3 m i 4 m i analogicznych do głównych badań uwarunkowaniach odnośnie do lokalizacji i czasu. Analiza wykazała, że zieleni wysoka oddalona o 3 m od zabudowy łącznie w ciągu 9 badanych godzin osłania większą powierzchnię pierzei niż w odpowiedniej lokalizacji w ulicy na osi północ–południe. Ponadto drzewa usytuowane 4 m od zabudowy w większym stopniu zacieniają powierzchnie elewacji niż te w analogicznej lokalizacji w ulicy na osi wschód–zachód i północ–południe. Odnotowano także, że zieleni oddalona o 4 m od elewacji w ulicy o orientacji północny wschód–południowy zachód może zaciemnić w ciągu jednej godziny większą powierzchnię ścian w porównaniu do układów na osi północ–południe i wschód–zachód.

²¹⁵ Złwłaszcza wzdłuż ulic miejskich w śródmieściu miast lub w lokalnych centrach dzielnic.

²¹⁶ Badania pomieszczenia w budynku biurowym w Würzburgu (Niemcy) wykazały, że temperatura panująca we wnętrzu podczas analizowanego okresu letniego była średnio o 3°C wyższa dla przeszklenia 90% elewacji niż dla 30% (Hausladen i in., 2006 za: Marchwiński i Zielonko-Jung, 2012).

- dla innej lokalizacji w Polsce np. w celu sprawdzenia ewentualnych różnic w skutecznej osłonie przeciwsłonecznej elewacji pierzei przez szpaler drzew, które mogą występować między północnymi terenami nadmorskimi a południowymi,
- dla szpaleru dojrzałych klonów, tak by zbadać ich docelowe możliwości zacieniające w rozpatrywanym układzie urbanistycznym.

6.1.2. Zalecenia rozplanowania szpalerów drzew liściastych jako elementów zacieniających pierzeje uliczne sformułowane na podstawie badań własnych

Na podstawie wyników przeprowadzonych badań dla drogi zbiorczej i głównej jednojezdniowej można sformułować wytyczne dotyczące rozplanowania drzew (o parametrach zbliżonych do badanej zieleni) w strefie pomiędzy zabudową a jezdnią w badanych modelach ulic miejskich. Do zacienienia wskazane jest wykorzystanie drzew liściastych gatunków rekomendowanych do nasadzeń ulicznych. Zalecenia mogą okazać się pomocne przy rozplanowaniu zadrzewień pod kątem ochrony przeciwsłonecznej pierzei ulic, zwłaszcza w nowo realizowanych lub rewitalizowanych założeniach, np. dzielnic. Wskazania te mogą być wykorzystane przy opracowywaniu postanowień miejscowego planu zagospodarowania przestrzennego lub przez deweloperów w procesie projektowania bądź planowania²¹⁷.

W przypadku układów na osi wschód–zachód w warunkach wilgotnego klimatu kontynentalnego wskazane jest uwzględnienie poniższych zaleceń²¹⁸:

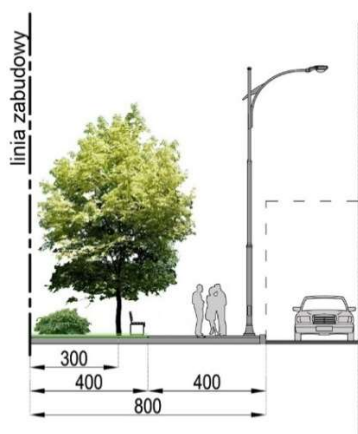
- a) Zlokalizowanie w ulicy przynajmniej jednorzędowego szpaleru drzew liściastych wzdłuż południowo zorientowanej pierzei, zarówno w układach o płytkich, jak i o głębokich przekrojach.
- b) W ulicach, ze względu na osłonę elewacji przed bezpośrednim promieniowaniem słonecznym, zalecane jest usytuowanie drzew w pasie zieleni pod ścianami budynków o minimalnej szerokości około 3 m. Taki układ pozwoli zachować odległość 2-3 m od zabudowy, która jest najkorzystniejsza z uwagi na efektywność zacieniania elewacji przez zadrzewienia. Pas zieleni może być przeznaczony jako przedogródek dla mieszkańców budynków z różnymi kompozycjami roślin – od niskich po wysokie drzewa (rys. 80). Przy lokalizacji usług w parterach teren może zostać przeznaczony również pod ogródki gastronomiczne, które mogą być osłonięte przed bezpośrednim promieniowaniem słonecznym przez korony drzew (rys. 81). Takie rozwiązanie sprzyja

²¹⁷ Wprowadzenie zieleni, w tym zadrzewień, w przestrzeń ulicy jest coraz częstszą praktyką. Przykładowo władze Paryża planują przekształcić jedną z najbardziej rozpoznawalnych ulic miasta Champs-Élysées w reprezentacyjną zieloną przestrzeń, m.in. z tunelami z drzew (źródło: <https://www.theguardian.com/world/2021/jan/10/paris-approves-plan-to-turn-champs-elysees-into-extraordinary-garden-anne-hidalgo>, dostęp: 13.01.2021).

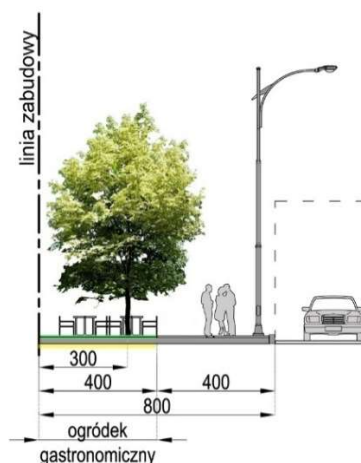
²¹⁸ W odniesieniu do modeli ulic zaprezentowanych w rozdziale trzecim niniejszej pracy.

ożywieniu przestrzeni ulicy w okresie intensywnego nasłonecznienia. Opcjonalnie wzdłuż ścian pierzei można rozplanować chodnik, a następnie pas zieleni z nasadzeniami oddzielający jezdnię od strefy ruchu pieszego (rys. 82). Alternatywnie przy zabudowie można zaproponować ścieżkę rowerową oddzieloną od chodnika pasem zieleni z zadrzewieniami (rys. 83). Przy rozplanowaniu roślin blisko pierzei, w odległości do 3 m od ścian, w nasadzeniach sprawdzają się drzewa średnie²¹⁹ o wąskich pokrojach, formowanych koronach asymetrycznie lub w kształcie palmety.

- c) Pas zieleni z drzewami może być także zlokalizowany między chodnikiem a jezdnią, przy czym odległość od pierzei nie powinna przekraczać 4 m, by zieleń mogła pełnić rolę uzupełniającej ochrony przeciwsłonecznej dla części zabudowy. Taki układ pozwala na rozplanowanie chodnika z ewentualnym wąskim pasem zieleni pod ścianami budynków (rys. 84). Przy lokalizacji usług w parterach pierzei teren wzdłuż ścian może być również zagospodarowany jako ogródki gastronomiczne z zadrzewieniami oddzielającymi je od chodnika (rys. 85).



Rys. 80

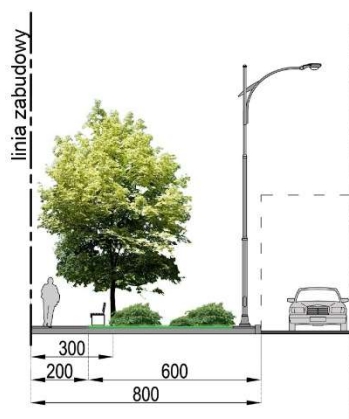


Rys. 81

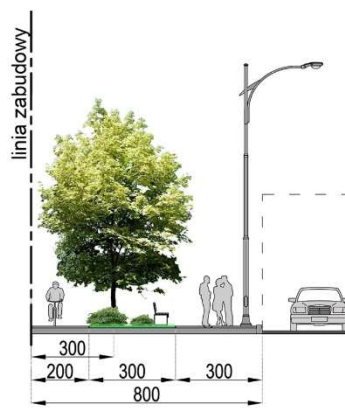
Rysunek 80. Drzewa zlokalizowane w pasie zieleni pod ścianami budynku w ulicy na osi wschód–zachód
Źródło: Opracowanie własne.

Rysunek 81. Drzewa zlokalizowane w pasie zieleni na terenie przeznaczonym pod ogródek gastronomiczne w ulicy na osi wschód–zachód
Źródło: Opracowanie własne.

²¹⁹ Przy takim rozplanowaniu można wykorzystać również drzewa średnie o pokroju bardziej rozłożystym, przy czym bliskie sąsiedztwo zabudowy może sprzyjać bardziej asymetrycznemu ukształtowaniu korony oraz wraz z upływem czasu może wymagać częstszego przycinania.



Rys. 82



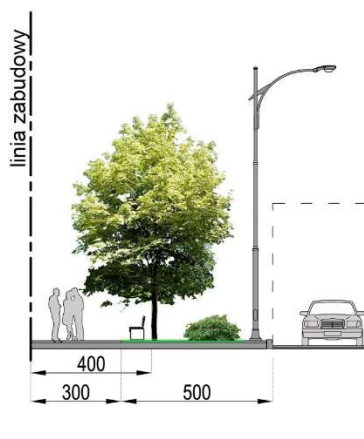
Rys. 83

Rysunek 82. Drzewa zlokalizowane w pasie zieleni oddzielającym strefę ruchu pieszego od kołowego w ulicy na osi wschód–zachód

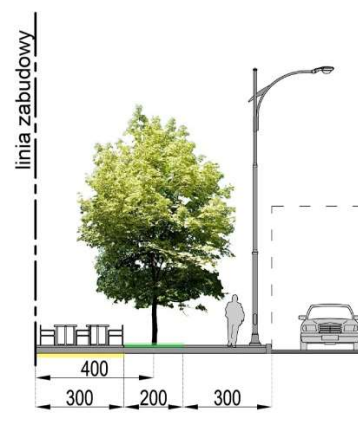
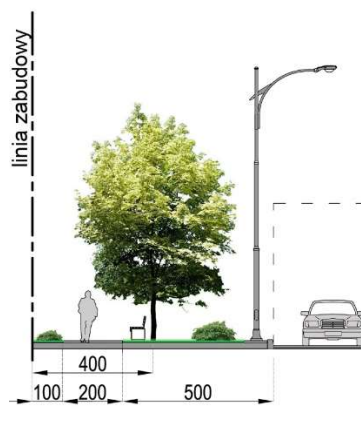
Źródło: Opracowanie własne.

Rysunek 83. Drzewa zlokalizowane w pasie zieleni oddzielającym ścieżkę rowerową od chodnika w ulicy na osi wschód–zachód

Źródło: Opracowanie własne.



Rys. 84



Rys. 85

Rysunek 84. Drzewa zlokalizowane w pasie zieleni w odległości 4 m od pierzei w ulicy na osi wschód–zachód oddzielające strefę ruchu pieszego od kołowego

Źródło: Opracowanie własne.

Rysunek 85. Drzewa zlokalizowane w pasie zieleni w odległości 4 m od pierzei w ulicy na osi wschód–zachód oddzielające strefę ogródków gastronomicznych od chodnika

Źródło: Opracowanie własne.

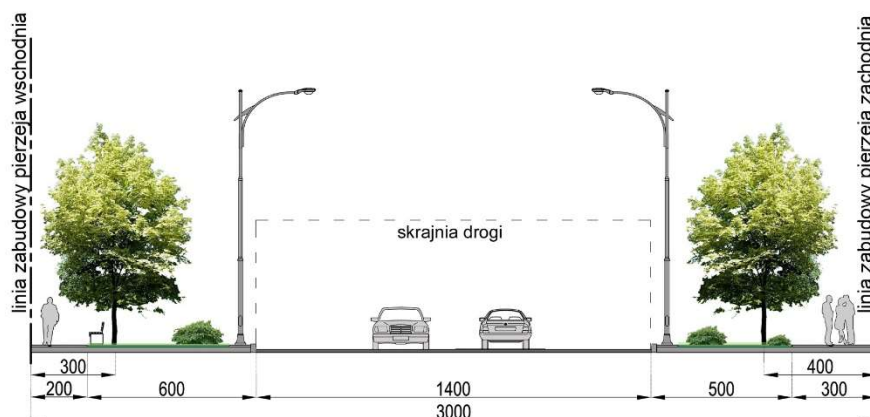
Z kolei dla ulic na osi północ–południe sformułowano poniższe zalecenia dotyczące lokalizacji drzew jako elementów ochrony przeciwsłonecznej:

- a) Wprowadzenie w ulicy dwurzędowego szpaleru drzew liściastych (po jednym z każdej strony) jako elementu zaciężającego pierzeje budynków w układach o płytkich profilach ($H/W \leq 0,6$) i o parametrze $H/W = 1$.



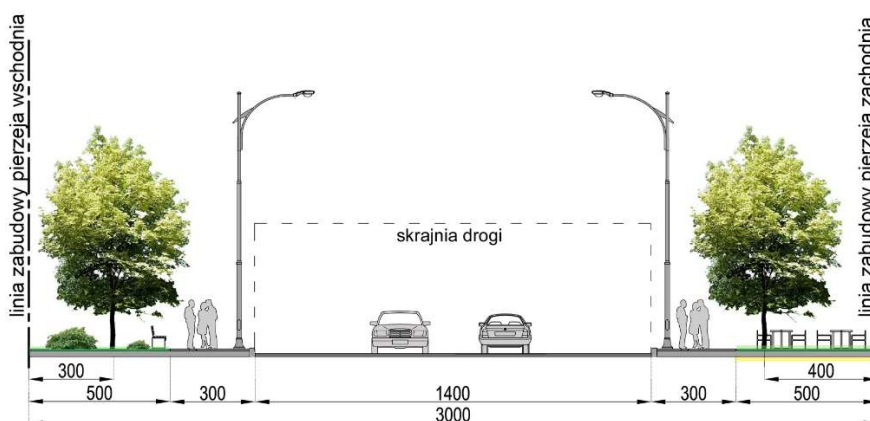
- b) Zróżnicowanie rozplanowania lokalizacji drzew w zakresie odległości od osłanianych elewacji w zależności od strony ulicy – wschodniej lub zachodniej²²⁰ oraz parametru proporcji H/W.
- c) W ulicach o proporcji H/W równej 1 wskazane jest lokalizowanie drzew jako elementów zacieniających w odległości do 3 m od osłanianej zabudowy, np. w pasie zieleni między chodnikiem a jezdnią (rys. 86). W tym układzie pozwoli to na wykorzystanie w jak największym stopniu potencjału zacieniającego zieleni wysokiej. Przy czym wzdłuż zachodniej pierzei rozplanowanie drzew w odległości 4 m od elewacji może również zapewnić skuteczną osłonę dla ścian parteru, jednak przez krótszy czas. Opcjonalnie zadrzewienia jako ochronę przeciwsłoneczną pierzei można rozplanować pod ścianami budynków, przeznaczając pas zieleni na np. ogródek przydomowy lub gastronomiczny dla usług znajdujących się w parterze (rys. 87). Szpaler może być także zlokalizowany w pasie zieleni przy budynku wzdłuż ścieżki pieszo-rowerowej lub oddzielać te dwie strefy ruchu (rys. 88).
- d) W ulicach o płytkich profilach, gdzie $H/W \leq 0,6$, drzewa mogą być usytuowane w pasie zieleni wzdłuż jezdni nie dalej niż 5 m od budynków (rys. 89). Takie rozplanowanie zieleni wpłynie korzystnie na jej skuteczność jako elementu zacieniającego elewację parteru oraz I piętra (do 6 m wysokości). Zadrzewienia mogą być nasadzone w misach chodnikowych w strefie pieszej lub w pasie zieleni oddzielającym teren ogródków gastronomicznych i chodnik od jezdni (rys. 89). Alternatywnie można rozplanować szpaler pomiędzy jezdnią a chodnikiem lub ścieżką pieszo-rowerową z pasem niskiej zieleni pod ścianami pierzei (rys. 90). W tych układach wzdłuż pierzei zachodniej drzewa mogą być zlokalizowane dalej od zabudowy, tj. do 6 m od zabudowy, jednak w tym przypadku zieleń może osłonić przed słońcem tylko część ścian parteru i przez okres krótszy niż połowa czasu ekspozycji słonecznej tych ścian.

²²⁰ Różną efektywność oddziaływania drzew na mikroklimat ulicy na osi północ-południe w zależności od lokalizacji zieleni po wschodniej lub zachodniej stronie ulicy odnotowano w badaniach Sanusi i in. (2015).



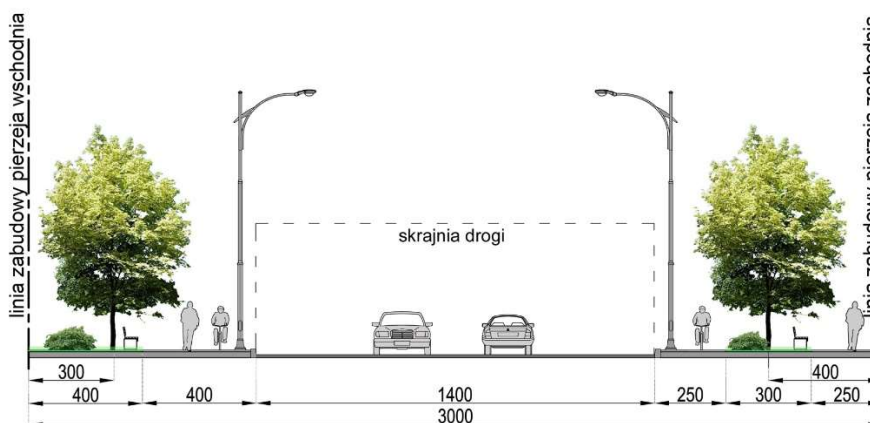
Rysunek 86. Drzewa jako elementy zacieniające pierzeję wschodnią i zachodnią ulicy na osi północ-południe o parametrze $H/W = 1$ zlokalizowane w pasie zieleni oddzielającym chodnik od jezdni

Źródło: Opracowanie własne.



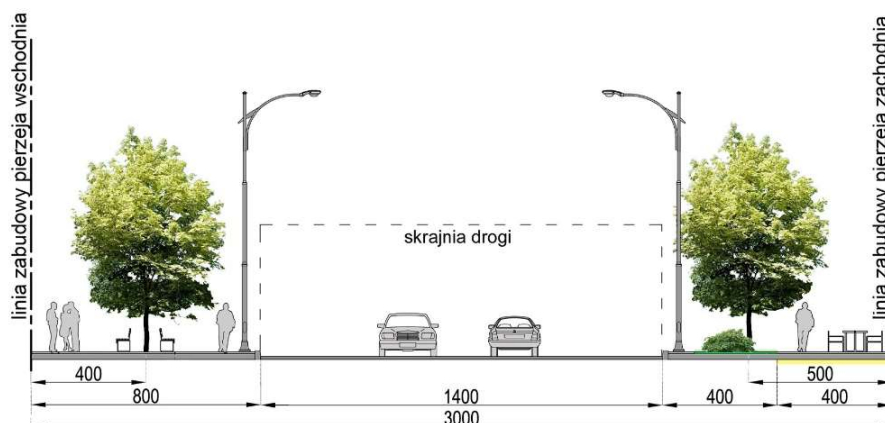
Rysunek 87. Drzewa jako elementy zacieniające pierzeję wschodnią i zachodnią ulicy na osi północ-południe o parametrze $H/W = 1$ zlokalizowane w pasie zieleni pod ścianami pierzei

Źródło: Opracowanie własne.



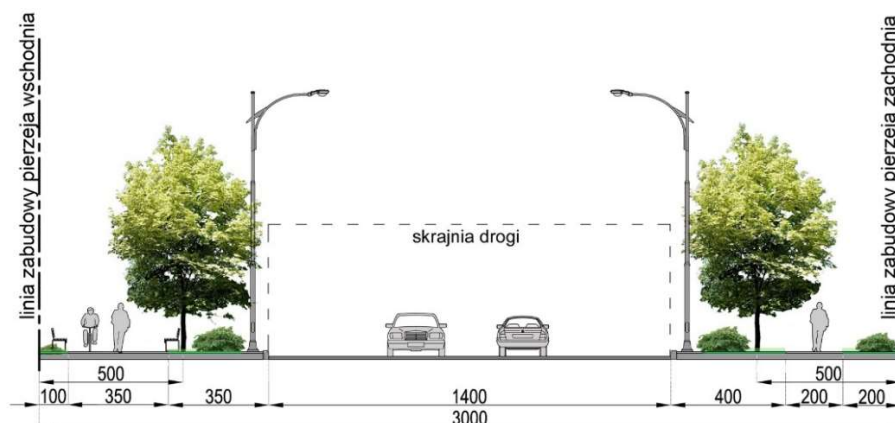
Rysunek 88. Drzewa jako elementy zacieniające pierzeję wschodnią i zachodnią ulicy na osi północ-południe o parametrze $H/W = 1$ zlokalizowane w pasie zieleni pod ścianami pierzei lub oddzielające chodnik od ścieżki rowerowej

Źródło: Opracowanie własne.



Rysunek 89. Drzewa jako elementy zaciennające pierzeję wschodnią i zachodnią ulicy na osi północ–południe o parametrze $H/W \leq 0,6$ zlokalizowane w misach chodnikowych w strefie ruchu pieszego lub w pasie zieleni wzdłuż jezdni

Źródło: Opracowanie własne.



Rysunek 90. Drzewa jako elementy zaciennające pierzeję wschodnią i zachodnią ulicy na osi północ–południe o parametrze $H/W \leq 0,6$ oddzielające chodnik lub ścieżkę rowerowo-pieszą od jezdni

Źródło: Opracowanie własne.

6.2. Opracowana metoda badań

W ramach niniejszej dysertacji wypracowano metodę badań, która pozwala na weryfikację przyjętych rozwiązań ochrony przeciwsłonecznej pierzei ulicy z wykorzystaniem drzew dla dowolnie wybranej lokalizacji. Metodę opracowano z myślą o zastosowaniu jej w procesie projektowania architektonicznego oraz do planowania przestrzennego w celu:

- analizy powierzchni zacienniania elewacji przez wybraną zieleń o wskazanej lokalizacji w przestrzeni danej ulicy,
- analizy warunków insolacji przestrzeni ulicy,
- analizy czasu zacienniania pierzei przez drzewa,
- weryfikacji konieczności zastosowania oprócz zieleni dodatkowych elementów ochrony przeciwsłonecznej na elewacjach,
- analizy wysokości zacienniania ścian przez drzewa,

- weryfikacji relacji geometrycznych między zielenią wysoką a zabudową w danym układzie pod kątem znalezienia najbardziej korzystnych rozwiązań ochrony przeciwsłonecznej.

W tabeli poniżej przedstawiono atuty i potencjalne słabe strony opracowanej metody pod kątem wykorzystania jej w procesie projektowania architektonicznego czy planowania przestrzennego (tab. 38).

Tabela 38. Potencjalne mocne i słabe strony wypracowanej metody badań nad stopniem zacienienia elewacji pierzei przez drzewa

Potencjalne mocne strony	Potencjalne słabe strony
<ul style="list-style-type: none"> • zintegrowanie modelowania 3D oraz analizy zacieniania w ramach jednego oprogramowania Rhino/Grasshopper, co znacznie usprawnia i przyspiesza badania, a także wyklucza potencjalne problemy związane z interoperacyjnością • interaktywna analiza, która pozwala na bieżąco obserwować zacienianie modelu ulicy przez zieleni w zależności od wprowadzanych zmian, np. lokalizacji roślinnych elementów ochrony przeciwsłonecznej • analiza graficzna oraz metrażu powierzchni, co pozwala na dokładne określenie stopnia zacienienia ścian przez drzewa • możliwość zastosowania jej do różnych układów roślinno-architektonicznych • możliwość weryfikacji przyjętych rozwiązań oraz analizy różnych wariantów rozpatrywanych modeli dzięki możliwości łatwego wprowadzenia zmian, m.in. czasu, dla którego ma zostać przeprowadzona symulacja, a także modyfikacji modeli, np. wysokości drzew czy rozpiętości ich korony • narzędzie nie jest skomplikowane w obsłudze 	<ul style="list-style-type: none"> • może okazać się czasochłonnym rozwiązaniem w przypadku prowadzenia symulacji dla dużej liczby elementów o skomplikowanej geometrii, np. modelu drzew o wysokim wskaźniku LAI • wykorzystane do badań narzędzie nie rozróżnia powierzchni zacienionej przez zabudowę i tej przez zieleni, co wpływa na wydłużenie analizy • możliwe różnice w powierzchni zacienienia przez model drzewa w porównaniu do rzeczywistego klonu jawor

Źródło: Opracowanie własne.

Dalsza ocena zaproponowanej metody badań może opierać się na skonfrontowaniu wyników otrzymanych z symulacji godzin nasłonecznienia SHA modelu z danymi uzyskanymi z pomiarów empirycznych z analogicznego, rzeczywistego układu w terenie. Interesujących wniosków mogłaby także dostarczyć analiza zaproponowanego modelu zieleni wysokiej opierająca się np. na porównaniu powierzchni zacienionej przez ten model do tej wygenerowanej przez drzewo o większych uproszczeniach w budowanie, np. z koroną reprezentowaną przez kulę.

Pomimo oczywistych różnic w budowie między modelami zieleni a rzeczywistymi klonami jawor otrzymane wyniki pozwalają zobrazować potencjał i skalę zacienienia elewacji przez drzewa w różnych układach i relacjach geometrycznych z zabudową przez porównanie rozpatrywanych wariantów. Zaproponowana metoda umożliwia weryfikację lokalizacji zieleni



wysokiej pod kątem znalezienia najbardziej korzystnych rozwiązań ochrony przeciwsłonecznej dla wyeksponowanych na słońce pierzei.

Wydaje się, że wypracowana metoda może znaleźć zastosowanie przede wszystkim w analizach architektonicznych i urbanistycznych dotyczących planowania w niewielkiej skali, jak np. ulicy, placów, skwerów²²¹. Z racji zaawansowanej geometrii modeli drzew i potencjalnych ograniczeń dostępnego sprzętu komputerowego przeprowadzenie symulacji dla większego obszaru z dużą ilością zieleni może wymagać uproszczenia modeli zieleni. Dalszy rozwój opracowanej metody badań może opierać się na wykorzystaniu innych, dodatkowych narzędzi przeznaczonych dla projektantów i planistów, np. CityEngine²²².

6.3. Podsumowanie pracy

We współczesnych miastach wzrasta ekologiczna rola zieleni, a zwłaszcza drzew, które stanowią kluczowy element zielonej infrastruktury terenów zurbanizowanych (Armson, 2012). W niniejszej pracy przedstawiono zagadnienia związane z wykorzystaniem zieleni wysokiej do sezonowej ochrony elewacji pierzei ulicznych przed oddziaływaniem promieniowania słonecznego. Wskazano i przeanalizowano możliwości i ograniczenia w zastosowaniu drzew ulicznych jako rozwiązania alternatywnego bądź uzupełniającego dla innych systemów zacieniających zintegrowanych z budynkiem (rozdziały drugi i trzeci). Przedstawiono korzyści wynikające z obecności drzew jako elementów ochrony przeciwsłonecznej zabudowy w przestrzeniach miejskich ulic. W pracy skupiono się przede wszystkim na aspektach architektonicznych i urbanistycznych, które są istotne dla skutecznego zastosowania drzew liściastych jako elementów zacieniających elewacje budynków. W związku z tym przeprowadzono badania wybranego układu roślinno-architektonicznego według założeń i opracowanej metody opisanej w rozdziale czwartym. Do badań wytypowano warianty modelu ulicy reprezentującego drogi zbiorcze i główne jednojezdniowe wraz ze szpalerami drzew liściastych zlokalizowanymi wzdłuż każdej z pierzei. Następnie przeprowadzono symulację godzin nasłonecznienia elewacji budynków w tym układzie w warunkach wilgotnego klimatu kontynentalnego w wytypowanym dniu w półroczu letnim (7 czerwca). Na podstawie numerycznych badań symulacyjnych wykazano, że skuteczność roślin w ochronie przeciwsłonecznej zależy od ich relacji geometrycznych z osłanianą zabudową, geometrii układu oraz jego orientacji względem stron świata. Odnotowano wpływ tych elementów na powierzchnię, czas trwania i pojawienia się zacienienia elewacji pierzei ulicznych przez zieleń (rozdział piąty). Analiza zacieniania wariantów wybranego modelu pomogła

²²¹ Pomocne dla projektantów może okazać się utworzenie biblioteki modeli różnych gatunków drzew, które można byłoby wykorzystać w symulacji SHA.

²²² CityEngine to oprogramowanie do modelowania 3D i tworzenia interaktywnych środowisk miejskich w oparciu m.in. o rzeczywiste dane GIS (<https://www.esri.com/en-us/arcgis/products/arcgis-cityengine/overview>, dostęp: 07.11.2020).



zrealizować jedno z zadań przedstawionych na wstępie pracy, tj. określenie możliwych sposobów kształtowania układów roślinno-architektonicznych z drzewami w przestrzeni miejskich ulic jako formy ochrony przeciwsłonecznej elewacji budynków w okresach intensywnego nasłonecznienia w warunkach wilgotnego klimatu kontynentalnego (rozdział piąty).

Zgodnie z wyznaczonymi na wstępie celami naukowymi pracy na podstawie wyników badań przedstawiono również wnioski, które uzupełniają i uszczegółwiają dotychczasowe wytyczne odnośnie do wykorzystania przez projektantów drzew do ochrony przeciwsłonecznej elewacji budynków w ulicach miejskich zorientowanych w kierunkach wschód–zachód i północ–południe (rozdział szósty). Na podstawie wniosków sformułowano zalecenia dotyczące rozplanowania zieleni wysokiej jako elementu zacieniającego w przestrzeni badanego modelu ulicy w strefie między zabudową a jezdnią, w szczególności relacji geometrycznych pomiędzy drzewami a osłanianymi budynkami (rozdział szósty).

Praca realizuje jeszcze jeden cel związany z opracowaniem metody badań, modelowania oraz oceny układów roślinno-architektonicznych z zielenią wysoką pod kątem skutecznej ochrony przeciwsłonecznej zabudowy. Zgodnie z założeniami zaproponowano metodę przeznaczoną dla architektów bądź urbanistów stanowiącą narzędzie wspomagające proces projektowania i planowania w oparciu o przystępny program dla projektantów. Narzędzie badawcze, a także założenia i sposób modelowania elementów badanego układu roślinno-architektonicznego szczegółowo opisano w rozdziale czwartym. Przeprowadzone w ramach badań symulacje nasłonecznienia wariantów modelu pozwoliły na sprawdzenie i ocenę zaproponowanej metody, którą przedstawiono uprzednio w niniejszym rozdziale.

Metodę badań układów roślinno-architektonicznych zastosowaną w niniejszej pracy warto wykorzystać jako punkt wyjścia do dalszych analiz m.in. ze związkiem komfortu termicznego w przestrzeni ulicy ze stopniem zacienienia powierzchni przez drzewa. Przedmiotem naukowego zainteresowania może być również kwestia wpływu wyboru lokalizacji zieleni wysokiej w przestrzeni ulicy z uwagi na najkorzystniejszą ochronę przeciwsłoneczną zabudowy na warunki przepływu wiatru.

Badania oparte na wypracowanej metodzie mogą być kontynuowane również dla innych układów, np. zieleni wysokiej zacieniającej plac, dziedziniec itp., czy dla modeli zieleni reprezentujących inne gatunki drzew. Interesujących wniosków może dostarczyć także analiza układów roślinno-architektonicznych w innych warunkach insolacji, np. wynikających ze zmiany lokalizacji czy rozpatrywanego przedziału czasowego.

Ważną częścią zaprezentowanej metody badań jest sposób modelowania zieleni wysokiej ze względu na skomplikowaną geometrię drzew. Zagadnienie to wymaga dalszych badań i analiz, np. porównania różnic w powierzchni zacienienia pomiędzy wirtualnym modelem a analogicznym rzeczywistym układem w terenie. Do modelu zieleni można wprowadzić

także kolejne udoskonalenia, które pozwoliłyby m.in. na analizę zacienionych powierzchni przy bezlistnych koronach.

Ustalenia przedstawione w niniejszej pracy dotyczące kształtowania układów roślinno-architektonicznych z zielenią wysoką ze względu na ochronę przeciwsłoneczną budynków mogą być przydatne przy projektowaniu i planowaniu zabudowy oraz zadrzewień w jej otoczeniu. Ponadto mogą one posłużyć do opracowania wytycznych dotyczących nasadzeń w przestrzeniach publicznych, które zapewniłyby racjonalną osłonę dla części elewacji budynków wyeksponowanych na słońce. Zaprezentowane zalecenia w zakresie rozplanowania zadrzewień wzdłuż pierzei ulicznych dostarczają nowych informacji co do relacji geometrycznych pomiędzy zielenią a zabudową z uwagi na sezonową osłonę przed promieniowaniem słonecznym.

Ze względu na postępującą urbanizację i niekorzystne zmiany klimatyczne, a co za tym idzie – pogarszające się warunki życia we współczesnych miastach wzrasta ekologiczna rola zieleni miejskiej, w tym ta związana z ochroną przeciwsłoneczną zabudowy w okresach intensywnej insolacji. Przedstawione w niniejszej pracy wnioski uzasadniają wykorzystanie drzew liściastych do osłony pierzei ulicznych przed bezpośrednim promieniowaniem słonecznym jako rozwiązaniem alternatywnym bądź uzupełniającym dla systemów zacieniających zintegrowanych z budynkiem. Opracowana i zastosowana w pracy metoda badań oparta na symulacji komputerowej przemawia za zastosowaniem współczesnych metod symulacyjnych jako narzędzia wspomagającego podejmowanie racjonalnych decyzji projektowych w zakresie rozplanowania zadrzewień liściastych jako elementów zacieniających budynki. Wykorzystanie metod symulacyjnych pozwala na włączanie w rozwiązania architektoniczno-urbanistycznych zieleni w sposób, który wpływa na maksymalizację korzyści płynących z obecności roślin w przestrzeni miejskiej.

Wobec powyższego w opinii autorki pracy potwierdzona została teza przedstawiona na wstępie. Rozprawa i przeprowadzone w jej ramach badania wybranego układu roślinno-architektonicznego dostarczyły odpowiedzi na postawiony problem badawczy w zakresie analizowanych i przyjętych w rozważaniach uwarunkowań. Szersze rozpoznanie złożonego zagadnienia, jakim jest wykorzystanie funkcji technicznych zieleni wysokiej w rozwiązaniach architektoniczno-urbanistycznych wiąże się z kontynuacją i rozszerzeniem badań²²³.

²²³ Propozycje przedstawiono na wstępie niniejszego rozdziału w podrozdziale „Dyskusja” – str. 160.

Bibliografia

1. Abdel-Aziz D.M., 2014. *Effects of Tree Shading on Building's Energy Consumption*. „Architectural Engineering Technology”, 3(4), s. 1-7.
2. Abreu L.V., Labaki L.Ch., 2008. *Evaluation of the radius of influence of different arboreal species on microclimate provided by vegetation*. 25th Conference on Passive and Low Energy Architecture, 22-24 października, Dublin.
3. Akbari H., 2002. *Shade trees reduce building energy use and CO₂ emissions from power plants*. „Environmental Pollution”, 116(1), s. 119-126 [DOI: 10.1016/S0269-7491(01)00264-0].
4. Akbari H., Bretz S.E., Kurn D.M., Hanford J., 1997. *Peak Power and Cooling Energy Savings of Shade Trees*. „Energy and Buildings”, 25(2), s. 139-148 [DOI: 10.1016/S0378-7788(96)01003-1].
5. Akbari H., Pomerantz M., Taha H., 2001. *Cool surfaces and shade trees to reduce energy use and improve air quality in urban areas*. „Solar Energy”, 7(3), s. 295-310 [DOI: 10.1016/S0038-092X(00)00089-X].
6. Ali-Toudert F., Mayer H., 2004. *Planning-oriented Assessment of Street thermal Comfort in Arid Regions*. 21th Conference on Passive and Low Energy Architecture, 19-22 września, Eindhoven.
7. Ali-Toudert F., Mayer H., 2005. *Thermal comfort in urban streets with trees under hot summer conditions*. The 22th Conference on Passive and Low Energy Architecture (PLEA), 13-16 listopada 2005, Bejrut, Liban.
8. Ali-Toudert F., Mayer H., 2006. *Effects of street design on outdoor thermal comfort*. [https://www.researchgate.net/publication/242157021_Effects_of_Street_Design_on_Outdoor_Thermal_Comfort, dostęp 22.09.2020].
9. Armson D., 2012. *The effect of Trees and Grass in the Thermal and Hydrological Performance of an Urban Area*. PhD thesis, Manchester.
10. Armson D., Rahman M.A., Ennos A.R., 2013. *A comparison of the shading effectiveness of five different street tree species in Manchester, UK*. „Arboriculture & Urban Forestry”, 39(4), s. 157-164.
11. Arnfield A.J., 1990. *Street Design and Urban Canyon Solar Access*. „Energy and Buildings”, 14(2), s. 117-131 [DOI: 10.1016/0378-7788(90)90031-D].
12. Azkorra Z., Pérez G., Coma J., Cabeza L.F., Bures S., Álvaro J.E., Erkoreka A., Urrestarazu M., 2015. *Evaluation of green walls as a passive acoustic insulation system for buildings*. „Applied Acoustics”, 89, s. 46-56 [DOI: 10.1016/j.apacoust.2014.09.010].
13. Bach A., Frazik-Adamczyk M., 2006. *Charakterystyka zagrożeń zieleni miejskiej ze szczególnym uwzględnieniem zieleni w ciągach komunikacyjnych*. Kraków, Akademia Rolnicza w Krakowie [https://docplayer.pl/21397179-Charakterystyka-zagroszen-zieleni-miejskiej-ze-szczegolnym-uwzględnieniem-zieleni-w-ciagach-komunikacyjnych.html, dostęp: 23.09.2020].
14. Bać A., 2016. *Zrównoważenie w architekturze od idei do realizacji na tle doświadczeń kanadyjskich*. Wrocław, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej.
15. Badach J., Dymnicka M., Baranowski A., 2020. *Urban Vegetation in Air Quality Management: A review and Policy Framework*. „Sustainability”, 12(3), 1258 [DOI: 10.3390/su12031258].
16. Balakrishnan P., Jakubiec J.A., 2016. *Measuring light through trees for daylight simulations: a photographic and photometric method*. Conference: Building Simulation and Optimization, Newcastle, England [https://www.researchgate.net/publication/308612024_Measuring_Light_Through_Trees_for_Daylight_Simulations_A_Photographic_and_Photometric_method, dostęp: 23.09.2020].
17. Ballester J., Rodo X., Giorgi F., 2010. *Future changes in Central Europe heat waves expected to mostly follow summer mean warming*. „Climate Dynamics”, 35(708), s. 1191-1205 [DOI: 10.1007/s00382-009-0641-5].
18. Bartnicka M., 2010. *Wczoraj, dziś i jutro w promieniach słonecznych (?)*. „Czasopismo Techniczne. Architektura”, t. 107, z. 7-A/2, s. 19-23.
19. Bartnicka M., Ullman I., 2009. *Wykorzystać wszystkie atuty zieleni*. „Architecturae et Artibus”, 1(2), s. 17-22.

20. Błażejczyk K., Baranowski J., Błażejczyk A., 2015. *Wpływ klimatu na stan zdrowia w Polsce: stan aktualny oraz prognoza do 2100 roku*. Warszawa, Wydawnictwo Akademickie SEDNO Spółka z o.o.
21. Bochenek A.D., Klemm K., 2020. *The impact of passive green technologies on the microclimate of historic urban structures: The Case Study of Lodz*. „Atmosphere”, 11(9), s. 974 [DOI: 10.3390/atmos11090974].
22. Boćkowski M., Rogowski W., 2018. *Wycena usług ekosystemowych oraz ich zastosowanie w rachunku ekonomicznym – praktyczne przykłady w zarządzaniu zasobami przyrodniczymi*. „Studia i Prace Kolegium Zarządzania i Finansów”, 167, s. 37-64.
23. Bogdanowski J., 1976. *Kompozycja i planowanie w architekturze krajobrazu*. Wrocław, Zakład Narodowy im. Ossolińskich.
24. Borowski J., b.d. *Czy pnącza niszczą elewacje?* [<https://www.clematis.com.pl/informacje-o-roslinach/eksperci-radza/dr-hab-jacek-borowski/1133-czy-pnacza-niszczą-elewacje/>, dostęp: 23.09.2020].
25. Borowski J., 2016. *Jak pnącza mogą wpłynąć na współczynniki zazielenienia terenu?* [<https://www.clematis.com.pl/informacje-o-roslinach/eksperci-radza/dr-hab-jacek-borowski/1020-jak-pnacza-moga-wplynac-na-wspolczynniki-zazielenienia-terenu/>, dostęp: 06.05.2020].
26. Borowski J., Fortuna-Antoszkiewicz B., Łukaszewicz J., Rosłon-Szeryńska E., Suchocka M., Wysocki C., 2016. *Standardy kształtowania zieleni Warszawy*. [http://konsultacje.um.warszawa.pl/sites/konsultacje.um.warszawa.pl/files/standardy_kształtowania_zieleni_warszawy_kwiecien2016.pdf, dostęp: 23.09.2020].
27. Borowski J., Latocha P., 2006. *Dobór drzew i krzewów do warunków przyulicznych Warszawy i miast centralnej Polski*. „Rocznik Dendrologiczny”, 54, s. 83-89.
28. Borowski J., Pstrągowska M., 2009. *Zasadnicze kierunki kształtowania zadrzewień przyulicznych*. W: M.E. Drozdek, I. Wojewoda, A. Purcel (red.). *Zieleń miast i wsi. Techniki i technologie dla terenów zieleni*. Sulechów, Oficyna Wydawnicza Państwowej Wyższej Szkoły Zawodowej w Sulechowie, s. 7-18.
29. Borowski J., Pstrągowska M., 2015. *Rośliny drzewiaste w osiedlach mieszkaniowych*. W: B. Szulczewska (red.). *Osiedle mieszkaniowe w strukturze przyrodniczej miasta*. Warszawa, Wydawnictwo SGGW.
30. Brach M., Stępnia J., 2016. *Modelowanie cienia w obszarach zurbanizowanych*. „Roczniki Geomatyki”, t. 14, z. 4(73), s. 427-435.
31. Celadyn W., 1992. *Architektura a systemy roślinne. Studium relacji między elementami architektonicznymi a roślinnymi*. Monografia 134. Kraków, Politechnika Krakowska.
32. Chmielewski W., 1996. *Zieleń Warszawy – funkcje, problemy i nadzieje w obliczu realizacji programu ekorozwoju*. W: W. Chmielewski, W. Dmuchowski, K. Niekrasz (red.). *Zieleń Warszawy – problemy i nadzieje, Konferencja Naukowo-Techniczna, Warszawa-Powsin, 6 września 1996*. Ogród Botaniczny PAN.
33. Cole L., McPhearson T., Herzog C.P., Russ A., 2017. *Urban Green Infrastructure*. W: A. Russ, M. Krasny (red.). *Urban Environmental Education Review*. Comstock Publishing Associates, s. 261-270.
34. Coutts A., Tapper N., 2017. *Trees for a Cool City: Guidelines for optimised tree placement*. Clayton, Cooperative Research Centre for Water Sensitive Cities.
35. Czarnecki S., Sławińska E., 1984. *Badanie wpływu zieleni na zmniejszenie hałasu w aglomeracjach miejskich*. W: H.B. Szczepanowska (red.). *Wpływ zieleni na kształtowanie środowiska miejskiego*. Warszawa, Państwowe Wydawnictwo Naukowe, s. 109-124.
36. Czerwień M., Lewińska J., 2000. *Zieleń w mieście*. Kraków, Instytut Gospodarki Przestrzennej i Komunalnej.
37. Dąbrowska-Milewska, G., 2010. *Standardy urbanistyczne dla terenów mieszkaniowych – wybrane zagadnienia*. „Architecturae et Artibus”, nr (3)1, s. 17-31.
38. Deb Ch., Ramachandriah A., 2010. *The significance of Physiological Equivalent Temperature (PET) in outdoor thermal comfort studies*. „International Journal of Engineering Science and Technology”, 2(7), s. 2825-2828.

39. Dimoudi A., Nikolopoulou M., 2003. *Vegetation in the urban environment: microclimatic analysis and benefits*. „Energy and Buildings”, 35(1), s. 69-76 [DOI: 10.1016/S0378-7788(02)00081-6].
40. Doick K., Hutchings T., 2013. *Air temperature regulation by urban trees and green infrastructure*. Forestry Commission [https://www.researchgate.net/publication/259889679_Air_temperature_regulation_by_urban_trees_and_green_infrastructure, dostęp: 22.09.2020].
41. Donovan G.H., Butry D.T., 2009. *The value of shade: Estimating the effect of urban trees on summertime electricity use*. „Energy and Buildings”, 41(6), s. 662-668 [DOI: 10.1016/j.enbuild.2009.01.002].
42. Dougherty E., 1958. *Shading coefficient of six tree species in Tuscon and their impact on annual energy loads*. PhD thesis, Arizona.
43. Drozda P., Dworniczak Ł., Dyngosz M., Gałęcka-Drozda A., Krynicki M., Popów-Nowicka A., Rayss J., Reda P., Skarzyński D., 2018. *Standardy kształtowania zieleni w Łodzi*. [https://sak.org.pl/wp-content/uploads/2019/07/Standardy-kszt%C5%82owania-zieleni-%C5%81odzi_2019.06.23.pdf, dostęp: 23.09.2020].
44. Dudzińska-Jarmolińska A., 2010. *Zielone budynki – symbioza martwej materii z żywą*. „Prace Naukowe Wydziału Architektury Politechniki Wrocławskiej. Architektura Mieszkaniowa”, 8(6), s. 103-108.
45. Ellis T.W., Leguedois S., Hairsine P.B., Tongway D.J., 2006. Capture of overland flow by a tree belt on a pastured hillslope in South-Eastern Australia. „Australian Journal of Soil Research”, 44(2), s. 117-125 [DOI: 10.1071/SR05130].
46. Emmanuel R., Johansson E., Rosenlund H., 2007. *Urban shading – A design option for the tropics? A study in Colombo, Sri Lanka*. „International Journal of Climatology”, 27(14), s. 1995-2004 [DOI: 10.1002/joc.1609].
47. Florberg J., Small J., Bradley G., Early., Fixen L., Mega M., Reibman J., Rundell E., Staeheli P., 2013. *City of Seattle, Urban Forest Stewardship Plan*. [https://www.seattle.gov/Documents/Departments/Trees/Mangement/2013_Urban_Forest_Stewardship_Plan.pdf, dostęp: 23.09.2020].
48. Fortuna-Antoszkiewicz B., 2004. *Struktura przestrzenna nasadzeń drzew przy ulicy miejskiej w świetle archiwaliów*. W: E. Ramus (red.). *Przyroda i miasto*, t. 6. Warszawa, Wydawnictwo SGGW, s. 218-232.
49. Fortuna-Antoszkiewicz B., 2019. *Roślinność w kompozycji przestrzennej – wartości i zachowanie dziedzictwa*. Warszawa, Wydawnictwo SGGW.
50. Garcia-Nevado E., Pages-Ramon A., Coch H., 2016. *Solar Access Assessment in Dense Urban Environments: The Effect of Intersections in an Urban Canyon*. „Energies”, 9(10), s. 1-12 [DOI: 10.3390/en9100796].
51. Gawłowska A., 2004. *Biotyczne przestrzenie śródmieścia jako czynnik modyfikujący klimat i źródło ładu*. W: J. Rylke (red.). *Przyroda i miasto*, t. 6. Warszawa, SGGW, s. 259-264.
52. Giergiczyński M., Kronenberg J., 2012. *Jak wycenić wartość przyrody w mieście? Wycena drzew przyulicznych w centrum Łodzi*. „Zrównoważony Rozwój – Zastosowania”, 3, s. 73-89.
53. Gill S., Handley J., Ennos R., Pauleit S., 2007. *Adapting Cities for Climate Change: The Role of the Green Infrastructure*. „Built Environment”, 3(1), s. 115-133.
54. Givoni B., 1998. *Climate considerations in buildings and urban design*. USA, Van Nostrand Reinhold.
55. Grochulska-Salak M., Zielonko-Jung K., Zinowiec-Cieplik K., 2018. *Modeling buildings and natural systems in urban areas*. „Prace Naukowe Uniwersytetu Ekonomicznego we Wrocławiu”, 504, s. 54-63 [DOI: 10.15611/pn.2018.504.05].
56. Gzell S., 1996. *Zieleń w kompozycji urbanistycznej – budowa i przebudowa miast na przykładzie Warszawy*. W: W. Chmielewski, W. Dmuchowski, K. Niekrasz (red.). *Zieleń Warszawy, problemy i nadzieje, Konferencja Naukowo-Techniczna, Warszawa-Powsin, 6 września 1996*. Ogród Botaniczny PAN.
57. Haber Z., Urbański P., 2010. *Wpływ roślinności na środowisko*. W: B. Politycka (red.). *Kształtowanie terenów zieleni z elementami ekologii*. Poznań, Wydawnictwo Uniwersytetu Przyrodniczego w Poznaniu, s. 76-80.

58. Hacker J.N., Holmes M.J., 2007. *Thermal Comfort: Climate Change and the Environmental Design of Buildings in the United Kingdom*. „Built Environment”, 33(1), s. 97-114 [DOI: 10.2148/benv.33.1.97].
59. Heisler G.M., 1977. *Trees modify metropolitan climate and noise*. „Journal of Arboriculture”, 3(11), s. 201-207.
60. Heisler G.M., 1986a. *Effects of individual trees on the solar radiation climate of small buildings*. „Urban Ecology”, 9(3-4), s. 337-359 [DOI: 10.1016/0304-4009(86)90008-2].
61. Heisler G.M., 1986b. *Energy savings with trees*. „Journal of Arboriculture”, 12(5), s. 113-124.
62. Hes D., Dawkins A., Jensen Ch., Aye L., 2011. *A modelling method to assess the effect of tree shading for building performance simulation*. 12th Conference of International Building Performance Simulation Association, 14-16 listopada, Sydney.
63. Holick M.F., 1998. *Biological effects of light: historical and new perspectives*. W: M.F. Holick, Jung E.G. (eds.). *Biological effects of light*. New York, Springer Science+Business Media, s. 11-32 [DOI: 10.1007/978-1-4615-5051-8].
64. Huang Y.J., Akbari H., Taha H., Rosenfeld A.H., 1987. *The Potential of Vegetation in Reducing Summer Cooling Loads in Residential Buildings*. „Journal of Applied Meteorology”, 26(9), s. 1103-1116 [DOI: 10.1175/1520-0450(1987)026<1103:TPOVIR>2.0.CO;2].
65. Hui Li, 2016. *Impacts of Pavement Strategies on Human Thermal Comfort*. W: Li Hui (eds.). *Pavement Materials for Heat Island Mitigation. Design and Management Strategies*. Butterworth-Heinemann, s. 281-306 [DOI: 10.1016/B978-0-12-803476-7.00013-1].
66. Hutchison B.A., Taylor F.G., Wendt R.L., 1982. *Use of Vegetation to Ameliorate Building Microclimates: An Assessment of Energy Conservation Potentials*. Environmental Sciences Division [DOI: 10.2172/5327958].
67. Hwang W.H., Wiseman P.E., Thomas V.A., 2016. *Simulation of Shade Tree Effects on Residential Energy Consumption in Four U.S. Cities*. „Cities and the Environment”, 9(1), s. 11-21 [https://www.researchgate.net/publication/308430607_Simulation_of_Shade_Tree_Effects_on_Residential_Energy_Consumption_in_Four_US_Cities, dostęp: 22.09.2020].
68. Januchta-Szostak A., 2019. *Retencja wód opadowych w przestrzeni publicznej*. „Przegląd Komunalny”, 5, s. 108-110.
69. Kastendeuch P., 2012. *Local Energy Balance*. W: B. Beckers (red.). *Solar Energy at Urban Scale*. Wiley, s. 119-138.
70. Klemm W., Heusinkveld B., Lenzholzer S., van Hove B., 2015. *Street greenery and its physical and psychological impact on thermal comfort*. „Landscape and Urban Planning”, 138, s. 87-98 [DOI: 10.1016/j.landurbplan.2015.02.009].
71. Konarska J., Lindberg F., Larsson A., Thorsson S., Homer B., 2014. *Transmissivity of solar radiation through crown of single urban trees – application for outdoor thermal comfort modelling*. „Theoretical and Applied Climatology”, 117(3-4), s. 363-376 [DOI: 10.1007/s00704-013-1000-3].
72. Kong L., Ka-Lun Lau K., Yuan CH., Chen Y., Xu Y., Ren Ch., 2017. *Regulation of outdoor thermal comfort by trees in Hong Kong*. „Sustainable Cities and Society”, 31, s. 12-25 [DOI: 10.1016/j.scs.2017.01.018].
73. Kosmala M., 2005. *Po co ludziom drzewa, czyli o roli i znaczeniu drzew w życiu człowieka*. Zieleń miejska. Naturalne bogactwo miasta. Materiały konferencyjne, Toruń, s. 75-81.
74. Kosmala M., 2016. *Ewolucja poglądów na rolę i znaczenie zieleni w miastach*. W: A. Januchta-Szostak, M. Banach (red.). *Zrównoważone miasto – idee i realia*, Poznań, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej.
75. Kowalski P., 2010. *Zielona infrastruktura w miejskiej przestrzeni publicznej*. „Czasopismo Techniczne. Architektura”, t. 107, z. 2-A, s. 247-253.
76. Krigger J., Dorsi C., 2004. *Residential Energy: cost savings and comfort for existing buildings*. Montana, Saturn Resource Management.
77. Kurn D.M., Bretz S., Huang B., Akbari H., 1994. *The Potential for Reducing Urban Air Temperatures and Energy Consumption Through Vegetative Cooling*. Technical Report [DOI: 10.2172/10180633].

78. Laband D.N., Sophocleus J.P., 2009. *An Experimental Analysis of the Impact of Tree Shade on Electricity Consumption*. „Arboriculture & Urban Forestry”, 35(4), s. 197-202.
79. Landsberg H.E., 1981. *The Urban Heat Island*. W: H.E. Landsberg (ed.). *The Urban Climate*. New York, Academic Press, s. 83-126.
80. Laskowski L., 1987. *Wybrane zagadnienia fizyki miasta*. Warszawa, Centralny Ośrodek Informacji i Budownictwa.
81. Lee H., Holst J., Mayer H., 2013. Modification of Human-Biometeorologically Significant Radiant Flux Densities by Shading as Local Method to Mitigate Heat Stress in Summer within Urban Street Canyons. „Advances in Meteorology”, 2013, Article ID 312572 [DOI: 10.1155/2013/312572].
82. 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, s. 37-50 [DOI: 10.1016/j.landurbplan.2015.12.004].
83. Lewińska J., 2000. *Klimat miasta: zasoby, zagrożenia, kształtowanie*. Kraków, Instytut Gospodarki Przestrzennej i Komunalnej.
84. Lewińska J., Zgud K., Baścik J., Wiatrak W., 1990. *Klimat obszarów zurbanizowanych*. Warszawa, Instytut Gospodarki Przestrzennej i Komunalnej.
85. Lindberg F., Grimmond Ch.S.B., 2011. *The influence of vegetation and building morphology on shadow patterns and mean radiant temperatures in urban areas: Model development and evaluation*. „Theoretical and Applied Climatology”, 105(3), s. 311-323 [DOI: 10.1007/s00704-010-0382-8].
86. Lis A., 2015. *Temperatura ekwiwalentna i operatywna w ocenie środowiska wewnątrz*. „Zeszyty Naukowe Politechniki Częstochowskiej. Budownictwo”, z. 21(171), s. 183-189 [https://bud.pcz.pl/attachment/id/1094, dostęp: 13.10.2020].
87. Łukasiewicz A., Łukasiewicz S., 2016. *Rola i kształtowanie zieleni miejskiej*. Poznań, Wydawnictwo Naukowe UAM.
88. Łukasiewicz S., 2011. *Drzewa i krzewy przyuliczne polecane do obsadzeń ulicznych w miastach (ze szczególnym uwzględnieniem środkowozachodniej Polski)*. W: M.E. Drozdek (red.). *Rośliny do zadań specjalnych*. Sulechów, Wydawnictwo PWSZ, s. 314-325.
89. Łukaszewicz J., 2019. *Zadrzewienia w krajobrazie miasta – wybrane aspekty kształtowania struktury i funkcji*. Warszawa, Wydawnictwo SGGW.
90. Mahgoub M.E., Hamza N., 2020. *A behavioural Analysis of Outdoor Thermal Comfort: A Comparative Analysis between Artificially Shaded and Sun-Exposed Urban Sites*. „Sustainability”, 12(21) [DOI: 10.3390/su12219032].
91. Marchwiński J., Zielonko-Jung K., 2012. *Współczesna architektura proekologiczna*. Warszawa, Wydawnictwo Naukowe PWN SA.
92. Matuszko D., 2010. *O terminologii dotyczącej promieniowania słonecznego*. „Polska Energetyka Słoneczna”, 2-4, s. 27-30.
93. McPherson E.G., 1998. *Atmospheric carbon dioxide reduction by Sacramento's urban forest*. „Journal of Arboriculture”, 24(4), s. 215-223.
94. McPherson E.G., 2007. *Benefit-Based Tree Valuation*. „Arboriculture & Urban Forestry”, 33(1), s. 1-11.
95. McPherson E.G., Herrington L.P., Heisler G., 1988. *Impacts of vegetation on residential heating and cooling*. „Energy and Buildings”, 12(1), s. 41-51 [DOI: 10.1016/0378-7788(88)90054-0].
96. McPherson E.G., Muchnick J., 2005. *Effects of street tree shade on asphalt concrete pavement performance*. „Journal of Arboriculture”, 31(6), s. 303-310.
97. McPherson E.G., Peper P.J., 1996. *Costs of street tree damage to infrastructure*. „Arboricultural Journal”, 20(2), s.143-160 [DOI: 10.1080/03071375.1996.9747110].
98. McPherson E.G., Rowntree R.A., 1993. *Energy conservation potential of urban tree planting*. „Journal of Arboriculture”, 19(6), s. 321-331.
99. McPherson E.G., Simpson J.R., 2003. *Potential energy savings in buildings by an urban tree planting programme in California*. „Urban Forestry & Urban Greening”, 2(2), s. 73-86 [DOI: 10.1078/1618-8667-00025].

100. McPherson E.G., Simpson J.R., Scott K.I., 2001. *Actualizing microclimate and air quality benefits with parking lot tree shade ordinances*. „Wetter und Leben”, 50, s. 353-369.
101. Meier A.K., 1990. *Measured cooling savings from vegetative landscaping*. American Council for an Energy-Efficient Economy, „Environment”, 4, s. 133-143.
102. Misni A., 2012. *The effects of surrounding vegetation, building construction and human factors on the thermal performance of housing in a tropical environment*. PhD thesis, Wellington.
103. Muras P., 2016. *Standardy zakładania i pielęgnacji podstawowych rodzajów terenów zieleni w Krakowie na lata 2017-2030*. Kraków [http://zzm.krakow.pl/images/pliki/zamowienia/2017_17/zalacznik_4.pdf, dostęp: 23.09.2020].
104. Nieroda B., Gwizdak W., 2020. *Miejsce dla drzewa*. „Zawód: Architekt”, 76, s. 86-92 [http://www.zawod-architekt.pl/pdf/66_2020-12-10_20-14-24_5fd27390b22ed-book_za_76.pdf, dostęp: 13.01.2021].
105. Núñez M., Oke T.R., 1977. *The Energy Balance of an Urban Canyon*. „Journal of Applied Meteorology”, 16(1), s. 11-19 [DOI: 10.1175/1520-0450(1977)016<0011:TEBOAU>2.0.CO;2].
106. Nyka L., 2012. *Przestrzeń miejska jako krajobraz*. „Czasopismo Techniczne. Architektura”. t. 109, z. 1-A/2, s. 49-59.
107. Oke T.R., 1988. *Street Design and Urban Canopy Layer Climate*. „Energy and Buildings”, 11(1-3), s. 103-113 [DOI: 10.1016/0378-7788(88)90026-6].
108. Oleksyn H., 2007. *Kompozycje roślinne w kształtowaniu terenów zieleni*. Poznań, Wydawnictwo Akademii Rolniczej.
109. Olgay A., Olgay V., 1976. *Solar control & shading devices*. New Jersey, Princeton University Press.
110. Orzeszek-Gajewska B., 1984. *Kształtowanie terenów zieleni w miastach*. Warszawa, Państwowe Wydawnictwo Naukowe.
111. Orzeszkowa B., 1972. *Zieleń i miasto*. Warszawa, Państwowe Wydawnictwo Naukowe.
112. Pandit R., Laband D.N., 2010. *Energy savings from tree shade*. „Ecological Economics”, 69(6), s. 1324-1329 [DOI: 10.1016/j.ecolecon.2010.01.009].
113. Perini K., Rosasco P., 2013. *Cost-benefit analysis for green facades and living wall systems*. „Building and Environment”, 70, s. 110-121 [DOI: 10.1016/j.buildenv.2013.08.012].
114. Pieter J., 1967. *Ogólna metodologia pracy naukowej*. Wrocław–Warszawa–Kraków, Zakład Narodowy im. Ossolińskich, Wydawnictwo Polskiej Akademii Nauk.
115. Pluta K., 2014. *Przestrzenie publiczne miast europejskich. Projektowanie urbanistyczne*. Warszawa, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej.
116. PN-76/E-05125 Elektroenergetyczne i sygnalizacyjne linie kablowe – Projektowanie i budowa
117. PN-76/E-05100 Elektroenergetyczne linie napowietrzne – Projektowanie i budowa
118. Ptaszycka A., 1950. *Przestrzenie zielone w miastach*. Poznań, Ludowa Spółdzielnia Wydawnicza.
119. Rahman M.A., Ennos A.R., 2016. *What we know and don't know about the cooling benefits of urban trees*. Trees & Design Action Group [DOI: 10.13140/RG.2.1.5122.2645].
120. Roślon-Szeryńska E., *Drzewa w przestrzeni zurbanizowanej korzyści a zagrożenia*. Warszawa, Wydawnictwo SGGW.
121. Roudsari M.S., Pak M., Smith A., Gordon Gill Architecture, 2013. *Ladybug: a parametric environmental plugin for grasshopper to help designers create an environmentally-conscious design*. 13th Conference of International Building Performance SIMULATION association, 26-28 August, Chambéry.
122. Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 15 stycznia 2007 r. w sprawie szczegółowych warunków funkcjonowania systemów ciepłowniczych, Dz.U. z 2007 r. Nr 16, poz. 92.
123. Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 22 kwietnia 2002 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie, Dz.U. z 2019 r. poz. 1065, z późn. zm.
124. Rozporządzenie Ministra Łączności z dnia 12 marca 1997 r., MP Nr 13, poz. 95, zm. MP Nr 32, poz. 372 z 1995 r.

125. Rozporządzenie Ministra Przemysłu i Handlu z dnia 14 listopada 1995 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać sieci gazowe, Dz.U. Nr 89, poz. 414.
126. Rozporządzenie Ministra Spraw Wewnętrznych i Administracji z dnia 24 lipca 2009 r. w sprawie przeciwpożarowego zaopatrzenia w wodę oraz dróg pożarowych, Dz.U. z 2002 r. Nr 147, poz. 1229, z późn. zm.
127. Rozporządzenie Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej z dnia 2 marca 1999 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać drogi publiczne i ich usytuowanie, Dz.U. z 2016 r. poz. 124.
128. Różański S., 1959. *Budowa miasta a jego klimat*. Warszawa, Wydawnictwo Arkady.
129. Rybak-Niedziółka K., 2018. *Miasto jako krajobraz*. „Studia”, t. 191, Warszawa, PAN.
130. Ryńska E.D., 2001. *Bioklimatyka a forma architektoniczna*. Warszawa, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej.
131. Sanusi R., Johnstone D.M., May P.B., Livesley S.J., 2015. *Street Orientation and Side of the Street Greatly Influence the Microclimatic Benefits Street Trees Can Provide in Summer*. „Journal of Environmental Quality”, s. 67-174 [DOI: 10.2134/jeq2015.01.0039].
132. Schröpfer T., Menz S., 2019. *Dense and Green Building Typologies. Design Perspectives*. Springer [DOI: 10.1007/978-981-13-3035-3].
133. Seneta W., Dolatowski J., 2012. *Dendrologia*. Warszawa, Wydawnictwo Naukowe PWN.
134. 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), s. 221-235 [DOI: 10.1016/S0378-7788(99)00018-3].
135. Shashua-Bar L., Hoffman M.E., 2002. *Quantitative Evaluation of trees effects on diurnal air temperature cooling in urban streets*. W: M. Anson, J.M. Ko, E.S.S. Lam (eds.). *Advances in Building Technology*, s. 1493-1500 [DOI: 10.1016/B978-008044100-9/50185-6].
136. Shashua-Bar L., Pearlmutter D., Erell E., 2011. *The influence of trees and grass on outdoor thermal comfort in a hot-arid environment*. „International Journal of Climatology”, 32(10), s.1498-1506 [DOI: 10.1002/joc.2177].
137. Shashua-Bar L., Potcher 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, s. 44-57 [DOI: 10.1002/joc.1869].
138. Shishegar N., 2013. *Street Design and Urban Microclimate: Analyzing the Effects of Street Geometry and Orientation on Airflow and Solar Access in Urban Canyons*. „Journal of Clean Energy Technologies”, 1(1), s. 52-56 [DOI: 10.7763/JOCET.2013.V1.13].
139. Simpson J.R., McPherson E.G., 1996. *Potential of tree shade for reducing residential energy use in California*. „Journal of Arboriculture”, 22(1), s. 10-18.
140. Sobczyńska K., 2014. *Zieleń jako element współczesnego miasta i jej rola w przestrzeniach publicznych Poznania*. Rozprawa doktorska, Politechnika Poznańska, Poznań.
141. Solon J., 2008. *Koncepcja „Ecosystem Services” i jej zastosowania w badaniach ekologiczno-krajobrazowych*. „Problemy Ekologii Krajobrazu”, 21, s. 25-44.
142. Souch C.A., Souch C., 1993. *The effect of trees on summertime below canopy urban climates: a case study Bloomington, Indiana*. „Journal of Arboriculture”, 19(5), s. 303-312.
143. Stark T., Miller D.R., 1977. *Effect of Synthetic Surfaces and Vegetation in Urban Areas on Human Energy Balance and Comfort*. General Technical Report [https://www.nrs.fs.fed.us/pubs/gtr/gtr_ne25/gtr_ne25_139.pdf, dostęp: 23.09.2020].
144. Stangel M., 2013. *Kształtowanie współczesnych obszarów miejskich w kontekście zrównoważonego rozwoju*. Gliwice Wydawnictwo Politechniki Śląskiej.
145. Stec W.J., van Passen A.H.C., Maziarz A., 2005. *Modelling the double skin façade with plants*. „Energy and Buildings”, 37(5), s. 419-427 [DOI: 10.1016/j.enbuild.2004.08.008].
146. Susorova I., Angulo M., Bahrami P., Stephens B., 2013. *A model of vegetated exterior facades for evaluation of wall thermal performance*. „Building and Environment”, 67, s. 1-13 [DOI: 10.1016/j.buildenv.2013.04.027].
147. Szczepanowska H.B., 2001. *Drzewa w mieście*. Warszawa, Hortpress Sp. z o.o.

148. Szczepanowska H.B., 2007. *Ekologiczne, społeczne i ekonomiczne korzyści z drzew na terenach zurbanizowanych*. „Człowiek i Środowisko”, 31(3-4), s. 5-26.
149. Szczepanowska H.B., 2010. *Korzyści z drzew na terenach miejskich*. „Przegląd Komunalny”, 11, s. 112-115.
150. Szczepanowska H.B., 2012. *Miejsce terenów zieleni w strukturze zintegrowanego projektowania, zarządzania i oceny ekologicznej inwestycji miejskiej*. „Człowiek i Środowisko”, 36(1-2), s. 25-49.
151. Szczepanowska H.B., b.d. *Zieleń w mieście jako sposób na miejskie wyspy ciepła*. [<https://zielonagorapl.wordpress.com/2015/04/21/zielen-w-miescie-jako-sposob-na-miejskie-wyspy-ciepla/>, dostęp: 22.09.2020].
152. Szczepanowska H.B., 2015. *Drzewa w mieście – zielony kapitał wartości i usług ekosystemowych*, „Człowiek i Środowisko”, 39(2), s. 5-28.
153. Szczepanowska H.B., b.d. *Rola i znaczenie drzew w mieście, usługi ekosystemowe drzew i wycena ich wartości*. [<http://docplayer.pl/7769435-Rola-i-znaczenie-drzew-w-miescie-uslugi-ekosystemowe-drzew-i-wycena-ich-wartosci.html>, dostęp: 27.07.2020].
154. Szczepanowska H.B., Sitarski M., 2015. *Drzewa – zielony kapitał miast. Jak zwiększyć efektywność pracy drzew?* Warszawa, Instytut Gospodarki Przestrzennej i Mieszkalnictwa.
155. Szkordilis F., Kiss M., 2015. *Shading Effect of Alley Trees and Their Impact on Indoor Comfort*. ICUC 9th International Conference on Urban Climate jointly with 12th Symposium on the Urban Environment, 20-24 lipca 2015, Tuluza.
156. Szopińska E., Zygmunt-Rubaszek J., 2010. *Propozycje standardów w zakresie kształtowania zieleni wysokiej miejskich tras komunikacyjnych na przykładzie Wrocławia*. Wrocław, Zarząd Zieleni Miejskiej we Wrocławiu.
157. Szulc A., 2013. *Zielone miasto. Zieleń przy ulicach*. Warszawa, Agencja Promocji Zieleni.
158. Szulczewska B., 2018. *Zielona infrastruktura – czy koniec historii?* Warszawa, Komitet Przestrzenny Zagospodarowania Kraju PAN.
159. Szumacher I., 2011a. *Funkcje terenów zieleni miejskiej a świadczenia ekosystemów*. „Prace i Studia Geograficzne”, t. 46, s. 169-176.
160. Szumacher I., 2011b. *Urban greenery functions and ecosystem services*. „Miscellanea Geographica”, 15, s. 123-129.
161. Takács A., Kiss M., Gulyás A., Tanács E., Kántor N., 2016. *Solar permeability of different tree species in Szeged, Hungary*. „Geographica Pannonica”, 20(1), s. 32-41 [DOI: 10.5937/GeoPan1601032T].
162. Thayer R.L., Maeda Jr., Maeda B., 1985. *Measuring street tree impact on solar performance: a five-climate computer modelling study*. „Journal of Arboriculture”, 11(1), s. 1-12.
163. Tołwiński T., 1963. *Urbanistyka*. T. 3. *Zieleń w urbanistyce*. Warszawa, Państwowe Wydawnictwo Naukowe.
164. Tyczka S., 1976. *Biometeorologiczna charakterystyka środowiska atmosferycznego*. W: J. Jankowiak (red.). *Biometeorologia człowieka*. Warszawa, Państwowy Zakład Wydawnictw Lekarskich, s. 17-48.
165. Ustawa z dnia 21 marca 1985 r. o drogach publicznych, Dz.U. z 2007 r. Nr 19, poz. 115.
166. Wacker M., Holick M.F., 2013. *Sunlight and Vitamin D: A global perspective for health*. „Dermato-Endocrinology”, 5(1), s. 51-108 [DOI: 10.4161/derm.24494].
167. Wang Y., Akbari H., 2014. *Effect of Sky View Factor on Outdoor Temperature and Comfort in Montreal*. „Environmental Engineering Science”, 31(6), s. 272-287 [DOI: 10.1089/ees.2013.0430].
168. Wehle-Strzelecka S., 2008. *Rozwój koncepcji pozyskiwania energii słonecznej w rozwiązaniach architektoniczno-urbanistycznych – pierwsza generacja architektury słonecznej*. „Zasopismo Techniczne.Architektura”, 7-A, s. 149-185.
169. Wejchert K., 1974. *Elementy kompozycji urbanistycznej*. Wyd. 2. Warszawa, Arkady.
170. Zielonko-Jung K., 2013. *Kształtowanie przestrzenne architektury ekologicznej w strukturze miasta*. Warszawa, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej.

171. Ziemiańska M., Dworniczak Ł., 2014. *Projektowanie zadrzewień w krajobrazie otwartym*. W: K. Witokoś-Gnach, P. Tyszko-Chmielowiec (red.). *Drzewa w krajobrazie. Podręcznik praktyka*. Wrocław, Fundacja EkoRozwoju, s. 241-270.
172. Zimny H., 2005. *Ekologia miasta*. Warszawa, Agencja Reklamowo-Wydawnicza Arkadiusz Grzegorzczak.
173. Zinowiec-Cieplik K., 2017a. *Potencjał integracji form roślinnych z architekturą – środowisko i technika*. „Kwartalnik Naukowy Uczelni Vistula”, 4(54), s. 128-141.
174. Zinowiec-Cieplik K., 2017b. *Nowoczesna natura we współczesnym mieście*, „Zeszyty Naukowe Uczelni Vistula”, 53(2), s. 176-189.

Źródła internetowe:

- Bosco Verticale*, Wikipedia, https://pl.wikipedia.org/wiki/Bosco_Verticale (dostęp: 18.05.2020).
- Energia słoneczna w Polsce – nasłonecznienie*, <https://poradnikprojektanta.pl/energia-sloneczna-w-polsce-naslonecznienie> (dostęp: 10.05.2019).
- Fundacja Sendzimir, <https://sendzimir.org.pl/> (dostęp: 15.09.2020).
- Informacje dotyczące typowych lat meteorologicznych i statystycznych danych klimatycznych do obliczeń energetycznych dla danej lokalizacji udostępnione przez Ministerstwo Inwestycji i Rozwoju, <https://www.gov.pl/web/inwestycje-rozwoj/dane-do-obliczen-energetycznych-budynkow> (dostęp: 10.01.2019).
- Informacje dotyczące planu zazielenienia Champs-Élysées w Paryżu, <https://www.theguardian.com/world/2021/jan/10/paris-approves-plan-to-turn-champs-elysees-into-extraordinary-garden-anne-hidalgo> (dostęp: 13.01.2021).
- Informacje dotyczące pogody w mieście Płocku, <https://www.weatheronline.pl/weather/maps/city?FMM=7&FYY=2000&LMM=12&LYY=2020&WMO=12360&CONT=plpl®ION=0001&LAND=PL&ART=SOS&R=0&NOREGION=1&LEVEL=162&LANG=pl&MOD=tab> (dostęp: 20.04.2019).
- Katalog klonów, <https://www.klony.info> (dostęp: 20.04.2019).
- Katalog roślin, <https://www.e-katalogroslin.pl> (dostęp: 20.04.2019).
- Nasłonecznienie*, Encyklopedia PWN, <https://encyklopedia.pwn.pl/encyklopedia/nas%C5%82onecznienie.html> (dostęp: 09.08.2020).
- Oprogramowanie Virtual Environment firmy Integrated Environmental Solutions, <https://www.iesve.com/software/virtual-environment> (dostęp: 01.04.2020).
- Pierzeja*, Wikipedia, <https://pl.wikipedia.org/wiki/Pierzeja> (dostęp: 09.08.2020).
- Pliki pogodowe EPW, <https://energyplus.net/weather> (dostęp: 15.09.2019).
- Pliki pogodowe EPW dla lokalizacji Płock, https://www.energyplus.net/weather-download/europe_wmo_region_6/POL//POL_Plock.123600_IMGW/all (dostęp: 25.03.2020).
- Stowarzyszenie Architektury Krajobrazu, <https://sak.org.pl/> (dostęp: 15.09.2020).
- Układ*, Słownik języka polskiego PWN, <https://sjp.pwn.pl/sjp/uklad;2532331.html> (dostęp: 08.08.2020).

Spis rysunków

Rysunek 1. Zjawisko miejskiej wyspy ciepła. Przykład rozkładu temperatury według <i>Environmental Science. Publisher for Everybody around the Earth</i>	10
Rysunek 2. Najważniejsze czynniki wpływające na komfort termiczny człowieka w przestrzeni miejskiej, np. ulica z drzewami w ciągu dnia	11
Rysunek 3. Promieniowanie słoneczne, które jest absorbowane, odbijane i częściowo przenika do głębszych warstw liści	35
Rysunek 4. Zacienienie przez 9,1-metrowe drzewo w mieście Sacramento w Kalifornii w dniu 15 lipca 2007 roku w godzinach 7.00-20.00.....	40
Rysunek 5. Wskaźnik LAI w zależności od wysokości drzew	43
Rysunek 6. Umiejscowienie drzew jako elementów zacieniających zabudowę	46
Rysunek 7. Monetarna wartość rocznych korzyści usług ekosystemowych jednego drzewa przyulicznego na terenie Praga Północ, Warszawa	58
Rysunek 8. Udział korzyści wynikających z usług ekosystemowych świadczonych przez jedno drzewo	58
Rysunek 9. Wielkość wydatków na leśnictwo komunalne w 132 gminach i 26 dzielnicach Chicago.....	59
Rysunek 10. Rozkład gminnych zgłoszeń poważnych szkód spowodowanych przez wykroty i wiatrolomy podczas wichur i nawałnic w latach 2004-2014 w Chicago	59
Rysunek 11. Przebieg wzrostu wartości usług „zielonej infrastruktury” na przestrzeni lat.....	61
Rysunek 12. Wiek i szybkość wzrostu wybranych gatunków drzew	62
Rysunek 13. Parametry H i W dla ulicy o symetrycznym profilu	67
Rysunek 14. Parametry H i W dla ulicy o niesymetrycznym profilu	67
Rysunek 15. Parametry współczynnika widoczności nieba (SVF) dla ulicy o symetrycznym profilu.....	68
Rysunek 16. Parametry współczynnika widoczności nieba (SVF) dla ulicy o zróżnicowanej wysokości elewacji	68
Rysunek 17. Rozkład promieniowania słonecznego: a) na terenie niezabudowanym, b) w ulicy o $H/W = 1$, c) w ulicy o $H/W = 4$	70
Rysunek 18. Procent powierzchni wyeksponowanej na bezpośrednie promieniowanie słoneczne w ulicy o szerokości 15 m i o orientacji: a) północno-południowej, b) wschodnio-zachodniej – w dniach: 21 grudnia, 21 marca i 21 czerwca.....	72
Rysunek 19. Rysunek Abrahama Rademakera, na którym widoczny jest szpaler drzew wzdłuż kanału w Leiden.....	75
Rysunek 20. Wytyczne odnośnie do minimalnej powierzchni terenu i objętości gruntu w zależności od parametrów drzewa.....	88
Rysunek 21. Lokalizacja drzew po obu stronach wąskiej ulicy w pojemnikach lub w wyznaczonym pasie zieleni.....	90



Rysunek 22. Lokalizacja drzew po jednej stronie wąskiej ulicy w misach chodnikowych między miejscami postojowymi.....	90
Rysunek 23. Lokalizacja drzew w ulicy o średniej szerokości z obustronnymi nasadzeniami drzew średnich w pasach zieleni wzdłuż jezdni.....	91
Rysunek 24. Lokalizacja drzew w ulicy o średniej szerokości z obustronnymi nasadzeniami drzew małych w pasach zieleni wzdłuż zabudowy	91
Rysunek 25. Lokalizacja drzew w ulicy o szerokości ponad 30 m w liniach rozgraniczających. W licznych pasach zieleni rozdzielających m.in. jezdnie i torowisko możliwość nasadzeń drzew dużych i średnich	92
Rysunek 26. Lokalizacja drzew w ulicy o szerokości ponad 30 m w liniach rozgraniczających. Zieleń wysoka w pasach zieleni rozdzielających boczne uliczki parkingowe od jezdni	93
Rysunek 27. Lokalizacja drzew w ulicy o szerokości ponad 30 m w liniach rozgraniczających z ograniczonym dostępem do gruntu rodzimego z drzewami sadzonymi w misach chodnikowych	93
Rysunek 28. Schematyczny przekrój wariantów wybranej do badań ulicy o różnych profilach, gdzie parametr H/W wynosi: 0,2; 0,4; 0,6; 1 i 2	97
Rysunek 29. Schemat lokalizacji szpaleru drzew. Odległość (A) w zależności od wariantu wynosi: 2 m, 3 m, 4 m, 5 m, 6 m i 9 m	99
Rysunek 30. Wykres dla Płocka ilustrujący kolejno: bezpośrednie promieniowanie słoneczne oraz rozproszone i całkowite promieniowanie słoneczne na powierzchni poziome w ciągu roku	100
Rysunek 31. Schemat ilustrujący nieboskłon z lokalizacją promieniowania słonecznego całkowitego, rozproszonego i bezpośredniego w wybranej lokalizacji (Płock) w dniu 7 czerwca w godzinach 8.00-17.00	101
Rysunek 32. Schemat obrazujący kierunek i ilość promieniowania słonecznego: całkowitego, rozproszonego i bezpośredniego w wybranej lokalizacji (Płock) w dniu 7 czerwca w godzinach 8.00-17.00	101
Rysunek 33. Komponent Sunlight Hours Analysis (SHA) w programie Rhino/Grasshopper wraz z danymi wejściowymi	103
Rysunek 34. Komponent sunPath w programie Rhino/Grasshopper wraz z danymi wejściowymi	104
Rysunek 35. Przykładowe dane dla miasta Płocka zapisane w pliku pogodowym EPW (https://energyplus.net/weather-location/europe_wmo_region_6/POL//POL_Plock.123600_IMGW , dostęp: 15.09.2019)	105
Rysunek 36. Przykładowy wynik analizy godzin nasłonecznienia (Sunlight Hours Analysis) dla modelu wybranej ulicy o H/W = 0,6 dla lokalizacji w mieście Płocku dla dnia 7 czerwca w godzinach 8.00–14.00	105
Rysunek 37. Legenda do komponentu SHA	106
Rysunek 38. Algorytm pozwalający na wybór powierzchni o danym kolorze lub kolorach, które występują w analizie SHA na testowanej geometrii	107

Rysunek 39. Algorytm pozwalający na obliczenie powierzchni wybranych uprzednio płaszczyzn o danym kolorze	107
Rysunek 40. Algorytm pozwalający na zdefiniowanie współrzędnej „z” punktów tworzących moduły siatki SunlightHoursMesh	108
Rysunek 41. Algorytm pozwalający na obliczenie powierzchni o wskazanym kolorze oraz współrzędnej „z”	108
Rysunek 42. Model jednego z wariantów ulicy o H/W = 0,4 bez zieleni zbudowany w programie Rhino	110
Rysunek 43. Zdefiniowanie modelu pnia w programie Rhino przy użyciu graficznego edytora algorytmów Grasshopper	112
Rysunek 44. Model reprezentujący drzewo wykorzystany w pracy Hes i in. (2011).....	113
Rysunek 45. Model przedstawiający szpaler drzew w badaniach, które zrealizowali Thayer i in. (1985)	113
Rysunek 46. Fragment korony modelu drzewa zbudowanego na potrzeby symulacji SHA.....	113
Rysunek 47. I etap definiowania modelu korony drzewa wybranego do badań	114
Rysunek 48. Etap definiowania zbioru punktów	115
Rysunek 49. II etap definiowania modelu korony drzewa wybranego do badań	115
Rysunek 50. Model klonu jawor wykorzystany w symulacji. Wymiary w metrach	116
Rysunek 51. Profile wariantów modelu ulicy o różnej odległości [m] szpalerów drzew od pierzei i geometrii zabudowy wykorzystane w badaniach	117
Rysunek 52. Definiowanie odległości pomiędzy modelami drzew w szpalerze.....	118
Rysunek 53. Powierzchnia zacieniania elewacji południowej przez przeciwległą zabudowę w modelu ulicy na osi wschód–zachód z zabudową wysokościową i parametrem H/W = 2 w wybranej lokalizacji w dniu 7 czerwca w godzinach 8.00–17.00	121
Rysunek 54. Procent [%] powierzchni podłogi ulicy w cieniu zabudowy w modelu na osi wzdłuż kierunku wschód–zachód i północ–południe przy różnych parametrach proporcji układu H/W dla badanego przedziału czasowego między 8.00 a 17.00 w dniu 7 czerwca w wybranej lokalizacji	124
Rysunek 55. Powierzchnia parteru oraz I piętra elewacji południowej zacięta przez szpaler 20-25-letnich klonów jawor zlokalizowanych w ulicy o kierunku wschód–zachód i parametrze H/W równym 0,6 w odległości 2 m od zabudowy w dniu 7 czerwca w godzinach 8.00–17.00 w wybranej lokalizacji	128
Rysunek 56. Powierzchnia parteru oraz I piętra elewacji południowej zacięta przez szpaler 20-25-letnich klonów jawor zlokalizowanych w ulicy o kierunku wschód–zachód i parametrze H/W równym 0,6 w odległości 3 m od zabudowy w dniu 7 czerwca w godzinach 8.00–17.00 w wybranej lokalizacji	128
Rysunek 57. Czas zacieniania pierzei zwróconej ku południu przez szpaler 20-25-letnich drzew (<i>Acer pseudoplatanus</i>) ustawionych w różnych odległościach [m] od osłanianej zabudowy dla przedziału czasu od godziny 8.00 do 17.00 w dniu 7 czerwca w wybranej lokalizacji	129

Rysunek 58. Schemat obrazujący powierzchnię i długość zacienienia pierzei południowej przez szpaler drzew w odległości 2 m od zabudowy w godzinach między 8.00 a 17.00 w dniu 7 czerwca dla wybranej lokalizacji	130
Rysunek 59. Schemat obrazujący powierzchnię i długość zacienienia pierzei południowej przez szpaler drzew w odległości 3 m od zabudowy w godzinach między 8.00 a 17.00 w dniu 7 czerwca dla wybranej lokalizacji	130
Rysunek 60. Schemat obrazujący powierzchnię i długość zacienienia pierzei południowej przez szpaler drzew w odległości 4 m od zabudowy w godzinach między 8.00 a 17.00 w dniu 7 czerwca dla wybranej lokalizacji	131
Rysunek 61. Powierzchnia zacienienia elewacji południowej pierzei ulicy na osi wschód–zachód na przykładzie modelu o $H/W \leq 0,6$ przez drzewa zlokalizowane w odległości 2 m, 3 m i 4 m w dniu 7 czerwca w godzinach 8.00–17.00 w wybranej lokalizacji	132
Rysunek 62. Powierzchnia zacienienia elewacji na wysokości I piętra przez szpaler drzew zlokalizowany w odległości 2 m od zabudowy w modelu ulicy na osi północ–południe z zabudową wysoką o $H/W = 1$ w dniu 7 czerwca w godzinach 8.00–17.00 w wybranej lokalizacji.....	138
Rysunek 63. Powierzchnia zacienienia elewacji na wysokości I piętra przez szpaler drzew zlokalizowany w odległości 2 m od zabudowy w modelu ulicy na osi północ–południe z zabudową wysoką o $H/W \leq 0,6$ w dniu 7 czerwca w godzinach 8.00–17.00	140
Rysunek 64. Czas zacieniania pierzei w modelu ulicy na osi północ–południe o $H/W = 1$ przez szpaler 20-25-letnich drzew (<i>Acer pseudoplatanus</i>) ustawionych w różnych odległościach od osłanianej zabudowy dla przedziału czasu od godziny 8.00 do 17.00 w dniu 7 czerwca w wybranej lokalizacji.....	141
Rysunek 65. Czas zacieniania pierzei w modelu ulicy na osi północ–południe o $H/W \leq 0,6$ przez szpaler 20-25-letnich drzew (<i>Acer pseudoplatanus</i>) ustawionych w różnych odległościach od osłanianej zabudowy dla przedziału czasu od godziny 8.00 do 17.00 w dniu 7 czerwca w wybranej lokalizacji.....	141
Rysunek 66. Powierzchnia zacienienia elewacji pierzei wschodniej ulicy na osi północ–południe o H/W równym 1 przez drzewa zlokalizowane w odległości od 2 m do 6 m w dniu 7 czerwca w godzinach 8.00–17.00 w wybranej lokalizacji	143
Rysunek 67. Powierzchnia zacienienia elewacji pierzei zachodniej ulicy na osi północ–południe o H/W równym 1 przez drzewa zlokalizowane w odległości od 2 m do 6 m w dniu 7 czerwca w godzinach 8.00–17.00 w wybranej lokalizacji	143
Rysunek 68. Powierzchnia zacienienia elewacji pierzei wschodniej ulicy na osi północ–południe o $H/W \leq 0,6$ przez drzewa zlokalizowane w odległości od 2 m do 6 m w dniu 7 czerwca w godzinach 8.00–17.00 w wybranej lokalizacji	144
Rysunek 69. Powierzchnia zacienienia elewacji pierzei zachodniej ulicy na osi północ–południe o $H/W \leq 0,6$ przez drzewa zlokalizowane w odległości od 2 m do 6 m w dniu 7 czerwca w godzinach 8.00–17.00 w wybranej lokalizacji	145
Rysunek 70. Powierzchnia zacienienia elewacji pierzei wschodniej ulicy na osi północ–południe o różnym parametrze proporcji H/W przez drzewa zlokalizowane w odległości od 2 m do 6 m w godzinie o największym całkowitym natężeniu	

promieniowania słonecznego na powierzchnie pionowe o orientacji wschodniej, tj. między 8.00 a 9.00 w dniu 7 czerwca w wybranej lokalizacji.....	146
Rysunek 71. Powierzchnia zacienienia elewacji zachodniej pierzei ulicy na osi północ-południe o różnym parametrze proporcji H/W przez drzewa zlokalizowane w odległości od 2 m do 6 m w dniu 7 czerwca w godzinie o największym całkowitym natężeniu promieniowania słonecznego na powierzchnie pionowe o orientacji zachodniej, tj. między 14.00 a 15.00 w wybranej lokalizacji.....	148
Rysunek 72. Łączna powierzchnia zacienienia elewacji pierzei ulicy na osi północ-południe i wschód-zachód o parametrze proporcji H/W = 1 przez drzewa zlokalizowane w odległości od 2 m do 6 m w dniu 7 czerwca w godzinach między 8.00 a 17.00 w wybranej lokalizacji.....	155
Rysunek 73. Łączna powierzchnia zacienienia elewacji pierzei ulicy na osi północ-południe i wschód-zachód o parametrze proporcji H/W ≤ 0,6 przez drzewa zlokalizowane w odległości od 2 m do 6 m w dniu 7 czerwca w godzinach między 8.00 a 17.00 w wybranej lokalizacji.....	155
Rysunek 74. Powierzchnia zacienienia elewacji przez szpaler drzew zlokalizowany w odległości 2 m od zabudowy w modelu ulicy na osi północ-południe i wschód-zachód z zabudową wysoką o H/W = 1 w dniu 7 czerwca w godzinach 8.00-17.00 w wybranej lokalizacji	156
Rysunek 75. Powierzchnia zacienienia elewacji przez szpaler drzew zlokalizowany w odległości 4 m od zabudowy w modelu ulicy na osi północ-południe i wschód-zachód z zabudową wysoką o H/W = 1 w dniu 7 czerwca w godzinach 8.00-17.00 w wybranej lokalizacji	156
Rysunek 76. Powierzchnia zacienienia elewacji przez szpaler drzew zlokalizowany w odległości 2 m od zabudowy w modelu ulicy na osi północ-południe i wschód-zachód z zabudową wysoką o H/W ≤ 0,6 w dniu 7 czerwca w godzinach 8.00-17.00 w wybranej lokalizacji	157
Rysunek 77. Powierzchnia zacienienia elewacji przez szpaler drzew zlokalizowany w odległości 4 m od zabudowy w modelu ulicy na osi północ-południe i wschód-zachód o H/W ≤ 0,6 w dniu 7 czerwca w godzinach 8.00-17.00 w wybranej lokalizacji.....	157
Rysunek 78. Łączna powierzchnia zacienienia wschodniej elewacji przez szpaler drzew zlokalizowany w różnych odległościach [m] od zabudowy w modelu ulicy na osi północ-południe o różnych parametrach proporcji H/W w dniu 7 czerwca w godzinach 8.00-17.00 w wybranej lokalizacji	159
Rysunek 79. Łączna powierzchnia zacienienia zachodniej elewacji przez szpaler drzew zlokalizowany w różnych odległościach [m] od zabudowy w modelu ulicy na osi północ-południe o różnych parametrach proporcji H/W w dniu 7 czerwca w godzinach 8.00-17.00 w wybranej lokalizacji.....	159
Rysunek 80. Drzewa zlokalizowane w pasie zieleni pod ścianami budynku w ulicy na osi wschód-zachód	164
Rysunek 81. Drzewa zlokalizowane w pasie zieleni na terenie przeznaczonym pod ogródki gastronomiczne w ulicy na osi wschód-zachód	164



Rysunek 82. Drzewa zlokalizowane w pasie zieleni oddzielającym strefę ruchu pieszego od kołowego w ulicy na osi wschód–zachód.....	165
Rysunek 83. Drzewa zlokalizowane w pasie zieleni oddzielającym ścieżkę rowerową od chodnika w ulicy na osi wschód–zachód.....	165
Rysunek 84. Drzewa zlokalizowane w pasie zieleni w odległości 4 m od pierzei w ulicy na osi wschód–zachód oddzielające strefę ruchu pieszego od kołowego	165
Rysunek 85. Drzewa zlokalizowane w pasie zieleni w odległości 4 m od pierzei w ulicy na osi wschód–zachód oddzielające strefę ogródków gastronomicznych od chodnika.....	165
Rysunek 86. Drzewa jako elementy zacieniające pierzeję wschodnią i zachodnią ulicy na osi północ–południe o parametrze $H/W = 1$ zlokalizowane w pasie zieleni oddzielającym chodnik od jezdni	167
Rysunek 87. Drzewa jako elementy zacieniające pierzeję wschodnią i zachodnią ulicy na osi północ–południe o parametrze $H/W = 1$ zlokalizowane w pasie zieleni pod ścianami pierzei.....	167
Rysunek 88. Drzewa jako elementy zacieniające pierzeję wschodnią i zachodnią ulicy na osi północ–południe o parametrze $H/W = 1$ zlokalizowane w pasie zieleni pod ścianami pierzei lub oddzielające chodnik od ścieżki rowerowej.....	167
Rysunek 89. Drzewa jako elementy zacieniające pierzeję wschodnią i zachodnią ulicy na osi północ–południe o parametrze $H/W \leq 0,6$ zlokalizowane w misach chodnikowych w strefie ruchu pieszego lub w pasie zieleni wzdłuż jezdni	168
Rysunek 90. Drzewa jako elementy zacieniające pierzeję wschodnią i zachodnią ulicy na osi północ–południe o parametrze $H/W \leq 0,6$ oddzielające chodnik lub ścieżkę rowerowo-pieszą od jezdni	168
Rysunek 91. Powierzchnia zacienienia elewacji na wysokości I piętra przez szpaler drzew zlokalizowany w odległości 3 m od zabudowy w modelu ulicy na osi północ–południe z zabudową wysoką o $H/W = 1$ w dniu 7 czerwca w godzinach 8.00–17.00 w wybranej lokalizacji.....	193
Rysunek 92. Powierzchnia zacienienia elewacji na wysokości I piętra przez szpaler drzew zlokalizowany w odległości 4 m od zabudowy w modelu ulicy na osi północ–południe z zabudową wysoką o $H/W = 1$ w dniu 7 czerwca w godzinach 8.00–17.00 w wybranej lokalizacji.....	193
Rysunek 93. Powierzchnia zacienienia elewacji na wysokości I piętra przez szpaler drzew zlokalizowany w odległości 3 m od zabudowy w modelu ulicy na osi północ–południe z zabudową wysoką o $H/W \leq 0,6$ w dniu 7 czerwca w godzinach 8.00–17.00 w wybranej lokalizacji.....	194
Rysunek 94. Powierzchnia zacienienia elewacji na wysokości I piętra przez szpaler drzew zlokalizowany w odległości 4 m od zabudowy w modelu ulicy na osi północ–południe z zabudową wysoką o $H/W \leq 0,6$ w dniu 7 czerwca w godzinach 8.00–17.00 w wybranej lokalizacji.....	194
Rysunek 95. Powierzchnia zacienienia elewacji na wysokości I piętra przez szpaler drzew zlokalizowany w odległości 5 m od zabudowy w modelu ulicy na osi	



północ–południe z zabudową wysoką o $H/W \leq 0,6$ w dniu 7 czerwca w godzinach 8.00–17.00 w wybranej lokalizacji.....	195
Rysunek 96. Powierzchnia zacienienia elewacji na wysokości I piętra przez szpaler drzew zlokalizowany w odległości 6 m od zabudowy w modelu ulicy na osi północ–południe z zabudową wysoką o $H/W \leq 0,6$ w dniu 7 czerwca w godzinach 8.00–17.00 w wybranej lokalizacji.....	195

Spis schematów

Schemat 1. Poszczególne etapy wraz z kolejnymi krokami podejmowanych działań oraz ogólna struktura pracy	29
Schemat 2. Parametry wpływające na różnorodność rozwiązań wykorzystujących drzewa do ochrony przeciwsłonecznej zabudowy.....	39
Schemat 3. Potencjalne korzyści użytkowe z wykorzystania drzew do zacieniania elewacji	50
Schemat 4. Etapy definiowania modelu zieleni w opracowanej metodyce.....	111

Spis fotografii

Fot. 1. Pochylenie ścian elewacyjnych obiektu „The Crystal” (Wilkinson Eyre Architects z Arup Group Limited i z Townshend Landscape Architects) pozwala na zacienianie cieniem własnym budynku różnych fragmentów elewacji w ciągu dnia	13
Fot. 2. Mocno wysunięty dach budynku Centrum Rehabilitacji Beit-Halochem (Kimmel-Eshkolot Architects) ogranicza dostęp promieniowania słonecznego do wnętrza obiektu.....	13
Fot. 3. Elewacja z wyraźnie cofniętymi przeszkleniami oraz zamontowanymi osłonami przeciwsłonecznymi w budynku biblioteki The Leo i Dottie Kolligian Uniwersytetu Merced w Kalifornii (Skidmore, Owings & Merrill).....	13
Fot. 4. Składające się w poziomie półprzezroczyste drzwi hangarowe z poliwęglanu jako ochrona przeciwsłoneczna elewacji budynku mieszkalnego – autorstwa KieranTimberlake Associates	14
Fot. 5. Zewnętrzne ruchome drewniane okiennice z modrzewia osłaniające przeszklone ściany budynku Politechniki w Aalen (mgf architekten).....	14
Fot. 6. Podcień jako forma ochrony przeciwsłonecznej w przestrzeni miejskiej.....	15
Fot. 7. Zadaszenie części Bulwaru Nadmorskiego w Gdyni	15
Fot. 8. Spontaniczne rozwiązania ochrony przeciwsłonecznej na ulicach Kairu	15
Fot. 9. Topola czarna (<i>Populus nigra</i>)	41



Fot. 10. Surmia bignoniowa (<i>Catalpa bignonioides</i>).....	41
Fot. 11-13. Układy roślinno-architektoniczne z zielenią wysoką zlokalizowaną w otoczeniu zabudowy. Przykładowe rozwiązania	47
Fot. 14-17. Układy roślinno-architektoniczne, w których drzewa są w bezpośrednim kontakcie z budynkiem. Wybrane rozwiązania integrujące drzewa i zabudowę	48
Fot. 18. Drzewa w ogrodzie wertykalnym na budynku Bosco Verticale w Mediolanie według projektu Boeri Studio	49
Fot. 19. Drzewa rosnące na dachach i tarasach budynków Kampung Admiralty w Singapurze, projekt autorstwa WOHA	49
Fot. 20. Widok z Łuku Triumfalnego w Paryżu na aleje obsadzone drzewami	75
Fot. 21. Drzewa zaciniające chodnik.....	79
Fot. 22-24. Odpoczynek w cieniu drzewa.....	79
Fot. 25. Drzewa uliczne o różnym pokroju i barwie ulistnienia jako elementy uatrakcyjnijające ciągi komunikacyjne	82
Fot. 26. Barwne drzewa uliczne w porze jesiennej.....	82
Fot. 27. Aleja Pól Elizejskich, Paryż.....	82
Fot. 28. Aleja Najświętszej Maryi Panny w Częstochowie	82
Fot. 29. Drzewa na ulicy Tumskiej w Płocku	83
Fot. 30. Aleja drzew w ulicy Lomanstraat w Amsterdamie.....	83
Fot. 31. Drzewa przyuliczne zlokalizowane między jezdnią a chodnikiem.....	84
Fot. 32. Drzewa przyuliczne wzdłuż granicy pasa drogowego.....	84
Fot. 33. Rząd drzew po obu stronach ulicy	84
Fot. 34. Ulica z drzewami tylko po jednej stronie.....	84
Fot. 35. Drzewa w pasie zieleni rozdzielającym jezdnie	85
Fot. 36. Widok na ulicę Świętojańską w Gdyni, która na fragmencie ma zbliżony profil do ulicy wybranej do badań	96
Fot. 37. Przykład ulicy o płytkim profilu, typowym dla zabudowy na przedmieściach miasta.....	97
Fot. 38. Przykład ulicy o głębokim profilu, charakterystycznym dla terenów śródmieścia, zwłaszcza dużych miast	97
Fot. 39. Klon jawor „Rotterdam” (<i>Acer pseudoplatanus</i> ‘Rotterdam’).....	98
Fot. 40. Szpaler drzew o wąskiej koronie i pokroju kolumnowym	160
Fot. 41. Lipa drobnolistna (<i>Tilia cordata</i>) z formowaną koroną w kształcie palmety.....	161
Fot. 42. Drzewa przyuliczne z niewielką formowaną koroną w kształcie palmety na ul. Jasnej w Warszawie	161



Spis tabel

Tabela 1. Rozwiązania architektoniczno-urbanistyczne w zakresie ochrony przeciwsłonecznej zabudowy i terenu.....	12
Tabela 2. Systematyka zieleni odnosząca się do przestrzennego charakteru roślin i ich przestrzennej zależności od elementów architektonicznych	17
Tabela 3. Główne zagadnienia poruszane w badaniach dotyczących zacieniającej roli drzew.....	22
Tabela 4. Metody badań zastosowane na różnych etapach pracy	31
Tabela 5. Parametry drzew wpływające na wartość przepuszczalności promieniowania słonecznego	36
Tabela 6. Wyniki wybranych badań dotyczących przepuszczalności promieniowania słonecznego przez korony drzew.....	36
Tabela 7. Czynniki mające wpływ na powierzchnię, czas zacienienia zabudowy przez drzewa. Symbol T oznacza tak, N – nie, a C – częściowo	38
Tabela 8. Pokrój drzew	40
Tabela 9. Wybrane badania dotyczące wpływu zacieniania budynku przez zielenią na zapotrzebowanie na energię elektryczną do klimatyzowania pomieszczeń.....	52
Tabela 10. Wybrane badania dotyczące wpływu zieleni na komfort cieplny człowieka w przestrzeni miejskiej	55
Tabela 11. Pozostałe role drzew jako elementów zacieniających w przestrzeni miejskiej	57
Tabela 12. Średnia wartość monetarna rocznych usług ekosystemowych na jedno drzewo w mieście Warszawa.....	60
Tabela 13. Czynniki stresowe wpływające na drzewa w środowisku miejskim	62
Tabela 14. Klasyfikacja ograniczeń w wykorzystaniu drzew do ochrony przeciwsłonecznej budynków ze względu na charakter występowania	64
Tabela 15. Klasyfikacja ograniczeń w wykorzystaniu drzew do ochrony przeciwsłonecznej budynków ze względu na czas trwania	64
Tabela 16. Klasyfikacja parametrów wpływających na warunki insolacji w przestrzeni ulicy	66
Tabela 17. Przybliżony związek współczynnika widoczności nieba z parametrem proporcji H/W.....	69
Tabela 18. Wskaźnik chłonności i dostępu promieniowania słonecznego w ulicach o różnych parametrach H/W przy zachmurzonym niebie	69
Tabela 19. Rozkład natężenia promieniowania słonecznego w czerwcu na podłoże i ściany oraz w strefie pieszych dla ulicy o orientacji północ-południe i wschód-zachód o różnych parametrach H/W i przy różnych szerokościach geograficznych	71
Tabela 20. Rozkład natężenia promieniowania słonecznego w grudniu na podłoże i ściany ulicy o orientacji północ-południe i wschód-zachód o różnych parametrach H/W i przy różnych szerokościach geograficznych.....	73

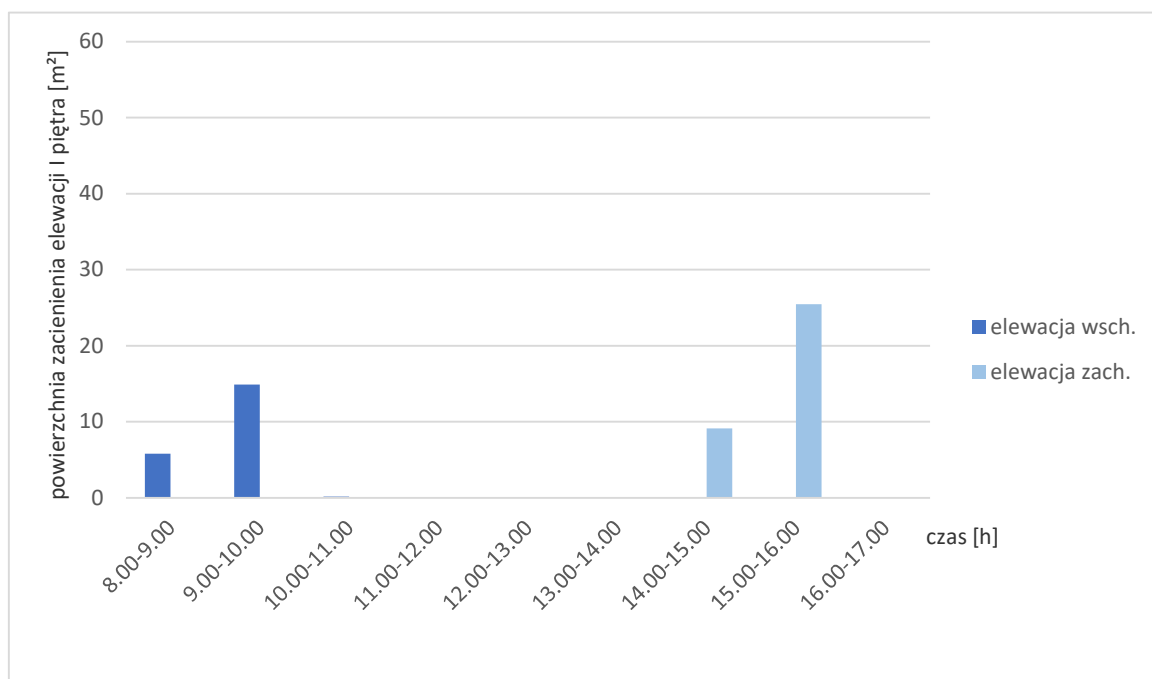
Tabela 21. Wytyczne dotyczące drzew ulicznych zawarte w wybranych archiwalnych opracowaniach z XIX i XX wieku	76
Tabela 22. Funkcje drzew przyulicznych w mieście	78
Tabela 23. Minimalne odległości drzew od sieci uzbrojenia podziemnego i nadziemnego.....	87
Tabela 24. Charakterystyka wybranych parametrów wytypowanego do badań drzewa	98
Tabela 25. Charakterystyczne parametry modelu ulicy zbudowanego na potrzeby symulacji	109
Tabela 26. Główne parametry modelu drzewa reprezentującego 20-25-letni klon jawor „Rotterdam” (<i>Acer pseudoplatanus</i> ‘Rotterdam’) zbudowanego na potrzeby symulacji komputerowej	116
Tabela 27. Liczba godzin, w których pierzeje modelu referencyjnego na osi północ–południe są zacienione w 100%, częściowo lub pozostają w pełnej ekspozycji słonecznej, tj. przez 9 godzin.....	122
Tabela 28. Procentowy udział czasu, w którym elewacje są w pełnej ekspozycji słonecznej w dniu 7 czerwca między godziną 8.00 a 17.00 dla wybranej lokalizacji. Wyróżniono te pola dla których czas pełnej ekspozycji słonecznej elewacji pierzei wynosi co najmniej 30% badanego czasu.....	123
Tabela 29. Powierzchnia zacienienia południowo zorientowanej pierzei w wariantach o różnych parametrach proporcji H/W przez szpaler drzew ustawiony w różnej odległości od zabudowy w dniu 7 czerwca w godzinach 8.00–17.00 dla wybranej lokalizacji (Płock).....	126
Tabela 30. Powierzchnia zacienienia elewacji parteru o powierzchni 120 m ² południowo zorientowanej pierzei w wariantach o różnych parametrach proporcji H/W przez szpaler drzew ustawiony w różnej odległości od zabudowy w dniu 7 czerwca w godzinach 8.00–17.00 dla wybranej lokalizacji (Płock)	126
Tabela 31. Udział procentowy całkowitej powierzchni cienia rzucanego przez rozpatrywaną w badaniach zieleń na ściany i podłogę modelu ulicy o różnych wariantach parametru proporcji H/W w dniu 7 czerwca w godzinach 8.00–17.00 ...	133
Tabela 32. Powierzchnia zacienienia wschodnio zorientowanej pierzei w ulicy na osi północ–południe w wariantach o różnym parametrze proporcji H/W przez szpaler drzew ustawiony w kilku odległościach od zabudowy w dniu 7 czerwca w godzinach 8.00–17.00.....	135
Tabela 33. Powierzchnia zacienienia zachodnio zorientowanej pierzei w ulicy na osi północ–południe w wariantach o różnych parametrach proporcji H/W przez szpaler drzew ustawiony w kilku odległościach od zabudowy w dniu 7 czerwca w godzinach 8.00–17.00.....	136
Tabela 34. Powierzchnia zacienienia elewacji parteru o powierzchni 120 m ² wschodnio zorientowanej pierzei w wariantach o różnych parametrach proporcji H/W przez szpaler drzew ustawiony w różnej odległości od zabudowy w dniu 7 czerwca w godzinach 8.00–17.00	137
Tabela 35. Powierzchnia zacienienia elewacji parteru o powierzchni 120 m ² zachodnio zorientowanej pierzei w wariantach o różnych parametrach proporcji H/W przez	



szpaler drzew ustawiony w różnej odległości od zabudowy w dniu 7 czerwca w godzinach 8.00–17.00	137
Tabela 36. Liczba godzin zacielenia całej lub części elewacji pierzei ulicznych w modelach referencyjnych i układach roślinno-architektonicznych z zielenią zlokalizowaną w różnej odległości od zabudowy między godziną 8.00 a 17.00 w dniu 7 czerwca dla wybranej lokalizacji.....	142
Tabela 37. Najważniejsze parametry zacielenia elewacji przez wybrane do badań drzewa w modelach o orientacji wschód–zachód i północ–południe przy różnych relacjach geometrycznych pomiędzy zielenią a osłanianą zabudową dla wybranej lokalizacji w dniu 7 czerwca w godzinach 8.00–17.00. Wyróżniono te odległości pomiędzy szpalerem drzew a pierzeją, które zapewniają skuteczną ochronę przeciwsłoneczną dla elewacji według przyjętych w pracy kryteriów	150
Tabela 38. Potencjalne mocne i słabe strony wypracowanej metody badań nad stopniem zacielenia elewacji pierzei przez drzewa	169

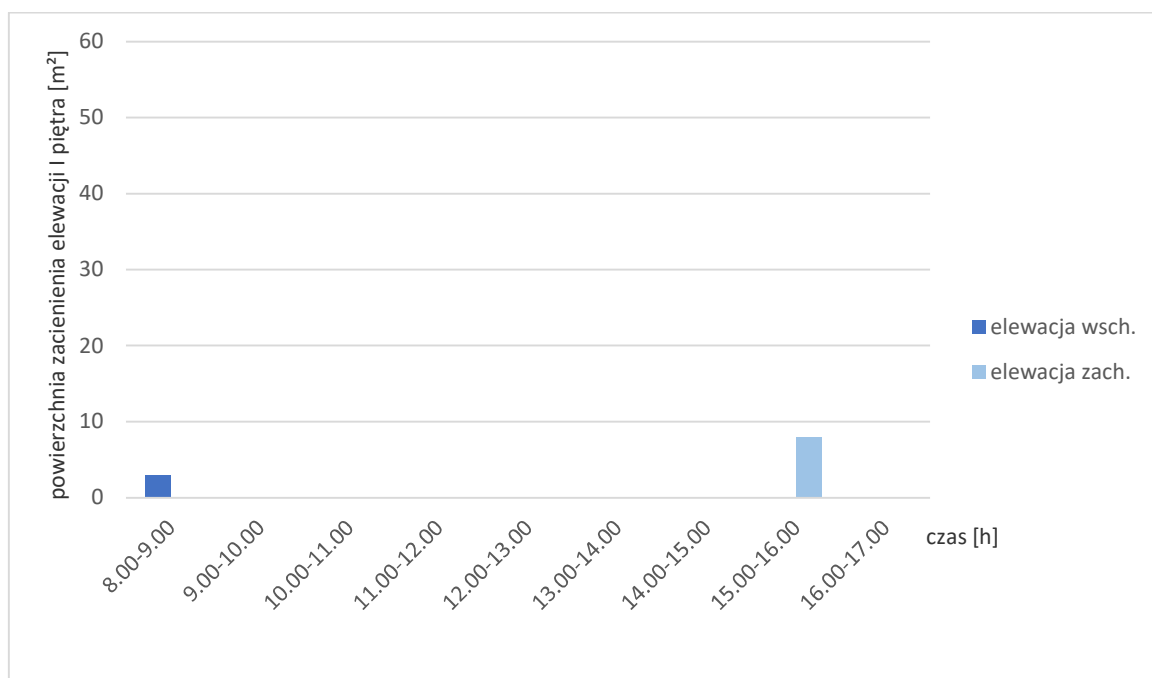
Załączniki

Załącznik 1



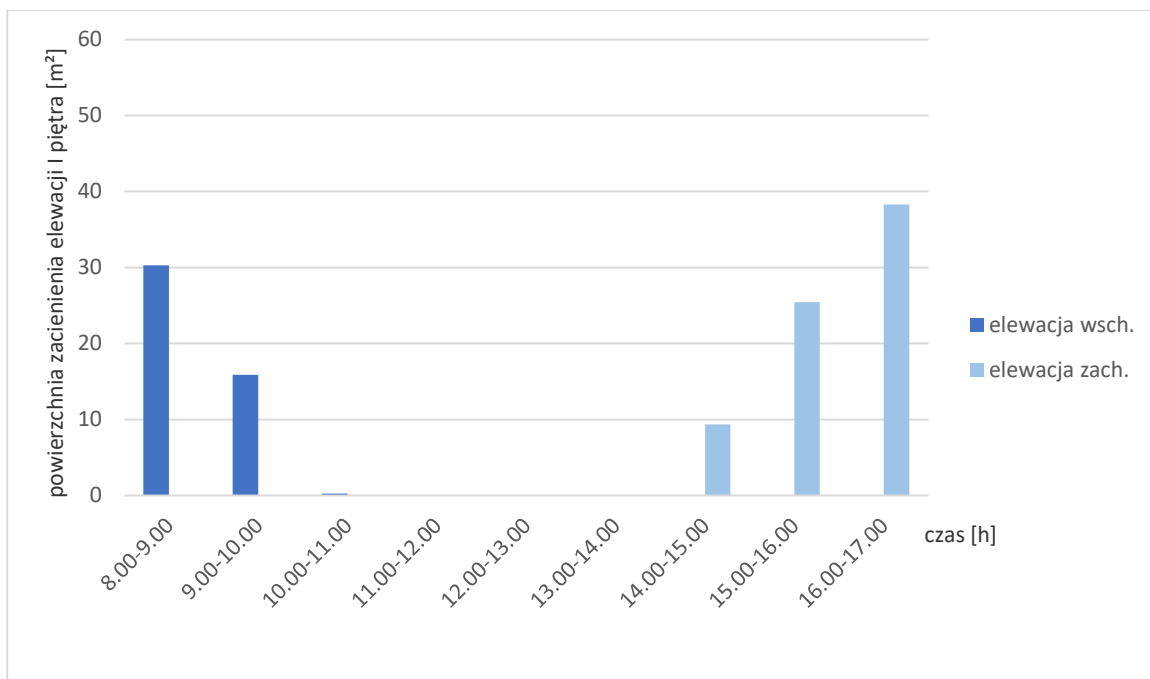
Rysunek 91. Powierzchnia zacienienia elewacji na wysokości I piętra przez szpaler drzew zlokalizowany w odległości 3 m od zabudowy w modelu ulicy na osi północ-południe z zabudową wysoką o $H/W = 1$ w dniu 7 czerwca w godzinach 8.00–17.00 w wybranej lokalizacji

Źródło: Opracowanie własne.



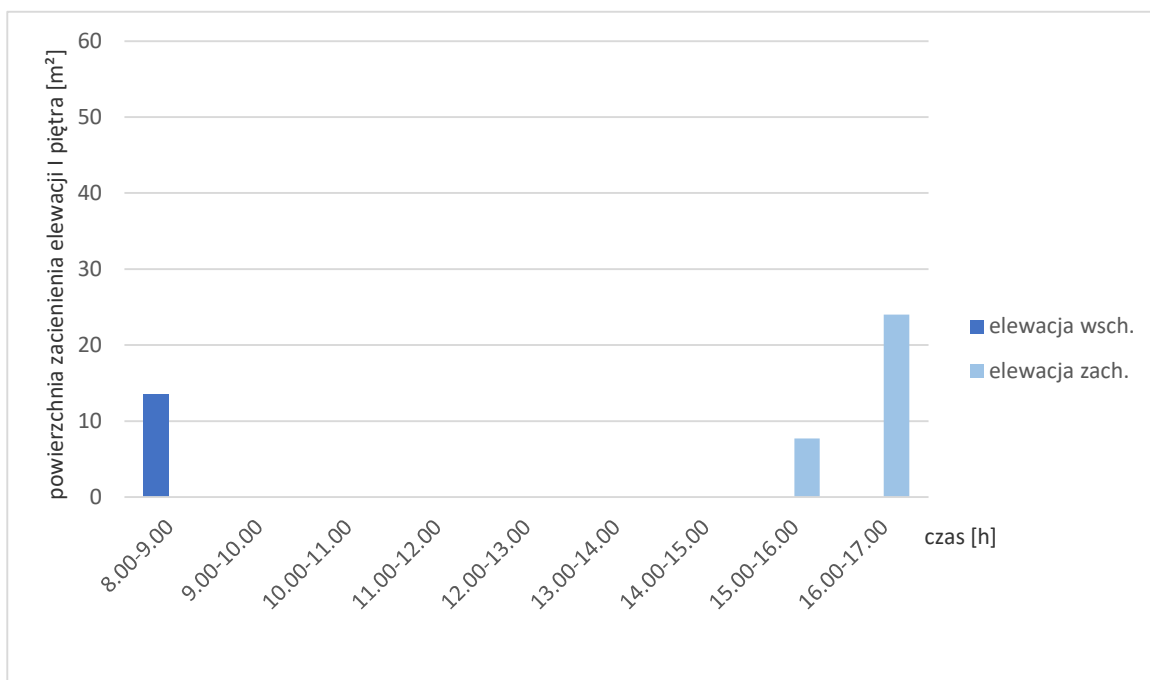
Rysunek 92. Powierzchnia zacienienia elewacji na wysokości I piętra przez szpaler drzew zlokalizowany w odległości 4 m od zabudowy w modelu ulicy na osi północ-południe z zabudową wysoką o $H/W = 1$ w dniu 7 czerwca w godzinach 8.00–17.00 w wybranej lokalizacji

Źródło: Opracowanie własne.



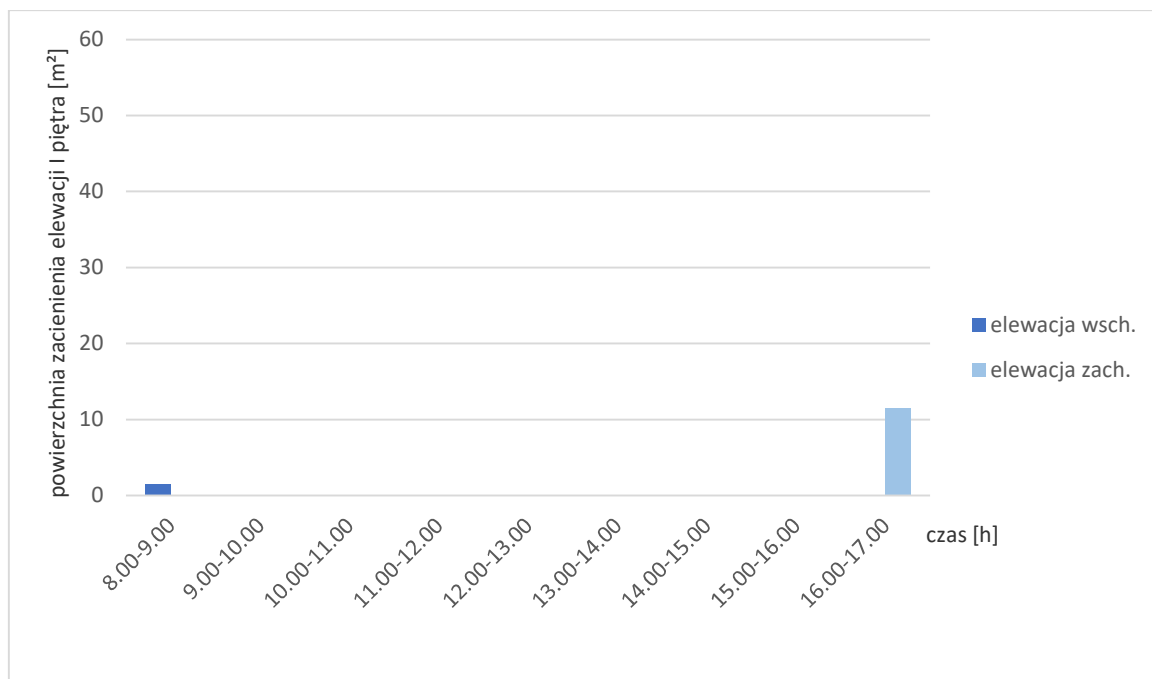
Rysunek 93. Powierzchnia zacienienia elewacji na wysokości I piętra przez szpaler drzew zlokalizowany w odległości 3 m od zabudowy w modelu ulicy na osi północ-południe z zabudową wysoką o $H/W \leq 0,6$ w dniu 7 czerwca w godzinach 8.00–17.00 w wybranej lokalizacji

Źródło: Opracowanie własne.



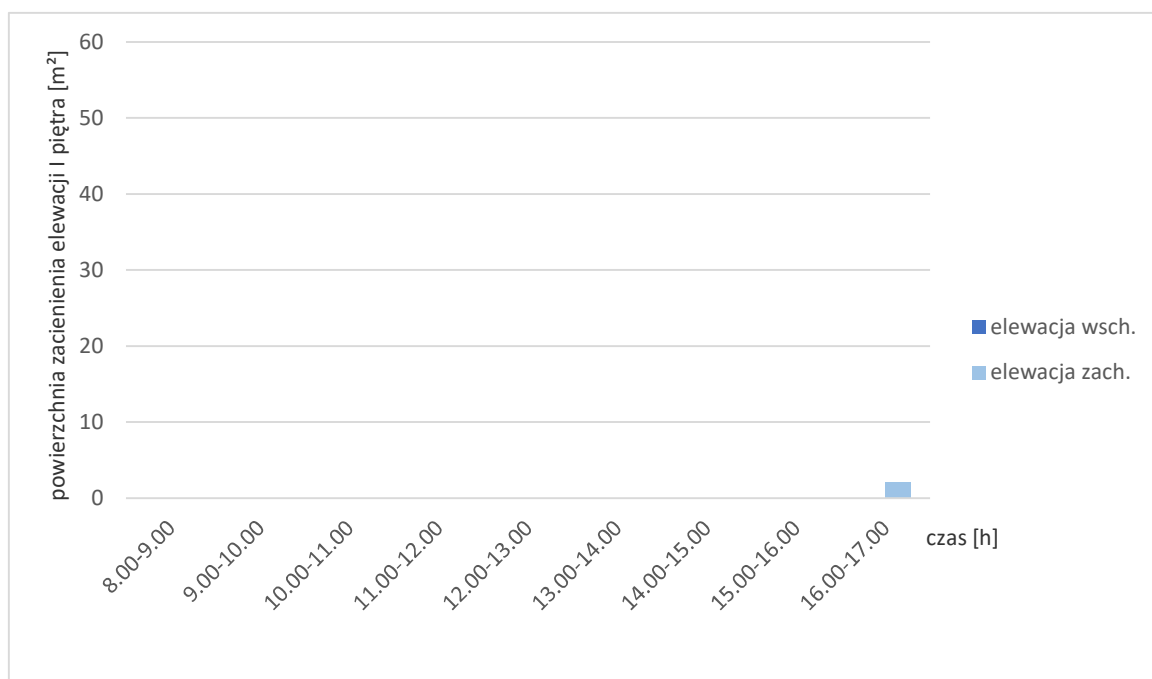
Rysunek 94. Powierzchnia zacienienia elewacji na wysokości I piętra przez szpaler drzew zlokalizowany w odległości 4 m od zabudowy w modelu ulicy na osi północ-południe z zabudową wysoką o $H/W \leq 0,6$ w dniu 7 czerwca w godzinach 8.00–17.00 w wybranej lokalizacji

Źródło: Opracowanie własne.



Rysunek 95. Powierzchnia zacienienia elewacji na wysokości I piętra przez szpaler drzew zlokalizowany w odległości 5 m od zabudowy w modelu ulicy na osi północ-południe z zabudową wysoką o $H/W \leq 0,6$ w dniu 7 czerwca w godzinach 8.00–17.00 w wybranej lokalizacji

Źródło: Opracowanie własne.

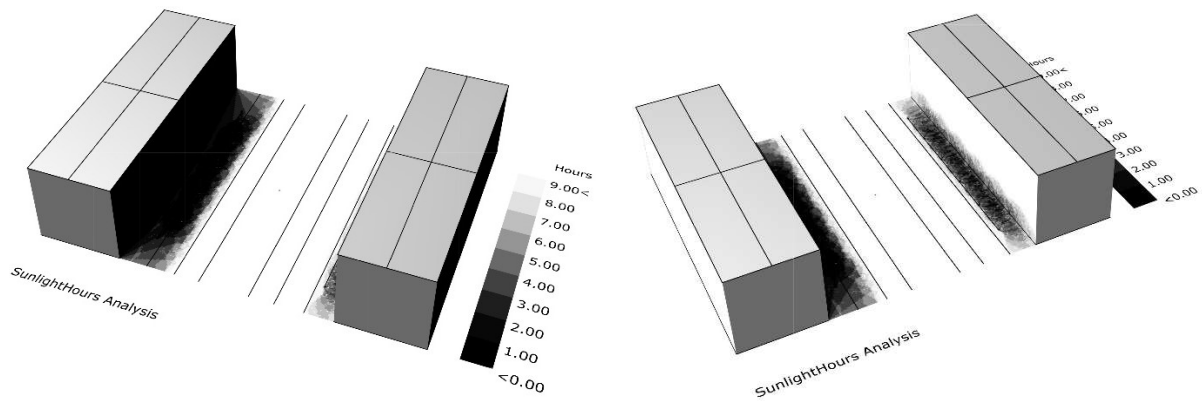


Rysunek 96. Powierzchnia zacienienia elewacji na wysokości I piętra przez szpaler drzew zlokalizowany w odległości 6 m od zabudowy w modelu ulicy na osi północ-południe z zabudową wysoką o $H/W \leq 0,6$ w dniu 7 czerwca w godzinach 8.00–17.00 w wybranej lokalizacji

Źródło: Opracowanie własne.

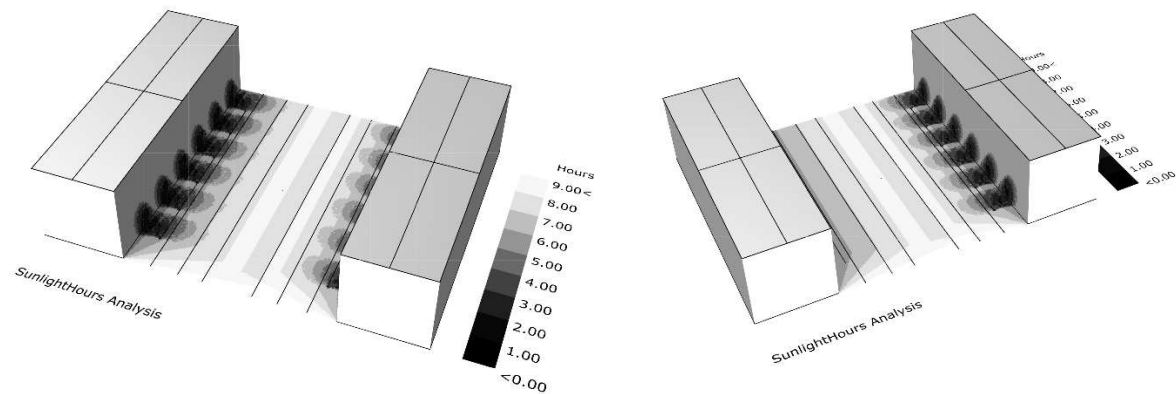
Załącznik 2

Wizualizacje wyników symulacji godzin nasłonecznienia wybranych wariantów badanego układu roślinno-architektonicznego o parametrze H/W równym 0,4 i odległości szpaleru drzew od pierzei wynoszącej 3 m w dniu 7 czerwca w wytypowanej lokalizacji



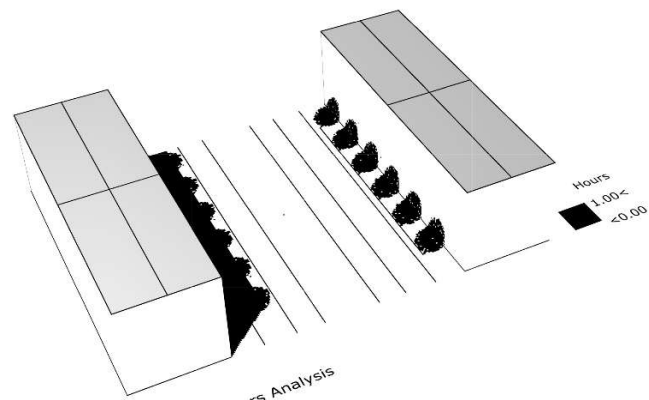
Modelu ulicy na osi wschód–zachód dla godzin 8.00–17.00

Źródło: Opracowanie własne.

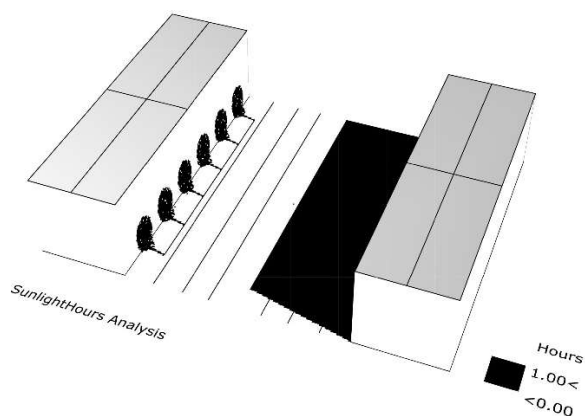


Model ulicy na osi północ–południe dla godzin 8.00–17.00

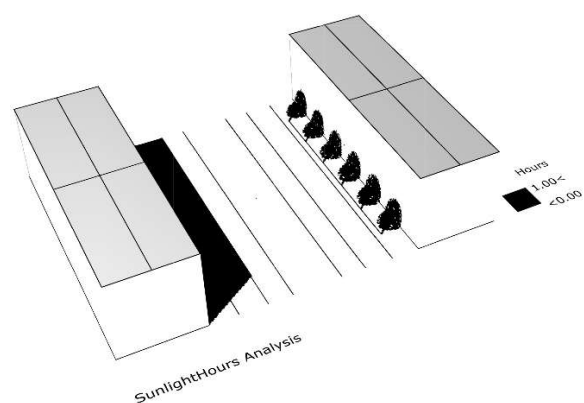
Źródło: Opracowanie własne.



Modelu ulicy na osi północ-południe w godzinie o największym całkowitym natężeniu promieniowania słonecznego na powierzchni pionowe o orientacji południowej dla wybranej lokalizacji, tj. od 10.00 do 11.00
 Źródło: Opracowanie własne.



Model ulicy na osi północ-południe w godzinie o największym całkowitym natężeniu promieniowania słonecznego na powierzchni pionowe o orientacji wschodniej dla wybranej lokalizacji, tj. od 8.00 do 9.00
 Źródło: Opracowanie własne.



Modelu ulicy na osi północ-południe w godzinie o największym całkowitym natężeniu promieniowania słonecznego na powierzchni pionowe o orientacji zachodniej dla wybranej lokalizacji, tj. od 14.00 do 15.00
 Źródło: Opracowanie własne.