

**LANDSCAPE
ARCHITECTURE**
ARCHITEKTURA KRAJOBRAZU

URSZULA ROSOŁ

MSc Eng.

Warsaw University of Technology
Faculty of Geodesy and Cartography
Department of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Systems
e-mail: urszula.rosol00@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-4356-1035>

ANNA FIJAŁKOWSKA

PhD Eng.

Warsaw University of Technology
Faculty of Geodesy and Cartography
Department of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Systems
e-mail: anna.fijalkowska@pw.edu.pl
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0567-9863>

ANALYSIS OF THE IMPACT OF URBAN GREENERY WITH 3D GIS TECHNOLOGY: THE CASE OF THE REVITALIZATION OF CHMIELNA STREET IN WARSAW

ANALIZA WPLYWU ZIELENI MIEJSKIEJ NA OTOCZENIE
Z WYKORZYSTANIEM TECHNOLOGII 3D GIS — NA PRZYKŁADZIE
REWITALIZACJI ULICY CHMIELNEJ W WARSZAWIE

ABSTRACT

The article analyzes the impact of urban greenery on its surroundings. The local scale (street section) study was carried out using 3D spatial data and 3D spatial analysis tools. Based on 2D design data (revitalization of a street section of Chmielna Street in the center of Warsaw), the distribution of new tree plantings in 3D urban space was simulated in a GIS environment. Subsequently, spatial analyses were conducted to assess visibility, sunlight exposure, and shading before and after revitalization. The results made it possible to propose a methodology for assessing the impact of the introduced urban greenery on the shading of the street itself and the accompanying buildings. It allows to demonstrate in detail how the visibility of building facades change and the significance of the size of planted trees for these parameters. The study takes into account the variability of sunlight availability throughout the year. The applicability of the proposed approach in developing different alternatives for designed changes was also indicated. Analyses for the state before and after revitalization were compared with an alternative version of the street transformation for the case if the planted trees were half the size assumed in the revitalization project analyzed.

Keywords: 3D analysis, urban greenery, visibility analysis, 3D GIS, shadow analysis

STRESZCZENIE

W artykule analizie poddano wpływ zieleni miejskiej na otoczenie. Badanie w skali lokalnej (odcinek ulicy) przeprowadzono z wykorzystaniem danych przestrzennych 3D i narzędzi analizy przestrzennej 3D. Na podstawie danych projektowych 2D (rewitalizacja odcinka ulicy Chmielnej w centrum Warszawy) zasymulowano rozmieszczenie nowych nasadzeń drzew w przestrzeni miejskiej 3D w środowisku GIS. Następnie przeprowadzono analizy widoczności, nasłonecznienia i zacielenia przed i po rewitalizacji. Wyniki pozwoliły na zaproponowanie metodyki oceny wpływu wprowadzonej zieleni miejskiej na zacielenie samej ulicy



i towarzyszącej jej zabudowy. Pozwala ona pokazać, jak zmienia się widoczność elewacji budynków, a także jakie znaczenie dla tych parametrów ma wielkość zasadzonych drzew. W badaniu uwzględniono zmienność dostępności światła słonecznego w ciągu roku. Wskazano również na możliwość zastosowania proponowanego podejścia w opracowaniu różnych alternatyw dla projektowanych zmian. Analizę stanu przed i po rewitalizacji porównano z alternatywną wersją przekształcenia ulicy dla przypadku, gdyby posadzone drzewa miały połowę wielkości założonej w analizowanym projekcie rewitalizacji.

Słowa kluczowe: analiza 3D, zieleń miejska, analiza widoczności, GIS 3D, analiza cienia

1. INTRODUCTION

One indispensable ingredient of cities adapted to the needs of their inhabitants is a well-organized and adequately equipped public space. Such places have been the heart of cities since antiquity, when the agora, forum, or other squares were critical to developing social, economic, and political life. There are many factors determining the desire to spend time in public spaces, and their quality can be assessed in terms of their accessibility (Wozniak et al., 2025, pp. 1–2), functionality, safety, aesthetic values, and ability to generate community (Noworól et al., 2010, pp. 31–49; Małyśzek, 2021, p. 59). The decision is also influenced by the weather, appropriate equipment or lack thereof, and, depending on the season, sunshine or shade (Han et al., 2022, pp. 6–7; Humpel, 2002, p. 196). One of the most important aspects of the quality of urban spaces is the presence and condition of vegetation. It is the green areas that provide respite from noise and other urban stimuli (Cielecka, 1986; Dzhambov and Dimitrova, 2014; Wickramathilaka et al., 2022), encourage physical activity and staying longer in common spaces (Browning et al., 2022, p. 8; Lopez-Haro et al., 2024, pp. 14–15), and on hot days, especially areas with significant space, reduce the urban heat island effect (Fernández and Navarro, 2024, p. 16). However, overly tall and dense vegetation can cause reduced air circulation and slower heat dissipation at night (Gunawardena et al., 2017, p. 1043) and reduce visibility, which can result in a reduced sense of safety (Li et al., 2015, pp. 1178–1179; Kedzierski, 2019, pp. 184–185). On hot days, urban residents are much more likely to choose to walk on shaded sidewalks and bike paths (Saaroni et al., 2018; Chen et al., 2024, pp. 6–9). Shaded walls of residential buildings provide improved thermal comfort in the summer, having also translates into the possibility of reducing the use of air conditioning equipment (economic and environmental aspect) (Janiak, 2021; Czekajlo et al., 2023, pp. 825–827), too much shade in the winter deteriorates comfort by limiting access to sunlight (Afshar et al., 2018, p. 238).

Projects transforming urban space, including revitalization projects, should take into account the

aforementioned aspects (sometimes difficult to reconcile and mutually contradictory), and appropriate technological support in the development of vegetation planting plans allows the development of optimal solutions and scenarios, tailored to the needs of residents. The results of such analyses are presented in this article.

1.1. Literature review

When discussing the topic of greenery in cities, it is necessary to distinguish its importance and function according to the type of location in the functional-spatial structure. Other functions are fulfilled by residential neighborhood greenery, others by street greenery, and still others by greenery located on the roofs of buildings (Andersson-Sköld et al., 2018, pp. 275–276). Yet its features, such as air purification, oxygen production, and temperature reduction, are essential in any case. According to Art. 2. para. 6. of the Law on Spatial Planning and Development (Dz.U. 2003 nr 80 poz. 717), areas of public space should be understood as *an area of particular importance for meeting the needs of residents, improving their quality of life and encouraging the establishment of social contacts due to their location and functional and spatial characteristics* [...]. Streets, as fundamental elements of public spaces, primarily have a transportation function, so they are characterized by a higher degree of dynamism compared to squares and neighborhoods. It is important that they are designed in such a way that they not only promote efficient movement but also create a space that encourages people to stay and establish and deepen interpersonal contacts (Carr, 1992, pp. 26–31). However, the dominant traffic function of a street may limit opportunities for people to stay longer and initiate human interaction within the street. Therefore, the design of streets as friendly public spaces should include solutions that promote the quality of life of residents and their well-being (Dennis et al., 2020, pp. 2–4). One such measure is to enrich the street space with appropriately planned greenery and landscaping elements, allowing people to stop and relax.

A significant problem in modern cities, the effects of which are already widely recognized and

combated, is ‘concreteosis’, defined as the excessive, ill-considered use of concrete elements and surfaces and other impermeable materials in public spaces, often associated with the reduction of green spaces and the removal of trees. Such excessive soil sealing causes high temperatures, is one of the main reasons for the urban heat island, and also results in flooding and flash floods, water shortages, and lack of biodiversity (Maharani et al., 2017, p. 530; Mędrzycki, 2021, pp. 182–199). Recent years have seen a noticeable increase in the implementation of so-called ‘concrete revitalizations’ in the historic squares of Polish cities. The authorities of Kielce, Skierniewice, Krzeszowice, and Bartoszyce, while taking measures to modernize and renew central squares, often decided to reduce or completely remove greenery from public spaces. As a result, these places, which are among the most visited in a given location, are characterized by a significant increase in temperature during the summer heat, which negatively affects the comfort of users. In the literature on the subject and among specialists, the inappropriateness of using the term ‘revitalization’ to refer to projects that lead to the elimination of greenery from public spaces is increasingly being raised, pointing to the need to include environmental aspects in urban renewal processes. According to the Law on Revitalization, the term means *the process of bringing degraded areas out of the crisis, carried out comprehensively, through integrated actions for the benefit of the local community, space, and economy [...]* (Dz.U. 2015 poz. 1777). Renovations of this type, although they are remedial interventions, are not comprehensive and, especially when greenery is eliminated, do not have the expected positive social, environmental, or urban effects. The lack of greenery limits the potential of these spaces as places for social integration and negatively affects the urban microclimate.

Recent years have seen an increase in interest and intensification of discussion of the phenomena described. Also noticeable is the growing number of initiatives aimed at reducing the negative effects of the so-called ‘concretosis’, i.e., excessive development of urban spaces at the expense of green areas. One of the leaders in increasing the area of green areas and tree plantings is currently Warsaw. Thousands of new trees are planted each year as part of the ongoing “Million Trees for Warsaw” project. Importantly, the city’s residents have the opportunity to actively participate in the greening process, indicating locations where they think the share of high greenery should be increased through the ‘Million Trees’ application or in the Warsaw

19115 service (<https://warszawa19115.pl/-/milion-drzew-dla-warszawy>). In addition, Warsaw was the first city in Poland to create a Charter on the Rights of Trees, a document that comprehensively defines rules for the protection, care, and improvement of trees and regulates interference with the capital’s greenery. The charter also regulates the principles of interference with urban greenery, introducing a framework for dealing with works that may affect the condition of the city’s trees. It also introduces rules for tree inventories. The Tree Crowns Map was created, with more than 7 million trees identified and described. A similar initiative is also being shown by the city of Gdańsk, which is in the process of drafting the Gdańsk Charter for Trees and has declared that 50,000 trees will be planted by 2030 (Karendys, 2024b; Karendys, 2024a; Ordinance no. 279/25 of the President of the City of Gdańsk). The National Fund for Environmental Protection and Water Management (NFEP&WM) has earmarked PLN 36.4 million in 2024 from the European Funds for Infrastructure, Climate, Environment 2021-2027 just for projects related to the de-concentration of urban areas in six cities: Warsaw, Poznań, Łódź, Rzeszów, Żyrardów, and Białogard (NFEP&WM, 2024). Widespread ‘concretosis’, increasing urbanization, and the disappearance of green areas in cities are significant barriers to countering the effects of climate change, which is considered one of the most serious challenges of the 21st century. Each successive month of 2024 has been declared the warmest on record by global measurements (WMO, 2025). Climate change also entails economic consequences involving, for example, increased monetary outlays for preventing, combating, and eliminating the consequences of extreme natural phenomena and changes. They have a significant impact on society, which is experiencing negative changes in living conditions in the urban environment. One of the key corrective measures is to reduce greenhouse gas emissions, which are the main anthropogenic cause of climate change. Unfortunately, even the immediate reduction of emissions to zero will not remove the irreversible changes that have already occurred (Zwierzchowska and Mizgajski, 2019, pp. 21–37). Trees play a key role in both phenomena, lowering air temperature (Hwang et al., 2011, pp. 863–864). According to some studies, increasing tree canopy cover by 10% reduces average annual air temperature by up to 1.4°C (Pauleit and Duhme, 2000, pp. 133–141). This is important because, according to data presented by the World Economic Forum, elevated temperatures found in urban environments contribute

to thousands of premature deaths each year. It is estimated that up to a third of these cases could be prevented by increasing tree plantings in urban areas (WEF, 2023). Trees are among the longest-lived organisms in the world, shaping unique landscapes for centuries and giving spaces character and identity (Szczepanowska, 2015, p. 13). Urban environments are a dominant visual element, influence spatial order, mask unattractive objects, and provide a sense of privacy and comfort. Their presence promotes sustainable development by regulating the climate and improving air quality, but the effectiveness of these functions depends on proper planning and management of green infrastructure. Interdisciplinary cooperation between urban engineering, landscape architecture, and arboriculture specialists at all stages of development is key here. Trees are more effective than traditional canopies in lowering the temperature on hot days, not only through transpiration and shading, but also by creating a thermal barrier between the crown and the surrounding area (Szczepanowska, 2015, p. 5). The degree of cooling effect increases with increased vegetation cover (increased proportion of shade cast) and with adequate ventilation (appropriate canopy arrangement) (Aram et al., 2019, p. 12). On the other hand, studies show that too much vegetation density limits visibility and causes a decrease in residents' sense of security (Lis et al., 2019, p. 14). As mentioned earlier, residents will stay in spaces that are well-maintained and aesthetically pleasing, so neglected areas, even if they have high nature value and perform important ecological functions in the urban fabric, will be perceived as unattractive (Lis et al., 2019, p. 15). Although it may seem counterintuitive, some residents, even during hot, sunny days, prefer to relax in the sun rather than in the shade (Middel et al., 2016, pp. 1859–1860).

All of the aforementioned aspects should be taken into account in the planning of new neighborhoods and in revitalization projects. The use of modern technologies can significantly support planning and design decisions by generating a variety of scenarios, including varying planting configurations, selecting plant species, and performing analysis and visualization of shadow distribution with its seasonal changes. Currently, open-source Python libraries (e.g., `pybdshadow` and the Ray Tracing Algorithm extension in Blender), as well as advanced GIS (ArcGIS Pro) and BIM (FenestraPro) tools, 3D application extensions (e.g., DL-Light and DL-Instant for SketchUp), and web applications (Shadowmap Studio) are available, which enable precise shading analyses in 2D and 3D, saving the

results as objects for further processing, and generating percentage and hourly statistics for selected surfaces (ground surfaces, roofs, and building facades).

1.2. Purpose and scope of the study

There are few examples in the literature of shadow modeling using 3D vector models (Park et al., 2021; Wang et al., 2023). Often, these are only conceptual assumptions (Hongbing et al., 2010; Li et al., 2024). Such processing is usually done on the Digital Surface Model (DSM) (Ruzickova et al., 2021; Kou et al., 2025). However, the results obtained using data in raster form are not as detailed as those obtained using data in the form of 3D models. Also rarely provided is access to 3D data models in open national data resources. In Poland, buildings at the LoD1 level of detail are available for the whole country, but 3D models of trees are only available locally (a dozen counties, as of the end of the first quarter of 2025). For many studies, data is often modeled at a very local scale (e.g., a section of a street or several streets) (Azcarate et al., 2021; Cimburova et al., 2023).

Therefore, the study's main objective was to assess the influence of high-level vegetation on shading on a narrow street in the context of the variability of this phenomenon throughout the year and during the day. To carry out the study, methods of spatial analysis — GIS technologies (2D and 3D), algorithms for shadow generation and visibility assessment were used, the results of which made it possible to model the distribution of shadow and identify areas with the greatest variability of insolation caused by greenery. The article proposes a methodology for performing such analyses to support decision-making in urban planning, with a particular focus on optimizing the design of greenery to improve the living comfort of residents. The analyses were performed for a section of Chmielna Street in Warsaw, for which revitalization works were planned.

1.3. AREA AND CONTEXT OF STUDY

The street section chosen for the study was Chmielna Street (Figure 1), one of the main communication routes in the very center of Warsaw. The street is located between mid-rise, historic, compact buildings, with numerous stores, restaurants, and service outlets on the first floors of buildings that give it a vibrant character. It is a street that has always been a popular place to spend time, both for Warsaw residents and tourists. Being a place for meetings, shopping, and recreation, and at the same time part of the historic

landscape of the capital, it combines elements of both modern and traditional architecture.

The width of the analyzed area is about 10 meters and about 25 m in the place of the wider square; its area, including the square in front of the Atlantic cinema and the Bukinist square, is equal to 1.02 ha.

The street was revitalized in 2024 as part of the New Center of Warsaw Project. The street's surface and lighting were replaced, and, most significantly, two rows of trees about 7 m high were planted along the entire street section between Pasaż Wiecha and Nowy Świat. The project is aimed at improving the quality of public spaces in the city center, adapting them for the convenience of pedestrians and cyclists, and working to adapt to climate change (<https://um.warszawa.pl/waw/nowe-centrum-warszawy/chmielna>).

The project was met with protests from the street's residents and the Association of Defenders of Warsaw's Monuments. The most considerable doubts about the project were raised by the fact that there have never been any trees on Chmielna Street. This interferes with preserving its historic character and potentially obscures the facades of historic tenements with tall trees. Despite a letter sent to the Mazovian Voivodeship Historic Preservation Officer, the investment was built according to the original design (Glinianowicz, 2023; Polska Agencja Prasa, 2023).

1.4. Methodology

The creation of shadow visualizations in the initial design phase can be done by the traditional method of observation during a field inspection to get an idea of the shading of a given area; however, it is impossible to analyze the varying insolation every hour of every day of the year in this way. In such projects, digital technologies offer a vast opportunity of various techniques for modeling, determining, and visualizing the potential shadow cast by a designed or existing development element; much less frequently, 3D modeling or 3D visualization techniques are used. Depending on the software used, the type of processing and calculations applied, and the data used, the shadow can be presented differently. Many applications offer shadow visualization only, which gives only a general idea of the shadow at a given hour, or are used for visualization for aesthetic purposes to give the visualization a more realistic effect. Programs for design and complex spatial analysis use algorithms to accurately calculate the position of the sun and the generated shadow at any hour of the year. They can create the shadow in vector form, which is suitable for further processing and analysis.

Vector data represents an area as a figure consisting of points connected by vertices. The most advanced approach is to create shadows in the form of 3D solids, which represent their volume and allow calculation of the locations where the cast shadows “intersect” with elements of the environment, including buildings.

Analyses performed included:

- an analysis of 3D modeling feasibility and the use of GIS technology and freely available data in shading analyses,
- comparative analysis of street shading on the day of the equinox and summer solstice in variants: 1) without trees and 2) with rows of trees along the entire length of the street,
- analysis of the variability of the street's insolation during the day on the day of the equinox and summer solstice,
- analysis of the obscuration of building facades by rows of trees in two cases of tree size.

The data used for shadow modeling was obtained by the national geoportal geoportal.gov.pl. 3D models of buildings and trees (LoD1 level of detail), developed by the General Office of Geodesy and Cartography, were downloaded. The tree models are available for download as of 2024 and were made for trees over 4 m high based on data acquired from the ALS (Airborne Laser Scanning) point cloud. The tree models are regular, symmetrical oval solids in a generalized way representing the crowns of trees and a cylinder representing the trunk. Together with LoD 1 models of buildings, they enable sufficiently detailed analyses of the shading conditions of a selected urban area. To optimize and accelerate the computational process of the tools used, the input layers were clipped to the development quarter located between Marszałkowska, Żłota, Kazimierz Brokel, Wojciech Górski, Nowy Świat, and Aleje Jerozolimskie streets, which includes all buildings that can cast a shadow on the analyzed Chmielna Street.

In the initial stage of the study, an analysis was carried out of the feasibility of making our own 3D models of trees in the ArcGIS Pro software used, as well as publicly available ALS survey data. From the point cloud, measurement points corresponding to the crown elements of the selected trees with heights of 19 m and 23 m (as assumed in the planting design) were isolated. The isolated points were carefully reviewed, and those that could adversely affect the resulting solid shape were removed. A tool that generates 3D solids in a spatial extent enclosed in a point cloud representing the tree crown — [Minimum Bounding Volume] creates

solids using four different methods: Convex hull (the smallest convex area surrounding the input data), Concave hull (concave solid covering the spatial extent of the input data), Sphere (spheres around the input data), Envelope (XYZ coordinate range of the input data in the form of a cuboid). The results of the test conducted for trees of different sizes are shown in Ill. 2.

The Concave hull is slightly closer to the actual shape of the tree; however, for a smaller tree, it is not much different from the model obtained from the Convex hull. The Sphere result is the most original and complex. Clusters of spheres surrounding each point of the cloud can resemble the shape of individual branches of the tree; however, this result is neither realistic nor sufficiently generalized. The last method (Envelope) is not suitable for creating 3D models of trees. A better application for it might be to model, for example, a trimmed hedge. The different number of measurement points in the described examples did not have much significance in the first and last types of the resulting 3D model. The second and third models of the tree obtained from the most significant number of ALS points show more detail; these solids have more complex geometry. In tree shadow analyses, models obtained by the Concave hull or Sphere method can give results more similar to the actual shadow cast by a single tree if it is characterized by an irregular shape. However, if the tree is young and has a regular shape, the method used does not have much significance. It is, therefore, necessary to choose the solid that best suits the purpose of analysis and visualization of results. To perform analyses of the shading caused by the rows of young trees to be planted on Chmielna Street, symmetrical models with a regular, generalized shape available at geoportal.gov.pl, most closely resembling the Convex Hull models, were used.

A comparative analysis of street shading before and after revitalization was performed for two days: the equinox day (September 23) and the longest day of the year (June 21). Shade solids were generated for each full hour from sunrise to sunset. For September 23, there were 12 intervals from 7:00 a.m. to 6:00 p.m., and for June 21, there were 16 intervals from 5:00 a.m. to 8:00 p.m. It has been decided not to analyze shadows during the winter solstice because of the very high street shading caused by the sun's low position in the sky. During such short days, the buildings themselves cause enough shading on the street that the new trees will not make much difference in insolation. In addition, trees without leaves in winter have a different shape, so tree models with full crowns would not be adequate. [Sun Shadow Volume] tool was used to generate shadows. In the

tool's parameters, the appropriate date, start and end time, and time interval (one hour) were entered.

The resulting layers stored the shadow volumes of each building and the date and time information. For the selected days, shadows were generated in two scenarios: 1) for buildings only, and 2) for buildings and trees. The sum of the shadows assigned to the grid of squares, superimposed on the study area, gave a map of the distribution of the number of hours of shading on a given day assigned to individual pixels. The summed impact of the shadows was assigned to a grid of squares (fishnet) and gave a map of the distribution of the number of shading hours on a given day, assigned to individual pixels. The data on the area of shadows per hour was presented in graphs, which enabled a thorough comparison of the area of shading before and after planting trees on the street (the two scenarios indicated above), as well as an analysis of its variation throughout the day and at different times of the year.

Due to protests by residents of Chmielna Street, who objected to the planting of trees mainly due to the reduced visibility of historic tenements, an additional comparison was made on how the planted rows of trees (about 7 m high) might affect visibility and how much in other ways, planting smaller trees than planned (about 3 m high) might also affect visibility.

2. RESULTS

The results of the analysis are presented in maps and charts. Maps illustrating the number of hours of shading make it possible to identify the areas of the street with the greatest and least shading. The graphs show the interchangeability of shading throughout the day and a quantitative comparison of the degree of shading with and without new trees. It also makes it possible to identify outliers — hours with unusually high sunlight. In the map visualizing the distribution of shadows cast by the buildings themselves on September 23 (Figure 3a), some characteristic features of this spatial arrangement can be seen. The most extended shaded area (for approximately 12 out of 12 hours during the day) is the courtyard on the west side of the street, which is positioned between the buildings surrounding it by three sides. It's worth noting that several trees have already been planted in this particular location, and the street revitalization project plans to plant even more. This means the new trees planted here will unlikely cause much more shade on this street section. In the diagram showing the area of the shadow cast on the street (Ill. 3c), it can immediately notice a distinctive 5 p.m. At this time, on September 23,

the sun is located in the sky in such a way that its rays cast shadows parallel to the course of the street and encounter almost no obstacles. The area of the shadow is then equal to about 60% of the street. This may seem like much shading anyway. However, this is due to the shadow cast on the widest sections of the street: the large Bukinist square, the square by the Wiecha Passage, and the courtyard in front of the Atlantic Cinema. Only the stretch of the street is insolated almost 100%. After 5 p.m., when the sun lowers in the sky and approaches the west, the area of shadow increases rapidly.

The map of the hours of shading on September 23, caused by buildings, existing trees, and new rows (Ill. 3b), immediately shows the difference that the presence of tall vegetation causes. Almost the entire street area is shaded for about 12 hours daily. The range of shading hours has changed from 7–12 to 8–12, and the sunniest area is still Bukinist Square. The chart of the area of shading (Fig. 3c) shows that from 7:00 a.m. to 10:00 a.m., the ample shading of the entire street does not change, then by 1:00 p.m., when the sun has the highest position in the sky, the insolation of the street increases, to decrease again by 4:00 p.m. It can still see a significant reduction in the area of shading at 5:00 p.m. when the sun's rays fall parallel to the street line; however, in this case, they encounter obstacles in the form of rows of trees, significantly reducing the insolation area. The shaded area at this hour increased from 60% of the street's surface to 89%.

This shows that the trees in the hour of the street's highest sunlight, when the sun is relatively low in the sky, increase their shading by almost 30%. It should also be noted that the shadow on the ground itself is analyzed. Shadows are cast on the street at an angle, and their volume, even when the ground surface is wholly shaded during the day, does not include the total volume of the street (understood as the space along the sequence of buildings from their base to the height of the roofs). Also, taking into account the scattering of sunlight, it should be emphasized that even when it is completely shaded, diffuse sunlight still reaches it, and it is not shrouded in total darkness.

The day on June 21 is longer than September 23 by 4 full hours. The sun during the summer solstice is located highest above the horizon during the year, so there are the shortest possible shadows at this time. The map (Figure 4a) shows that the insolation of the street is more significant than on September 23. The smallest shading, equal to only 4 to 6 hours in a 16-hour day, occurs in the widest part of the street. The darkest is still the courtyard

by the Atlantic Cinema. The shadow area graph (Ill. 4c) shows a new phenomenon: the appearance of the second hour with a sharply reduced shadow area around 07:00 a.m. This is because the sun on that day is parallel to the street twice daily. First, shortly after sunrise, the sun's rays thus fall on the streets from the east side at around 7:00 a.m. and then closer to sunset at around 4:00 p.m. on the west side. At 7:00 a.m., the area of the shadow equals 59%, even less than at the brightest hour on the day of the equinox. At 4:00 p.m., the shadow covers only 30% of the street, then quickly increases to 92% within two hours.

The visualization of the distribution of the number of hours of shading caused by buildings and trees on Chmielna Street on June 21 (Ill. 4b) is the most visually diverse compared to the other shading maps performed. Along the upper border of the study area, one can clearly see a shaded line of trees surrounded by the sunniest areas of the street. The smallest number of shading hours has increased from 4 to 6, so the sunniest parts of the street are shaded at least 2 hours longer during the day compared to a street without tree rows. The eastern section of the street, similar to the day of the equinox, is uniformly shaded for about 15–16 hours. The chart of the shading area (Ill. 4c) is clearly more uniform. At 7:00 a.m., the reduction in the shadow area is minimal. Compared to the analysis for the street without trees, noticeably higher insolation occurs between 11:00 a.m. and 12:00 p.m., and instead of increasing further, it remains at a similar level until 4:00 p.m. The slightest shadow area on the street with trees at 4:00 p.m. rose from 30% to as much as 65%. Thus, it can be concluded that trees at the time of maximum sunshine on the day of the summer solstice cause twice as much shading on Chmielna Street. They can, therefore, significantly reduce the air temperature during the hottest hours of the longest day of the year.

The obscuration of Chmielna Street buildings by planted trees was analyzed using the 3D scene exploration tools available in ArcGIS Pro. With the Viewshed tool, the visible and invisible building walls of the 3D model with and without trees were visualized. A comparison was made between the visibility of building fronts without tall vegetation, with trees about 7 m high, and a variant with lower trees about 3 m high, which could be a compromise between the street's residents, who did not want large trees, and the planners and city authorities.

In Ill. 5, it can be seen that on the street without trees (without taking into account other obstacles that may be on the street, such as advertising signs

and umbrellas in the gardens next to commercial establishments), the visibility of the street's building facade is virtually complete. Figure 6 shows that the area of the visible facade becomes much smaller when tall tree models obscure buildings. The area not visible on the front of the buildings in the analyzed view reaches the height of the third floor (equivalent to about 8 m). However, it should be taken into account that trees are characterized by partial permeability of light and visibility. The crowns of trees, although they limit visibility, are not a completely impermeable barrier - there are clearances through which partial observation of objects behind them is possible. The effect of trees on visibility also varies throughout the year. In winter, when trees are devoid of leaves and their crowns consist mainly of thin branches, the degree of view obstruction is minimal. In spring, on the other hand, as leaves appear and develop, the level of obscuration gradually increases. A similar phenomenon is observed in the case of the shadows cast by trees - they are not uniform, but show clearances where the sun's rays penetrate between branches and leaves.

Ill. 7 shows a visualization of the developed variant of lower trees with a height of about 3 m. Analyses have shown that the area of building facades obscured by lower trees is mainly limited to ground-floor lots (about 4 m). Taking into account the presence of other elements of street infrastructure, such as umbrellas in front of commercial establishments located on the first floors of the street, advertising signs and street signs, it can be concluded that planting trees of low height will not significantly affect the exposure of the facades of the historic tenements of Chmielna Street. The proposal to introduce low, ornamental trees would be a compromise solution, meeting both the needs of residents and the requirements of protecting the historic urban layout of the street, interfering with it to a lesser extent than the planned revitalization project in accordance with the assumptions of the New Center of Warsaw.

3. CONCLUSIONS

The virtues of urban greenery and its beneficial effects on the environment are multifaceted and widely documented. In the context of ongoing climate change, the role of green infrastructure in lowering temperatures and shaping favorable local climate conditions is becoming particularly important. This aspect is currently one of the key, and perhaps the most important factor, determining the direction of green space development in the urban environment. One of the key challenges facing residents and local

authorities is the urban heat island and polluted air. Both of these are compounded by the operation of district heating systems and an extensive transportation system. In both cases, green infrastructure is an effective aid. Its abilities related to cleaning the air, absorbing harmful dust, lowering temperature, and raising humidity exceed the effectiveness of technological solutions, also taking into account the longevity of trees and their resistance to all weather conditions. In the presented research, the topic of lowering the air temperature by new plantings was addressed, and the impact on the environment of the shadow cast by tall vegetation was studied. This shade significantly reduces the temperature of heated concrete surfaces, creating a favorable microclimate and providing comfortable thermal conditions during periods of high temperatures.

The results show how GIS technologies can have significant applications in the urban landscape planning process. The analyses performed show the enormous possibilities of 3D modeling. When, as in the case of Poland, we have the appropriate data models (trees, buildings) and tools for modeling the assumptions of urban projects, nothing stands in the way of creating numerous simulations and generating easily any scenarios, among others, for revitalization. This causes the mentioned technologies to play an increasingly important role in supporting the decision-making process in cities. They allow 3D modeling of the surroundings of a planned investment and studies of the impact of various scenarios of changes in space so that the size, type, and placement of new elements, including greenery in the city, can be adjusted as much as possible.

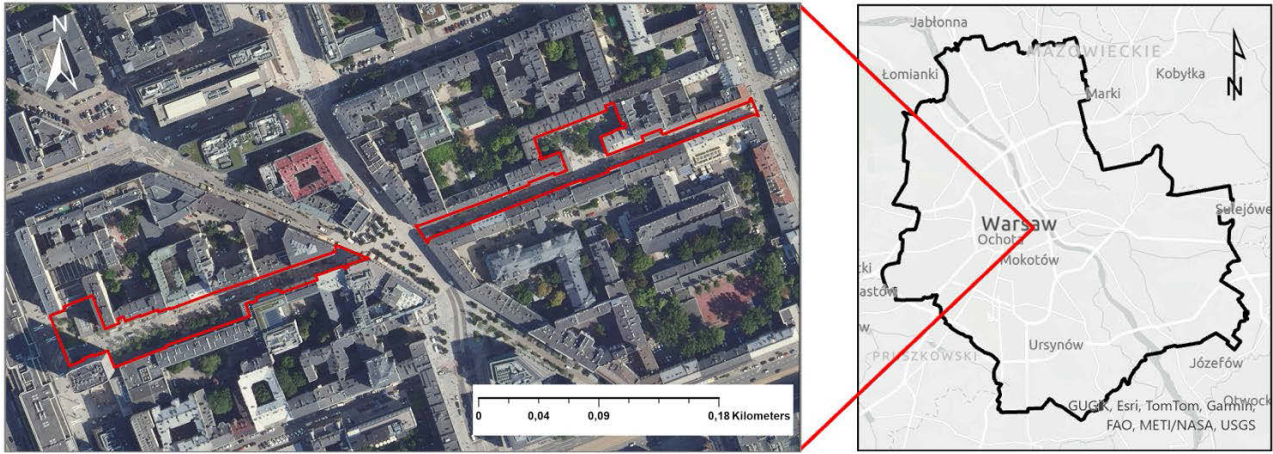
For the presented project, the locations of the most and least shaded areas of the studied space were obtained. A detailed, quantitative assessment of the shading of the ground surface and building facades was also obtained. The shading maps would allow identifying the areas of the studied street where it would be most appropriate to introduce new plantings of shade-preferring greenery and such species that would grow best in its sunniest part. The shading of the street before and after the planting of the tree rows was compared at different times of the year, both visually, by comparing shading maps, and quantitatively, by measuring the area of shade at successive hours. It was also visualized how the size of trees can affect the visibility of representative historic buildings along the street, and obscured sections of facades were indicated. The article presents the results of analyses conducted for two days of the year: June 21 and September 23, so as to determine the differences in shading and insolation for varying lighting conditions.

Such analyses can also be carried out on other freely chosen mementos of the year, and the selection of the analyzed dates should be based on both the variable angle of incidence of sunlight and the direction (azimuth) of the axis of the street under study.

The results obtained for a section of Chmielna Street indicate that even high trees will not cause a significant deterioration in thermal comfort in autumn and winter, as they cause a significant increase in shading only in the late afternoon. The impact of new plantings, on the other hand, will significantly improve the comfort of this space in summer, causing an increase in shading in the early afternoon from 30–40% to 70% of the area of the studied street section.






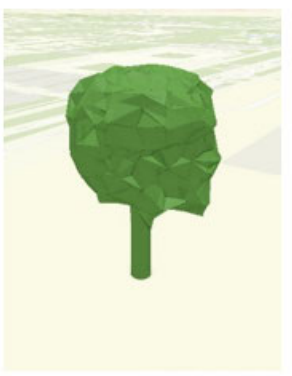

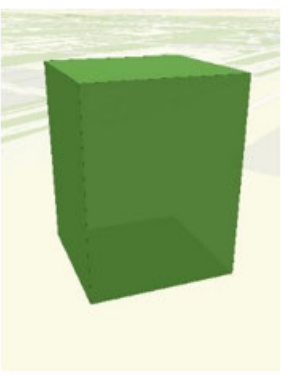
3D visualizations, maps, charts, and compilations prepared in this way are easy to perceive not only for professionals and urban planners but also for all participants in the planning process and users of urban space. They can support public consultations, making communicating design visions easier and reaching compromises, which is especially important in conflict situations, as was the case with the described Chmielna Street project.

In summary, it is possible to significantly understand the determinants of planned or transformed space using GIS tools. Spatial modeling and analysis support the creation of more comfortable public places better adapted to climate change, significantly improving the quality of life in cities.



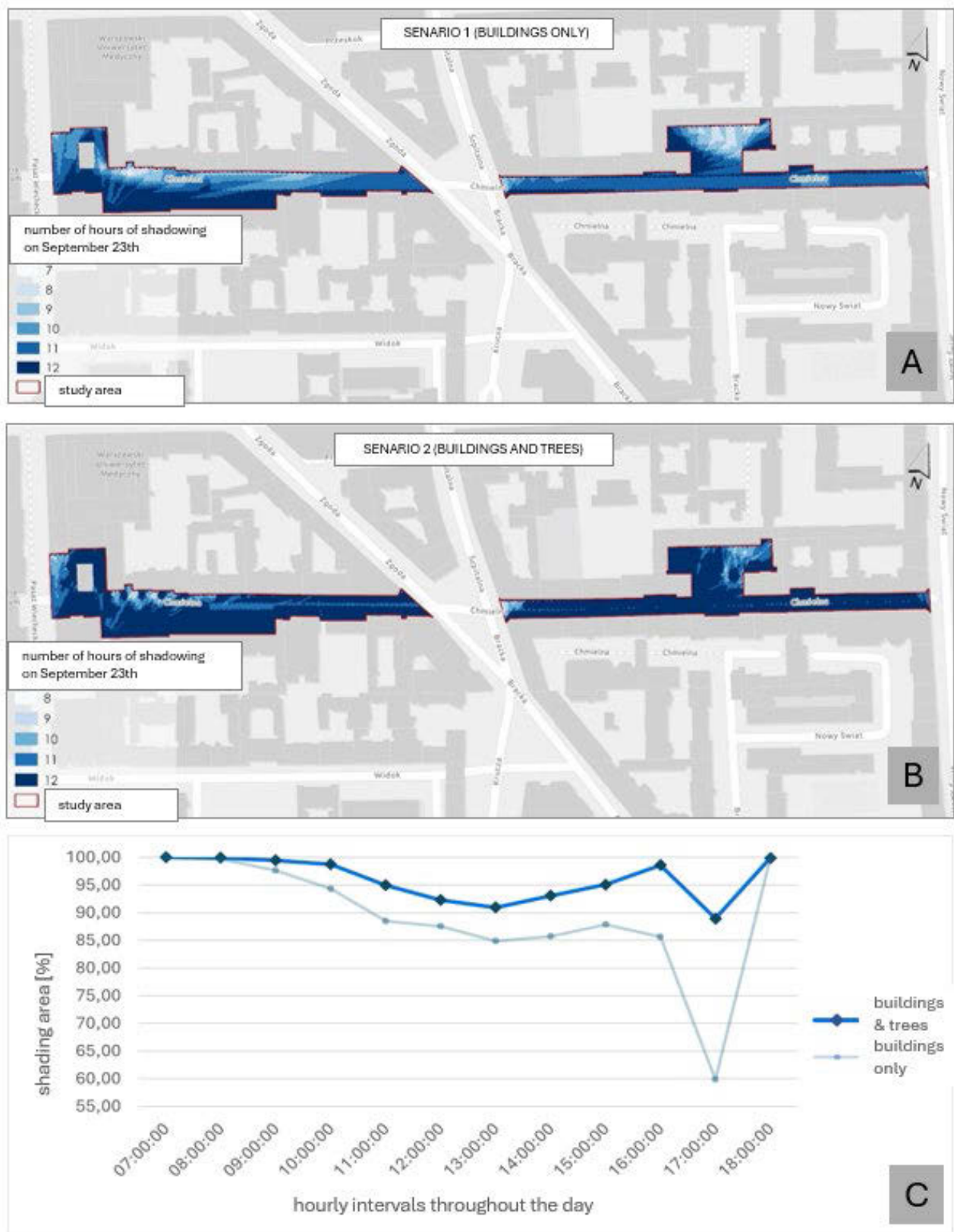
III. 1. The location of the study area — Chmielna Street, Warsaw, Poland. Source: original work.

II. 1. Lokalizacja obszaru badań — ulica Chmielna, Warszawa, Polska. Źródło: opracowanie własne.

Example models of a tree about 19 m high, generated from 408 ALS points			
			
Convex hull	Concave hull	Sphere	Envelope
Example models of a tree about 23 m high, generated from 2700 ALS points			
			
Convex hull	Concave hull	Sphere	Envelope

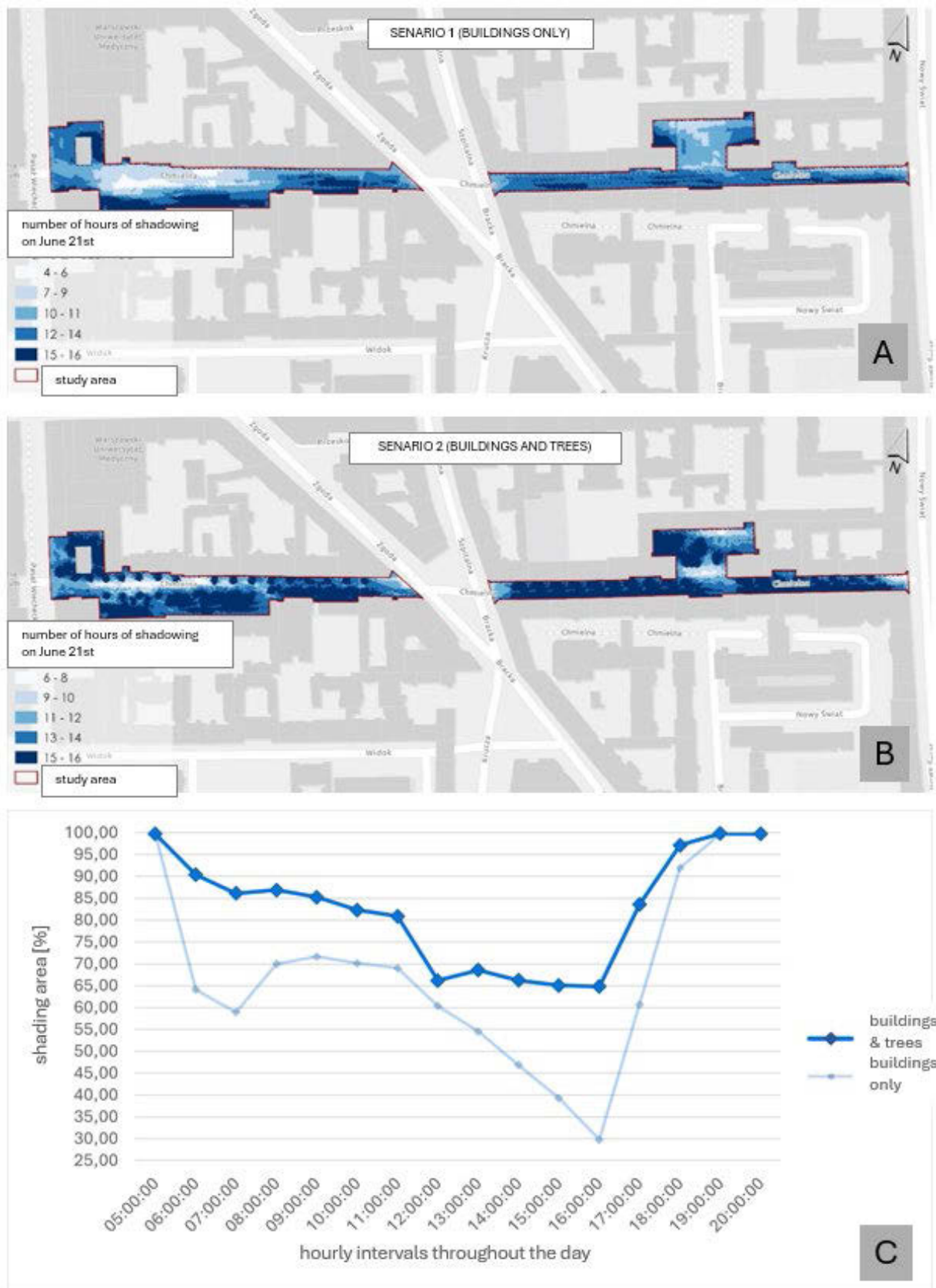
III. 2. Comparison of the results of generating tree models by different methods. Data source: selected ALS cloud points, original work.

II. 2. Porównanie wyników generowania modeli drzew różnymi metodami. Źródło danych: wybrane punkty chmury ALS, opracowanie własne.



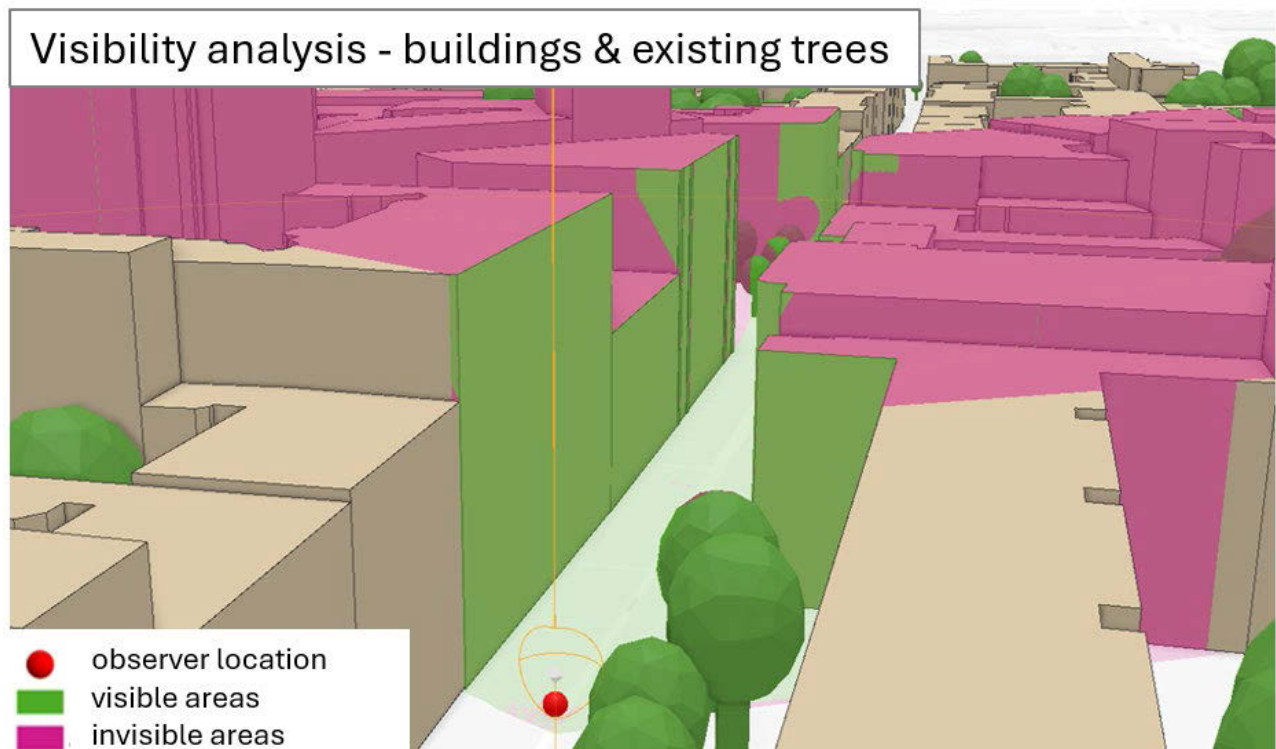
III. 3. Visualization of the number of hours of shading cast by **buildings** (A); the number of hours of shading cast by **buildings and trees** (B); and a graph of the area of shading cast by **buildings and trees** at each full hour during the day (C) on Chmielna Street on **September 23**. Source: own work.

Il. 3. Wizualizacja liczby godzin zacielenia rzucanego przez **budynki** (A); liczby godzin zacielenia rzucanego przez **budynki i drzewa** (B) oraz wykres powierzchni zacielenia rzucanego przez **budynki i drzewa** o kaŹdej pełnej godzinie w ciągu dnia (C) na ulicy Chmielnej w dniu **23 września**. Źródło: opracowanie własne.



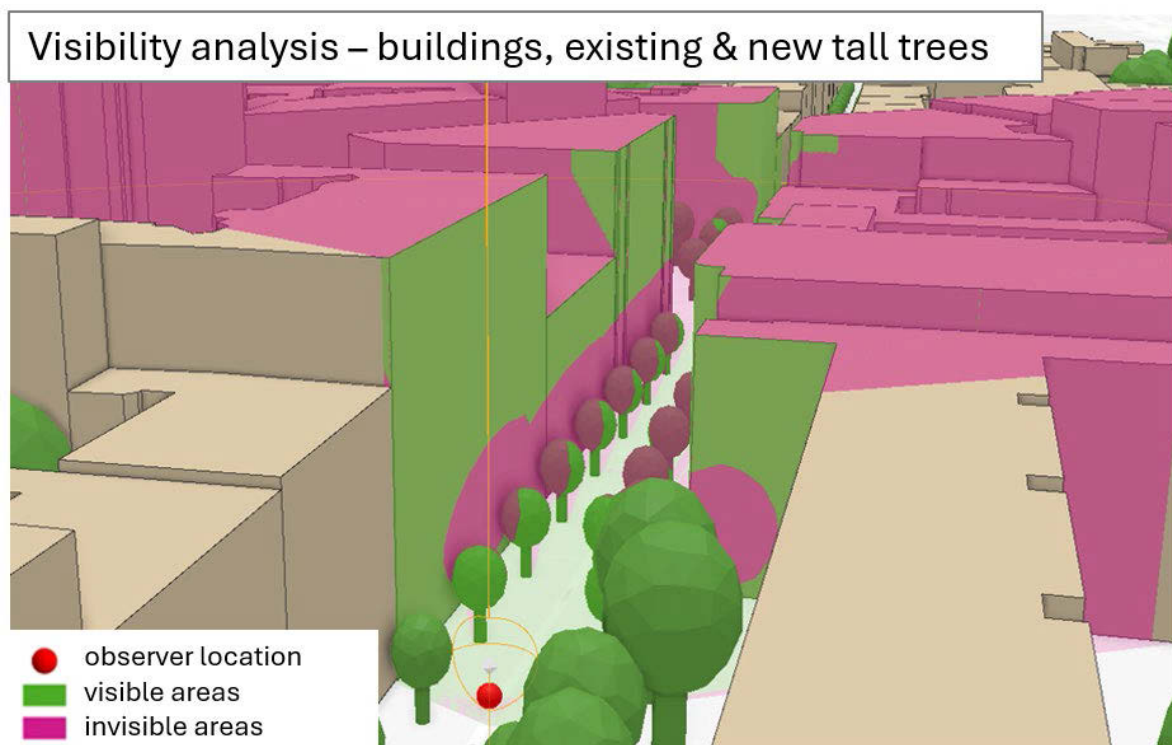
Ill. 4. Visualization of the number of hours of shading cast by **buildings** (A); the number of hours of shading cast by **buildings and trees** (B); and a graph of the area of shading cast by **buildings and trees** at each full hour during the day (C) on Chmielna Street on **June 21st**. Source: own work.

Il. 4. Wizualizacja liczby godzin zacienienia rzucanego przez **budynki** (A); liczby godzin zacienienia rzucanego przez **budynki i drzewa** (B) oraz wykres powierzchni zacienienia rzucanego przez **budynki i drzewa** o każdej pełnej godzinie w ciągu dnia (C) na ulicy Chmielnej w dniu **21 czerwca**. Źródło: opracowanie własne.



Ill. 5. The result of visibility analysis — visualization of visible and invisible parts of buildings, including existing trees only for the selected observation point. source: original work.

Il. 5. Wynik analizy widoczności — wizualizacja widocznych i niewidocznych części budynków, w tym istniejących drzew, tylko dla wybranego punktu obserwacji. Źródło: opracowanie własne.



Ill. 6. The result of visibility analysis — visualization of visible and invisible parts of buildings, including existing trees and new tall trees (about 7 m high) for the selected observation point. source: original work.

Il. 6. Wynik analizy widoczności — wizualizacja widocznych i niewidocznych części budynków, w tym istniejących drzew i nowych, wysokich drzew (około 7 m wysokości) dla wybranego punktu obserwacji. Źródło: opracowanie własne.

Visibility analysis – buildings, existing & new low trees



III. 7. The result of visibility analysis — visualization of visible and invisible parts of buildings, including existing trees and new low trees (about 3 m high) for the selected observation point. source: original work.

II 7. Wynik analizy widoczności — wizualizacja widocznych i niewidocznych części budynków, w tym istniejących drzew i nowych, niskich drzew (o wysokości około 3 m) dla wybranego punktu obserwacji. Źródło: opracowanie własne.

1. WPROWADZENIE

Nieodzownym składnikiem miast dostosowanych do potrzeb mieszkańców jest zorganizowana i wyposażona przestrzeń publiczna. Takie miejsca były sercem miast od czasów starożytności, kiedy agora, forum lub inne place miały decydujące znaczenie w rozwoju życia społecznego, gospodarczego i politycznego. Wiele jest czynników warunkujących chęć spędzania czasu w przestrzeniach publicznych, a ich jakość można oceniać pod względem dostępności, funkcjonalności, bezpieczeństwa, wartości estetycznych oraz możliwości generowania wspólnoty (Wozniak et al., 2025, s. 1–2; Noworól et al., 2010, s. 31–49; Małyszek, 2021, s. 59). Wpływ na decyzję ma także pogoda, odpowiednie wyposażenie lub jego brak, a w zależności od pory roku — nasłonecznienie lub zacienienie (Han et al., 2022, s. 6–7; Humpel, 2002, s. 196). Jednym z ważniejszych aspektów jakości przestrzeni miejskich jest obecność i stan roślinności. To tereny zielone umożliwiają odpoczynek od hałasu i innych bodźców miejskich (Cielecka, 1986; Dzhambov, Dimitrova, 2014; Wickramathilaka et al., 2022), zachęcają do aktywności fizycznej oraz dłuższego pozostawania w przestrzeni wspólnej (Browning et al., 2022, s. 8; Lopez-Haro et al., 2024, s. 14–15).

Warto także podkreślić, że w upalne dni, szczególnie tereny o znacznej powierzchni, ograniczają efekt miejskiej wyspy ciepła (Fernández, Navarro, 2024, p. 16). Zbyt wysoka i gęsta roślinność może jednak powodować ograniczenie cyrkulacji powietrza oraz wolniejsze tempo oddawania ciepła nocą (Gunawardena et al., 2017, s. 1043) oraz ograniczać widoczność, co może powodować obniżenie poczucia bezpieczeństwa (Li et al., 2015, s. 1178–1179; Kędzierski, 2019, s. 184–185). W gorące dni mieszkańcy miast znacznie chętniej wybierają poruszanie się po zacienionych chodnikach i ścieżkach rowerowych (Saaroni et al., 2018; Chen et al., 2024, s. 6–9). Zacienione ściany budynków mieszkalnych zapewniają poprawę komfortu termicznego latem, mając też przełożenie na możliwość ograniczenia korzystania z urządzeń klimatyzacji (aspekt ekonomiczny i środowiskowy) (Janiak, 2021; Czekajlo et al., 2023, s. 825–827). Zbyt duży udział cienia zimą pogarsza komfort poprzez ograniczenie dostępu światła słonecznego (Afshar et al., 2018, s. 238).

Projekty przekształcające przestrzeń miejską, w tym projekty rewitalizacyjne, powinny brać pod uwagę wymienione aspekty (czasami trudne do pogodzenia i wzajemnie sprzeczne). Odpowiednie wspomaganie technologiczne w opracowywaniu planów nasadzeń roślinności pozwala na opraco-

wanie optymalnych rozwiązań i scenariuszy, dostosowanych do potrzeb mieszkańców. Wyniki takich analiz przedstawia niniejszy artykuł.

1.1. Przegląd literatury

Omawiając temat zieleni w miastach należy rozróżnić jej znaczenie i funkcję, w zależności od rodzaju umiejscowienia w strukturze funkcjonalno-przestrzennej. Inne funkcje spełnia zieleń osiedlowa, inne — zieleń uliczna, a jeszcze inne — zieleń na dachach budynków (Andersson-Sköld et al., 2018, s. 275–276). Funkcje zieleni, takie jak oczyszczanie powietrza, produkcja tlenu i obniżanie temperatury, są ważne w każdym przypadku. Według art. 2. pkt. 6. Ustawy o planowaniu i zagospodarowaniu przestrzennym (Dz.U. 2003 nr 80 poz. 717), obszary przestrzeni publicznej powinny być rozumiane jako (...) *obszar o szczególnym znaczeniu dla zaspokajania potrzeb mieszkańców, poprawy jakości ich życia i sprzyjają nawiązywaniu kontaktów społecznych ze względu na ich położenie oraz cechy funkcjonalno-przestrzenne* (...).

Ulice, jako fundamentalne elementy przestrzeni publicznych, mają przede wszystkim funkcję komunikacyjną, więc charakteryzują się wyższym stopniem dynamiki w porównaniu do skwerów i osiedli. Istotne jest, by były tak zaprojektowane, aby nie tylko sprzyjały sprawnemu przemieszczaniu się, ale także tworzyły przestrzeń zachęcającą do przebywania i nawiązywania oraz pogłębiania kontaktów międzyludzkich (Carr, 1992, s. 26–31). Jednak dominująca komunikacyjna funkcja ulicy może ograniczać możliwości dłuższego zatrzymywania się i inicjowania interakcji międzyludzkich w jej obrębie. W związku z tym projektowanie ulic, jako przyjaznych przestrzeni publicznych, powinno uwzględniać rozwiązania sprzyjające poprawie jakości życia mieszkańców oraz ich dobrostanowi (Dennis et al., 2020, s. 2–4). Do takich działań należy wzbogacanie przestrzeni ulicznej o odpowiednio zaplanowane elementy zieleni i małej architektury, które pozwalają na zatrzymanie się i odpoczynek.

Dużym problemem we współczesnych miastach, którego skutki są już powszechnie dostrzegane i zwalczane, jest tak zwana „betonoza”. Określana jako nadmierne, nieprzemysłane używanie elementów i powierzchni betonowych i innych materiałów nieprzepuszczalnych w przestrzeniach publicznych, często powiązane z ograniczaniem powierzchni zielonych i wycinką drzew. Takie nadmierne zasklepienie gruntu powoduje wysokie temperatury, jest jednym z głównych powodów miejskiej wyspy ciepła, skutkuje także podtopieniami i powodziami błyskawicznymi, niedoborami wody i brakiem

bioróżnorodności (Maharani et al., 2017, s. 530; Mędrzycki, 2021, s. 182–199). Ostatnie lata przyniosły zauważalny wzrost realizacji tak zwanych „betonowych rewitalizacji” na historycznych rynkach polskich miast. Władze Kielc, Skierniewic, Krzeszowic i Bartoszyca, podejmując działania mające na celu modernizację i odnowę centralnych placów, często decydowały się na ograniczenie lub całkowite usunięcie zieleni z przestrzeni publicznych. W konsekwencji, miejsca te — będąc jednymi z najczęściej odwiedzanych w danej lokalizacji — podczas letnich upałów charakteryzują się znacznym wzrostem temperatury, co negatywnie wpływa na komfort użytkowników.

W literaturze przedmiotu oraz wśród specjalistów coraz częściej podnosi się kwestię nieadekwatności użycia terminu „rewitalizacja” w odniesieniu do projektów, które prowadzą do eliminacji zieleni z przestrzeni publicznych, wskazując na konieczność uwzględnienia aspektów środowiskowych w procesach odnowy urbanistycznej. Według Ustawy o rewitalizacji termin ten oznacza *proces wyrowadzania ze stanu kryzysowego obszarów zdegradowanych, prowadzony w sposób kompleksowy, poprzez zintegrowane działania na rzecz lokalnej społeczności, przestrzeni i gospodarki (...)* (Dz.U. 2015 poz. 1777). Remonty tego typu, choć stanowią interwencje naprawcze, nie mają charakteru kompleksowego i — zwłaszcza w przypadku eliminacji zieleni — nie przynoszą oczekiwanych, pozytywnych efektów społecznych, środowiskowych ani urbanistycznych. Brak zieleni ogranicza potencjał tych przestrzeni jako miejsc integracji społecznej oraz negatywnie wpływa na mikroklimat miejski. Ostatnie lata przyniosły wzrost zainteresowania oraz intensyfikację dyskusji na temat opisanych zjawisk. Zauważalna jest również coraz większa liczba inicjatyw mających na celu ograniczenie negatywnych skutków tak zwanej „betonozy”, czyli nadmiernej zabudowy przestrzeni miejskich kosztem terenów zielonych.

Jednym z liderów w zakresie zwiększania powierzchni terenów zieleni oraz nasadzeń drzew jest obecnie Warszawa. W ramach realizowanego projektu „Milion drzew dla Warszawy” każdego roku sadzone są tysiące nowych drzew. Co istotne, mieszkańcy miasta mają możliwość aktywnego udziału w procesie zazieleniania, wskazując lokalizacje, w których ich zdaniem należy zwiększyć udział zieleni wysokiej. Służą temu aplikacja „Milion drzew” oraz serwis Warszawa 19115 (<https://warszawa19115.pl/-/milion-drzew-dla-warszawy>, dostępne: 23.09.2025). Oprócz tego Warszawa, jako pierwsze miasto w Polsce, stworzyła Kartę Praw Drzew. Jest to dokument określający kompleksowo

zasady ochrony, pielęgnacji i poprawy warunków życia drzew i reguluje ingerencję w zieleń stolicy. Karta reguluje również zasady ingerencji w zieleń miejską, wprowadzając ramy postępowania w przypadku prac mogących wpływać na stan drzewostanu. Wprowadza także zasady dotyczące inwentaryzacji drzew. Powstała Mapa Koron Drzew, na której zidentyfikowano i opisano ponad 7 milionów drzew.

Podobną inicjatywę wykazuje także Gdańsk, który jest w trakcie sporządzania Gdańskiej Karty dla Drzew. Miasto zadeklarowało, że do 2030 roku zasadzone zostanie 50 tysięcy drzew (Karendys, 2024a; Karendys, 2024b; Zarządzenie nr 279/25 Prezydenta Miasta Gdańska).

Narodowy Fundusz Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej (NFOŚiGW) w roku 2024 przeznaczył 36,4 mln zł ze środków Funduszy Europejskich na Infrastrukturę, Klimat, Środowisko 2021–2027, właśnie na realizację projektów związanych z „odbetonowaniem” terenów miejskich w sześciu miastach: Warszawie, Poznaniu, Łodzi, Rzeszowie, Żyrardowie i Białogardzie (NFEP&WM, 2024). Powszechna „betonoza”, postępująca urbanizacja i zanikanie terenów zielonych w miastach stanowią istotną barierę w przeciwdziałaniu skutkom zmian klimatycznych, które uznawane są za jedno z najpoważniejszych wyzwań XXI wieku.

Każdy kolejny miesiąc 2024 roku był ogłaszany najcieplejszym w historii światowych pomiarów (WMO, 2025). Zmiany klimatyczne pociągają za sobą także skutki ekonomiczne, wiążące się na przykład ze wzrostem nakładów finansowych na zapobieganie, zwalczanie i likwidację następstw ekstremalnych zjawisk i zmian przyrodniczych. Wywierają one istotny wpływ na społeczeństwo, które doświadcza negatywnych zmian warunków życia w środowisku miejskim. Jednym z kluczowych działań naprawczych jest ograniczanie emisji gazów cieplarnianych, będących główną antropogeniczną przyczyną zmian klimatu. Niestety, nawet natychmiastowe zredukowanie emisji do zera nie usunie już zaistniałych, nieodwracalnych zmian (Zwierchowśka, Mizgajski, 2019, s. 21–37). Drzewa odgrywają kluczową rolę w obniżaniu temperatury powietrza (Hwang et al., 2011, s. 863–864). Według niektórych badań, zwiększenie pokrycia koronami drzew o 10% powoduje obniżenie średniej rocznej temperatury powietrza nawet o 1,4°C (Pauleit, Duhme, 2000, s. 133–141). Jest to o tyle istotne, że zgodnie z danymi przedstawionymi przez World Economic Forum, podwyższone temperatury występujące w środowisku miejskim przyczyniają się corocznie do tysięcy przedwczesnych zgonów. Szacuje się, że nawet jednej trzeciej z tych przypadków można

by zapobiec poprzez zwiększenie liczby nasadzeń drzew na terenach miejskich (WEF, 2023).

Drzewa należą do najdłużej żyjących organizmów na świecie, kształtując przez wieki unikalne krajobrazy oraz nadając przestrzeniom charakter i tożsamość (Szczepanowska, 2015, s. 13). W środowisku miejskim stanowią dominujący element wizualny, wpływają na ład przestrzenny, maskują nieatrakcyjne obiekty oraz zapewniają poczucie prywatności i komfortu. Ich obecność sprzyja zrównoważonemu rozwojowi poprzez regulację klimatu i poprawę jakości powietrza, jednak efektywność tych funkcji zależy od odpowiedniego planowania i zarządzania zieloną infrastrukturą. Kluczowa jest tu interdyscyplinarna współpraca specjalistów z zakresu inżynierii miejskiej, architektury krajobrazu i arborystyki na wszystkich etapach inwestycji. Drzewa skuteczniej niż tradycyjne osłony obniżają temperaturę w upalne dni, nie tylko poprzez transpirację i zacienienie, ale także dzięki tworzeniu bariery termicznej pomiędzy koroną a otoczeniem (Szczepanowska, 2015, s. 5).

Stopień efektu chłodzącego zwiększa się wraz ze wzrostem pokrycia roślinnością (zwiększony udział rzucanego cienia) oraz przy zapewnieniu odpowiedniego przewietrzania (odpowiedni układ koron drzew) (Aram et al., 2019, s. 12). Badania pokazują, że z kolei duże zagęszczenie roślinności ogranicza widoczność i powoduje spadek poczucia bezpieczeństwa mieszkańców (Lis et al., 2019, s. 14).

Jak wcześniej wspomniano, mieszkańcy będą pozostawać w przestrzeniach zadbanych i estetycznych, tak więc tereny zaniedbane, nawet jeśli posiadają wysoką wartość przyrodniczą i pełnią istotne funkcje ekologiczne w strukturze miejskiej, będą postrzegane jako nieatrakcyjne (Lis et al., 2019, s. 15). Choć może to się wydawać nieintuicyjne, część mieszkańców, nawet podczas upalnych, słonecznych dni, preferuje odpoczynek w słońcu, a nie w cieniu (Middel et al., 2016, s. 1859–1860).

Wszystkie wymienione aspekty powinny być uwzględnione w planowaniu nowych osiedli i w projektach rewitalizacyjnych. Zastosowanie nowoczesnych technologii może znacząco wspierać podejmowanie decyzji planistycznych i projektowych poprzez generowanie różnorodnych scenariuszy, obejmujących między innymi zróżnicowane konfiguracje nasadzeń, dobór gatunków roślin oraz przeprowadzanie analiz i wizualizacji rozkładu cienia wraz z jego sezonowymi zmianami.

Obecnie dostępne są zarówno otwarte biblioteki Python (np. pybdshadow i rozszerzenie Ray Tracing Algorithm w Blenderze), jak i zaawansowane narzędzia GIS (ArcGIS Pro) i BIM (FenestraPro), rozszerzenia aplikacji 3D (na przykład DL-Light

i DL-Instant dla SketchUp) oraz aplikacje webowe (Shadowmap Studio), które umożliwiają precyzyjne analizy zacienienia w 2D i 3D, zapis wyników jako obiektów do dalszego przetwarzania oraz generowanie statystyk procentowych i godzinowych dla wybranych powierzchni (ziemi, dachów i fasad budynków).

1.2. Cel i zakres badań

W literaturze istnieje kilka przykładów modelowania cieni przy użyciu modeli wektorowych 3D (Park et al., 2021; Wang et al., 2023). Często są to jedynie założenia koncepcyjne (Hongbing et al., 2010; Li et al., 2024). Takie przetworzenia są zwykle wykonywane na Numerycznym Modelu Powierzchni Terenu (NMPT) (Ruzickova et al., 2021; Kou et al., 2025). Jednak wyniki uzyskane przy użyciu danych w postaci rastrowej nie są tak szczegółowe, jak te uzyskane przy użyciu danych w postaci modeli 3D. Rzadko zapewniany jest również dostęp do modeli danych 3D w otwartych krajowych zasobach danych. W Polsce budynki na poziomie szczegółowości LoD1 są dostępne dla całego kraju, ale modele 3D drzew już tylko lokalnie (kilkanaście powiatów — stan na koniec I kwartału 2025 roku). W przypadku wielu badań dane są często modelowane w bardzo lokalnej skali (na przykład fragment ulicy lub kilka ulic) (Azcarate et al., 2021; Cimburova et al., 2023).

Dlatego głównym celem badania była ocena wpływu roślinności wysokiej na zacienienie wąskiej ulicy w kontekście zmienności tego zjawiska w ciągu roku i w ciągu dnia. Zbadano również wpływ nowych nasadzeń drzew na przesłanianie ścian budynków wzdłuż analizowanego odcinka ulicy.

Do realizacji badań zastosowano metody analizy przestrzennej — technologie GIS (2D i 3D), algorytmy generowania cienia i oceny widoczności, których wyniki umożliwiły zamodelowanie rozkładu cienia oraz identyfikację obszarów o największej zmienności nasłonecznienia powodowanego przez zieleń. W artykule zaproponowano metodykę wykonywania takich analiz, mającą na celu wspomaganie podejmowania decyzji w planowaniu przestrzennym, ze szczególnym uwzględnieniem optymalizacji projektu zieleni w celu poprawy komfortu życia mieszkańców. Analizy wykonano dla fragmentu ulicy Chmielnej w Warszawie, dla którego zaplanowano prace rewitalizacyjne.

1.3. Obszar opracowania i kontekst projektu

Do przeprowadzenia badań wybrano fragment ulicy Chmielnej (Il. 1), będącej jednym z głównych ciągów komunikacyjnych w samym centrum Warszawy. Ulica zlokalizowana jest między

zwartą zabytkową zabudową średniej wysokości, z licznymi sklepami, restauracjami i punktami usługowymi w parterach budynków, które nadają jej tętniący życiem charakter. Jest to ulica, która od zawsze była popularnym miejscem spędzania czasu, zarówno dla mieszkańców Warszawy, jak i turystów. Będąc miejscem spotkań, zakupów i rekreacji, a jednocześnie częścią historycznego krajobrazu stolicy, łączy w sobie elementy zarówno współczesnej, jak i tradycyjnej architektury.

Szerokość analizowanego obszaru to około 10 m i około 25 m w miejscu szerszego placu. Jego powierzchnia, równa 1,02 ha, obejmuje plac przed kinem Atlantic i skwer Bukinistów.

W 2024 roku ulica przeszła rewitalizację w ramach Projektu Nowe Centrum Warszawy. Nawierzchnia oraz oświetlenie zostały wymienione i — co najistotniejsze — zasadzono dwa szpalery drzew o około 7 m wysokości wzdłuż całego fragmentu ulicy między Pasażem Wiecha a Nowym Światem. Projekt ma na celu poprawę jakości przestrzeni publicznych w centrum miasta, przystosowanie ich dla wygody pieszych i rowerzystów oraz działania w celu adaptacji do zmian klimatu (*Chmielna*, <https://um.warszawa.pl/waw/nowe-centrum-warszawy/chmielna>, dostępne: 23.09.2025).

Projekt spotkał się z protestami mieszkańców ulicy oraz Stowarzyszenia Obronców Zabytków Warszawy. Największe wątpliwości wzbudził fakt, że na ulicy Chmielnej nigdy nie było drzew, a to zaburza cel zachowania jej zabytkowego charakteru oraz potencjalne przesłanianie fasad historycznych kamienic przez wysokie drzewa. Mimo listu wystosowanego do Mazowieckiego Wojewódzkiego Konserwatora Zabytków inwestycja powstała zgodnie z pierwotnym projektem (Glinianowicz, 2023; Polska Agencja Prasowa, 2023).

1.4. Metodyka badań

Tworzenie wizualizacji cienia w początkowej fazie projektowania może odbywać się tradycyjną metodą obserwacji podczas inspekcji terenowej, aby uzyskać wyobrażenie o zacienieniu danego obszaru. Jednak niemożliwe jest przeanalizowanie w ten sposób zmiennego nasłonecznienia o każdej godzinie każdego dnia w roku. W takich projektach technologie cyfrowe oferują szerokie możliwości różnych technik modelowania, określania i wizualizacji potencjalnego cienia rzucanego przez projektowany lub istniejący element zagospodarowania. Znacznie rzadziej stosowane są techniki modelowania 3D lub wizualizacji 3D. W zależności od używanego oprogramowania, rodzaju zastosowanego przetwarzania i obliczeń oraz wykorzystanych danych, cień może

być prezentowany w różny sposób. Wiele aplikacji oferuje jedynie wizualizację cienia, co daje tylko ogólne wyobrażenie o cieniu w danej godzinie. Efekty mogą być także wykorzystywane do wizualizacji w celach estetycznych, aby nadać wizualizacji bardziej realistyczny wygląd. Oprogramowania wykorzystywane do projektowania i przeprowadzenia złożonych analiz przestrzennych wykorzystują algorytmy do precyzyjnego wyznaczenia pozycji słońca i generowanego cienia o dowolnej porze roku. Mogą tworzyć cień w postaci wektorowej, która nadaje się do dalszego przetwarzania i analizy. Dane wektorowe reprezentują obszar jako figurę składającą się z punktów połączonych wierzchołkami. Najbardziej zaawansowanym podejściem jest tworzenie cieni w postaci brył 3D, które reprezentują ich objętość i pozwalają na obliczenie miejsc, w których rzucają cienie „przecinają się” z elementami otoczenia, w tym z budynkami.

Przeprowadzone analizy obejmowały:

- analizę możliwości modelowania 3D oraz wykorzystania oprogramowania GIS i ogólnodostępnych danych w analizach zacienienia;
- analizę porównawczą zacienienia ulicy w dniu równonocy i przesilenia letniego w wariantach: 1) w przypadku bez drzew, 2) ze szpalarami drzew wzdłuż całej długości ulicy;
- analizę zmienności nasłonecznienia ulicy w ciągu dnia w dniu równonocy i przesilenia letniego;
- analizę przesłaniania fasad budynków przez szpalery drzew w dwóch przypadkach wielkości drzew.

Dane wykorzystane do modelowania cieni zostały pozyskane z geoportalu krajowego geoportal.gov.pl. Pobrano trójwymiarowe modele LoD1 (Level of Detail 1) budynków oraz drzew opracowane przez Główny Urząd Geodezji i Kartografii. Modele drzew dostępne są do pobrania od 2024 roku, wykonane zostały dla drzew powyżej 4 m wysokości na podstawie danych pozyskanych z chmury punktów ALS (Airborne Laser Scanning). Modele są regularnymi, symetrycznymi, owalnymi bryłami w zgeneralizowany sposób reprezentującymi korony drzew oraz walcem reprezentującym pień. Wraz z modelami LoD 1 budynków umożliwiają uproszczone analizy uwarunkowań zacienienia wybranego obszaru miejskiego. W celu zoptymalizowania i przyspieszenia procesu obliczeniowego wykorzystywanych narzędzi warstwy wejściowe przycięto do kwartału zabudowy znajdującego się między ulicami: Marszałkowską, Żłotą, Kazimierza Brokła, Wojciecha Górskiego, Nowy Świat oraz Alejami Jerozolimskimi, który obejmuje wszystkie budynki mogące rzucać cień na analizowaną ulicę Chmielną.

W początkowym etapie badań przeprowadzono analizę możliwości wykonania własnych modeli 3D drzew w wykorzystywanym oprogramowaniu ArcGIS Pro oraz ogólnodostępnych danych pomiarowych ALS. Działaniem, którego nie można ominąć, jest odpowiednie przygotowanie danych wejściowych. Z chmury punktów wyizolowano punkty pomiarowe „zawieszane” na koronach wybranych drzew o wysokości 19 m i 23 m. Wyizolowane punkty dokładnie przejrano i usunięto te, które odstawały i mogłyby niekorzystnie wpłynąć na wynikowy kształt bryły. Narzędzie generujące bryły 3D w zakresie przestrzennym zamkniętym w chmurze punktów reprezentującym koronę drzewa — (*Minimum Bounding Volume*) tworzy bryły przy pomocy czterech różnych metod: Convex hull (najmniejszy wypukły obszar otaczający dane wejściowe), Concave hull (wklęsła bryła obejmująca zakres przestrzenny danych wejściowych), Sphere (sfery wokół danych wejściowych), Envelope (zakres współrzędnych XYZ danych wejściowych w postaci prostopadłościanu). Wyniki badania przeprowadzonego dla drzew różnej wielkości przedstawiono na Rysunku 2.

Bryła wypukła, Concave hull, jest nieznacznie bardziej zbliżona do rzeczywistego kształtu drzewa, jednakże w przypadku mniejszego drzewa nie różni się dużo od modelu otrzymanego z Convex hull. Rezultat Sphere jest najbardziej oryginalny i skomplikowany. Kłustry kul otaczających każdy z punktów chmury mogą przypominać kształtem poszczególne gałęzie drzewa, jednakże nie jest to wynik ani realistyczny, ani wystarczająco zgeneralizowany. Ostatnia metoda nie nadaje się do tworzenia modeli 3D drzew. Lepszym zastosowaniem może być dla niej modelowanie na przykład przyciętego żywopłotu.

Różna liczba punktów pomiarowych w opisanych przykładach nie miała dużego znaczenia w przypadku pierwszego i ostatniego modelu 3D. W modelach drugim i trzecim drzewa, otrzymanych z większej ilości punktów pomiarowych, widać większą szczegółowość, bryły te mają bardziej zawiłą geometrię. W analizach cienia drzewa modele otrzymane dzięki metodzie Concave hull lub Sphere mogą dać rezultaty bardziej zbliżone do rzeczywistego cienia rzucanego przez pojedyncze drzewo, jeśli charakteryzuje się ono nieregularnym kształtem. Jednakże, jeśli drzewo jest młode, ma regularny pokrój, wówczas użyta metoda nie ma większego znaczenia. Należy więc wybrać tę bryłę, która lepiej pasuje do celu analiz oraz wizualizacji wyników. W celu przeprowadzenia analiz zacienienia powodowanego przez rzędy młodych drzew, które mają zostać posadzone przy ulicy Chmielnej, użyto symetrycznych modeli o uogólnionym kształcie dostępnych na

geoportal.gov.pl, najbardziej zbliżonych do stworzonych modeli Convex hull.

Analizę porównawczą zacienienia ulicy przed i po rewitalizacji wykonano dla dwóch dni: dnia równonocy (23 września) oraz najdłuższego dnia w roku (21 czerwca). Bryły cieni wygenerowano dla każdej pełnej godziny od wschodu do zachodu słońca. Dla 23 września było to 12 godzin od 7:00 do 18:00, a dla 21 czerwca — 16 godzin od 05:00 do 20:00. Zdecydowano się nie analizować cieni podczas przesilenia zimowego ze względu na bardzo duże zacienienia ulicy spowodowane przez niskie położenie słońca na niebie. Podczas tak krótkich dni same budynki powodują na tyle duże zacienienie ulicy, że nowe drzewa nie spowodują dużej różnicy w nasłonecznieniu. Dodatkowo drzewa bez liści w zimie mają inny pokrój, więc modele drzew z pełnymi koronami nie byłyby adekwatne. Generując cienie posłużono się narzędziem Sun Shadow Volume. W parametrach narzędzia wprowadzono odpowiednią datę, godzinę początkującą oraz końcową, a także przedział czasowy (jedną godzinę).

Warstwy wynikowe przechowywały bryły cieni każdego budynku oraz informacje o dacie i godzinie. Dla wybranych dni wygenerowano cienie: 1) dla samych budynków, 2) dla budynków wraz z drzewami.

W celu wykonania analizy liczby godzin cienia na powierzchni ulicy i przedstawienia wyników w postaci map przekształcono bryły 3D cieni na rzuty 2D na powierzchnię ziemi i przycięto je do granic terenu ulicy. Suma cieni przypisana do siatki kwadratów, nałożonej na obszar opracowania, dała mapę rozmieszczenia liczby godzin zacienienia w danych dniu przypisanych do poszczególnych pikseli. Dane o powierzchni cieni w poszczególnych godzinach przedstawiono na wykresach, które umożliwiły dokładne porównanie powierzchni zacienienia przed i po zasadzeniu drzew na ulicy oraz analizę jego zmienności w ciągu dnia i w różnych porach roku.

Ze względu na protesty mieszkańców ulicy Chmielnej, którzy sprzeciwiali się zasadzeniu drzew, głównie ze względu na ograniczenie widoczności zabytkowych kamienic, dokonano porównania, jak na widoczność zabudowy mogą wpłynąć zasadzone (około siedmioterowe) szpalery drzew oraz jak mogłyby wpłynąć także mniejsze drzewa niż zaplanowane (około trzymetrowe).

2. WYNIKI

Wyniki przeprowadzonych analiz przedstawiono na mapach oraz na wykresach. Mapy ilustrujące liczbę godzin zacienienia umożliwiają identyfikację

obszarów ulicy o największym oraz najmniejszym stopniu zacienienia. Wykresy przedstawiają zmienność zacienienia w ciągu dnia oraz ilościowe porównanie stopnia zacienienia z nowymi drzewami i bez drzew. Umożliwiają także zidentyfikowanie odchyleń — godzin z wyjątkowo dużym nasłonecznieniem. Na mapie wizualizującej rozkład cieni rzucanych przez same budynki 23 września (Il. 3a) można zauważyć pewne charakterystyczne cechy tego układu przestrzennego. Najdłużej zacienionym obszarem (w przybliżeniu przez 12 z 12 godzin w ciągu dnia) jest podwórko po zachodniej stronie, które jest umiejscowione między budynkami otaczającymi je z trzech stron. Warto zauważyć, że w tym właśnie miejscu już istnieje kilka zasadzonych drzew, a projekt rewitalizacji ulicy przewiduje zasadzenie jeszcze większej ilości. Oznacza to, że posadzone w tym miejscu drzewa nie mają znaczenia dla większego zacienienia tego fragmentu ulicy. Na wykresie przedstawiającym powierzchnię cienia rzucanego na ulicę (Il. 3c) można od razu zauważyć wyróżniającą się godzinę 17:00. O tej porze w dniu 23 września słońce zlokalizowane jest na niebie w taki sposób, że jego promienie rzucają cienie równoległe do ciągu ulicy i nie natrafiają na prawie żadne przeszkody. Powierzchnia cienia jest wtedy równa około 60% powierzchni ulicy. Może wydawać się, że jest to i tak duże zacienienie, jednakże wynika to z cienia rzucanego na najszersze fragmenty ulicy: duży plac Bukinistów, plac przy Pasażu Wiecha i podwórko przed kinem Atlantic. Sam ciąg ulicy jest nasłoneczniony prawie w 100%. Po godzinie 17:00, kiedy słońce obniża się na nieboskłonie i zbliża się ku zachodowi powierzchnia cienia szybko wzrasta.

Na mapie godzin zacienienia z dnia 23 września, uwzględniającej wpływ budynków, istniejących drzew i nowych szpalerów drzew (Il. 3b) wyraźnie widoczny jest istotny wpływ obecności roślinności wysokiej. Prawie cała powierzchnia ulicy jest zacieniona przez około 12 godzin w ciągu dnia. Zakres ilości godzin zacienienia zmienił się z 7–12 na 8–12, a najbardziej nasłonecznionym obszarem jest wciąż skwer Bukinistów. Na wykresie powierzchni zacienienia (Il. 3c) widać, że od godziny 7:00 do 10:00 duże zacienienie całej ulicy nie zmienia się, następnie do godziny 13:00, kiedy słońce ma najwyższą pozycję na niebie, nasłonecznienie ulicy się zwiększa, żeby znowu maleć do godziny 16:00. Wciąż widać duże zmniejszenie powierzchni cienia o godzinie 17:00, kiedy promienie słońca padają równoległe z ciągiem ulicy, jednakże w tym przypadku natrafiają na przeszkody w postaci szpalerów drzew, które znacznie zmniejszają powierzchnię nasłonecznienia. Powierzchnia cienia o tej godzinie

zwiększyła się z 60% powierzchni ulicy do aż 89%. Świadczy to o tym, że drzewa w godzinie największego nasłonecznienia ulicy, kiedy słońce jest dość nisko na nieboskłonie, zwiększają jej zacienienie o prawie 30%. Należy też zaznaczyć, że analizowany jest cień na samej ziemi. Cienie rzucane są na ulicę pod kątem, a ich objętość, nawet w przypadku całkowitego zacienienia powierzchni ziemi w ciągu dnia, nie obejmuje całkowitej objętości ulicy (rozumianej jako przestrzeń wzdłuż ciągu budynków od ich podstawy do wysokości dachów). Biorąc pod uwagę także rozpraszanie promieni słonecznych należy podkreślić, że nawet podczas całkowitego zacienienia ulicy, wciąż dociera do niej rozproszone światło słoneczne i nie jest spowita w całkowitej ciemności.

Dzień 21 czerwca jest dłuższy od 23 września o 4 pełne godziny. Słońce w trakcie przesilenia letniego położone jest najwyżej nad horyzontem w ciągu roku, więc w tym czasie występują najkrótsze możliwe cienie. Na mapie (Il. 4a) widać, że nasłonecznienie ulicy jest większe niż 23 września. Najmniejsze zacienienie, równe tylko od 4 do 6 godzin w ciągu 16 godzin dnia, występuje w najszerszym fragmencie ulicy. Najciemniejsze wciąż pozostaje podwórko przed kinem Atlantic. Na wykresie powierzchni cienia (Il. 4c) widać nowe zjawisko: pojawienie się drugiej godziny z gwałtownie zmniejszoną powierzchnią cienia około godziny 7:00. Wynika to z faktu, iż słońce tego dnia położone jest równoległe do ciągu ulicy dwa razy w ciągu dnia. Najpierw, niedługo po wschodzie, promienie słońca padają w ten sposób na ulicę od strony wschodniej około godziny 7:00, a następnie bliżej zachodu słońca około godziny 16:00 od strony zachodniej. O godzinie 7:00 powierzchnia cienia równa jest 59%, jeszcze mniej niż o najjaśniejszej godzinie w dniu równonocy. O 16:00 cień pokrywa zaledwie 30% powierzchni ulicy, po czym w ciągu dwóch godzin szybko wzrasta do aż 92%.

Wizualizacja rozkładu liczby godzin zacienienia powodowanego przez budynki oraz drzewa na ulicy Chmielnej w dniu 21 czerwca (Il. 4b) jest najbardziej zróżnicowana wizualnie w porównaniu z pozostałymi wykonanymi mapami zacienienia. Wzdłuż górnej granicy terenu opracowania widać wyraźnie, gdzie znajduje się zacieniony szpaler drzew otoczony najbardziej nasłonecznionymi obszarami ulicy. Najmniejsza ilość godzin zacienienia zwiększyła się z 4 do 6, więc najbardziej nasłonecznione fragmenty ulicy są zacienione o co najmniej 2 godziny dłużej w ciągu dnia w porównaniu z ulicą bez szpalerów drzew. Fragment wschodni ulicy, podobnie jak w dniu równonocy, jest równomiernie zacieniony

przez około 15–16 godzin. Wykres powierzchni zacielenia (Il. 4c) jest wyraźnie bardziej jednostajny. O godzinie 7:00 zmniejszenie powierzchni cienia jest minimalne. W porównaniu z analizą dla ulicy bez drzew wyraźnie większe nasłonecznienie występuje między godziną 11:00 a 12:00 i zamiast dalej wzrastać, utrzymuje się na podobnym poziomie do godziny 16:00. Najmniejsza powierzchnia cienia na ulicy z drzewami o godzinie 16:00 wzrosła z 30% do aż 65%. Można więc stwierdzić, że drzewa w czasie największego nasłonecznienia w dniu przesilenia letniego powodują dwa razy większe zacielenie ulicy Chmielnej. Mogą więc w znaczący sposób obniżać temperaturę powietrza podczas najgorętszych godzin najdłuższego dnia w roku.

Analizę przesłaniania budynków ulicy Chmielnej przez posadzone drzewa wykonano przy użyciu narzędzi eksplorowania sceny 3D dostępnych w programie ArcGIS Pro. Dzięki narzędziu Viewshed zwiualizowano widoczne i niewidoczne płaszczyzny modelu 3D z drzewami i bez. Porównano widoczność frontów budynków bez roślinności wysokiej, z drzewami o wysokości około 7 m oraz wariant z niższymi drzewami o wysokości około 3 m, które mogłyby stanowić kompromis pomiędzy mieszkańcami ulicy, którzy nie życzyli sobie dużych drzew, a projektantami i miastem.

Na ilustracji 5 zauważyć można, że na ulicy bez drzew (bez uwzględnienia innych przeszkód, które mogą się znajdować na ulicy, takich jak szyldy reklamowe i parasole w ogródkach przy lokalach usługowych) widoczność elewacji zabudowy ulicy jest praktycznie całkowita. Na ilustracji 6 widać, że powierzchnia widocznej elewacji staje się znacznie mniejsza, kiedy budynki są zasłaniane przez wysokie modele drzew. Obszar niewidoczny na frontowej ścianie budynków w analizowanym widoku sięga wysokości 3 piętra (co odpowiada około 8 m). Należy jednak uwzględnić, że drzewa charakteryzują się częściową przepuszczalnością światła i widoczności. Korony drzew, mimo że ograniczają widoczność, nie stanowią bariery całkowicie nieprzepuszczalnej — występują w nich prześwity, przez które możliwa jest częściowa obserwacja obiektów znajdujących się za nimi. Wpływ drzew na widoczność jest również zmienny w ciągu roku. W okresie zimowym, kiedy drzewa pozbawione są liści, a ich korony składają się głównie z cienkich gałęzi, stopień przesłaniania widoku jest minimalny. Natomiast wiosną, wraz z pojawianiem się i rozwojem liści, poziom przesłaniania sukcesywnie wzrasta. Podobne zjawisko obserwuje się w przypadku cieni rzucanych przez drzewa — nie są one jednorodne, lecz wykazują prześwity w miejscach,

gdzie promienie słoneczne przenikają pomiędzy gałęziami i liśćmi.

Na ilustracji 7 przedstawiono wizualizację opracowanego wariantu niższych drzew o wysokości około 3 m. Analizy wykazały, że powierzchnia elewacji budynków przesłonięta przez niższe drzewa ogranicza się głównie do partii parterowych (około 4 m). Uwzględniając obecność innych elementów infrastruktury ulicznej, takich jak parasole przed lokalami usługowymi znajdującymi się w parterach ulicy, szyldy reklamowe i znaki drogowe można stwierdzić, iż nasadzenia drzew o niewielkiej wysokości nie wpłyną istotnie na ekspozycję elewacji zabytkowych kamienic ulicy Chmielnej. Propozycja wprowadzenia niskich, ozdobnych drzew byłaby rozwiązaniem kompromisowym, odpowiadającym zarówno potrzebom mieszkańców, jak i wymogom ochrony historycznego układu urbanistycznego ulicy, ingerując w nią w mniejszym stopniu niż zaplanowany projekt rewitalizacji zgodny z założeniami Nowego Centrum Warszawy.

3. WNIOSKI

Walory zieleni miejskiej oraz jej korzystny wpływ na otoczenie są wieloaspektowe i szeroko udokumentowane. W kontekście postępujących zmian klimatycznych szczególnego znaczenia nabiera rola zielonej infrastruktury w obniżaniu temperatury oraz kształtowaniu korzystnych warunków klimatu lokalnego. Aspekt ten to obecnie kluczowy, a być może nawet najistotniejszy, czynnik determinujący kierunki rozwoju terenów zieleni w środowisku miejskim. Ważnym wyzwaniem, z jakim muszą się mierzyć mieszkańcy i lokalne władze, jest miejska wyspa ciepła oraz zanieczyszczone powietrze. Oba te zjawiska są potęgowane przez funkcjonowanie systemów ciepłowniczych i rozbudowany system transportowy. W obu przypadkach efektywną pomocą służy zielona infrastruktura. Jej zdolności związane z oczyszczaniem powietrza, absorpcji szkodliwych pyłów, obniżaniem temperatury i podnoszeniem wilgotności powietrza przewyższają efektywność rozwiązań technologicznych, biorąc także pod uwagę długowieczność drzew i ich odporność na wszystkie warunki atmosferyczne.

W przedstawionych badaniach poruszono temat obniżania temperatury powietrza przez nowe nasadzenia i zbadano wpływ na otoczenie cienia, rzuconego przez wysoką roślinność. Cień ten znacząco obniża temperaturę nagranych powierzchni betonowych, tworząc korzystny mikroklimat i zapewniając komfortowe warunki termiczne w okresach wysokich temperatur.

Wyniki pokazują, w jaki sposób technologie GIS mogą mieć znaczące zastosowanie w procesie planowania krajobrazu miejskiego. Przeprowadzone analizy dowodzą ogromnych możliwości modelowania 3D. Gdy, tak jak w przypadku Polski, dysponujemy odpowiednimi modelami danych (drzewa, budynki) oraz narzędziami do modelowania założeń projektów miejskich, nic nie stoi na przeszkodzie, aby tworzyć liczne symulacje i w łatwy sposób generować dowolne scenariusze, między innymi, rewitalizacji. To sprawia, że wspomniane technologie odgrywają coraz większą rolę we wspieraniu procesu decyzyjnego w miastach. Pozwalają na trójwymiarowe modelowanie otoczenia planowanej inwestycji i badanie wpływu różnych scenariuszy zmian w przestrzeni, tak aby optymalnie dostosować wielkość, rodzaj i rozmieszczenie nowych elementów, w tym zieleni w mieście.

Dla prezentowanego projektu uzyskano lokalizacje najbardziej i najmniej zacienionych obszarów badanej przestrzeni. Uzyskano też szczegółową, ilościową ocenę zacienienia powierzchni ziemi oraz fasad budynków. Mapy zacienienia pozwoliły zidentyfikować obszary badanej ulicy, gdzie najwłaściwsze byłoby wprowadzenie nowych nasadzeń zieleni preferującej cień oraz takich gatunków, które rosłyby najlepiej w jej najbardziej nasłonecznionej części. Porównano zacienienie ulicy przed i po posadzeniu rzędów drzew w różnych porach roku, zarówno wizualnie, porównując mapy zacienienia, jak i ilościowo, mierząc obszar cienia w kolejnych godzinach. Zwizualizowano również, w jaki sposób wielkość drzew może wpływać na widoczność reprezentatywnych historycznych budynków przy ulicy oraz wskazano przesłaniane fragmenty elewacji.

W artykule przedstawiono wyniki analiz przeprowadzonych dla dwóch dni w roku: 21 czerwca i 23 września, tak by określić różnice w zacienieniu i nasłonecznieniu dla zmiennych warunków oświetlenia. Analizy takie można przeprowadzać również w innych, dowolnie wybranych momentach roku, a dobór analizowanych dat powinien wynikać zarówno ze zmiennego kąta padania promieni słonecznych, jak i kierunku (azymutu) osi badanej ulicy.

Uzyskane wyniki dla fragmentu ulicy Chmielnej wskazują, że nawet wysokie drzewa nie spowodują istotnego pogorszenia komfortu termicznego jesienią i zimą, ponieważ powodują znaczny wzrost zacienienia dopiero w późnych godzinach popołudniowych. Wpływ nowych nasadzeń natomiast znacznie polepszy komfort przebywania w tej przestrzeni latem, powodując wzrost zacienienia wczesnym popołudniem z 30–40% do 70% powierzchni badanego fragmentu ulicy.

Przygotowane w ten sposób wizualizacje 3D, mapy, wykresy i zestawienia są łatwe w odbiorze nie tylko dla specjalistów i urbanistów, ale także dla wszystkich uczestników procesu planistycznego i użytkowników przestrzeni miejskiej. Mogą wspierać konsultacje społeczne, ułatwiając komunikowanie wizji projektowych i osiąganie kompromisów, co jest szczególnie ważne w sytuacjach konfliktowych, jak miało to miejsce w przypadku opisywanego projektu ulicy Chmielnej.

Podsumowując, za pomocą narzędzi GIS można w istotny sposób zrozumieć uwarunkowania planowanej lub przekształcanej przestrzeni. Modelowanie i analizy przestrzenne wspierają tworzenie bardziej komfortowych miejsc publicznych, lepiej dostosowanych do zmian klimatu, znacząco poprawiając jakość życia w miastach.

REFERENCES

- Afshar, N.K. et al. (2018), 'Influence of planting designs on winter thermal comfort in an urban park', *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management*, 26(3), pp. 232–240. Available at: <http://dx.doi.org/10.3846/jeelm.2018.5374> (accessed: 23.09.2025).
- Andersson-Sköld, Y. et al. (2018), 'A Framework for Assessing Urban Greenery's Effects and Valuing Its Ecosystem Services', *Journal of Environmental Management*, 205, pp. 274–285. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.09.071> (accessed: 23.09.2025).
- Aram, F. et al. (2019), 'Urban Green Space Cooling Effect in Cities', *Heliyon*, 5(4), p. e01339. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e01339> (accessed: 23.09.2025).
- Azcarate, I. et al. (2021), 'Tree Layout Methodology for Shading Pedestrian Zones: Thermal Comfort Study in Bilbao (Northern Iberian Peninsula)', *Sustainable Cities and Society*, 72, p. 102996. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.102996> (accessed: 23.09.2025).
- Browning, M.H.E.M. et al. (2022), 'Where Greenspace Matters Most: A Systematic Review of Urbanicity, Greenspace, and Physical Health', *Landscape and Urban Planning*, 217, p. 104233. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2021.104233> (accessed: 23.09.2025).
- Carr, S. (1992), *Public Space*, Cambridge: Cambridge University Press.
- Chen, J. et al. (2024), 'Investigating the Efficacy of a Fast Urban Climate Model for Spatial Planning of Green and Blue Spaces for Heat Mitigation', *Science of The Total Environment*, 955, p. 176925. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.176925> (accessed: 23.09.2025).
- Chmielna. Available at: <https://um.warszawa.pl/waw/nowe-centrum-warszawy/chmielna> (accessed: 29.03.2025).
- Cielecka, A. (1986), 'Zieleń w Miastach', *Acta Universitatis Lodzensis. Folia Oeconomica*, (58), pp. 103–120.

- Cimburova, Z., Blumentrath, S., Barton, D.N. (2023), 'Making Trees Visible: A GIS Method and Tool for Modelling Visibility in the Valuation of Urban Trees', *Urban Forestry & Urban Greening*, 81, p. 127839. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2023.127839> (accessed: 23.09.2025).
- Czekajlo, A. et al. (2023), 'Impact of 2050 Tree Shading Strategies on Building Cooling Demands', *Buildings & Cities*, 4(1). Available at: <http://dx.doi.org/10.5334/bc.353> (accessed: 23.09.2025).
- Dennis, M. et al. (2020), 'Relationships between Health Outcomes in Older Populations and Urban Green Infrastructure Size, Quality and Proximity', *BMC Public Health*, 20(1), pp. 1–15. Available at: <https://bmcpublihealth.biomedcentral.com/articles/10.1186/s12889-020-08762-x> (accessed: 23.09.2025).
- Dzhambov, A., Dimitrova, D. (2014), 'Urban Green Spaces Effectiveness as a Psychological Buffer for the Negative Health Impact of Noise Pollution: A Systematic Review', *Noise and Health*, 16(70), pp. 157–165. Available at: <http://dx.doi.org/10.4103/1463-1741.134916> (accessed: 23.09.2025).
- Fernández, C.T., Navarro, I.M. (2024), 'Analysis of the Impact of Urban Green Spaces on Mitigating the Urban Heat Island Effect', *Innovation in Science and Technology*, 3(3), pp. 11–20. Available at: <http://dx.doi.org/10.56397/IST.2024.05.02> (accessed: 23.09.2025).
- Glinianowicz, A. (2023), *Przebudowa ulicy Chmielnej pod lupą aktywistów. Obrońcy zabytków nie chcą sadzenia drzew na tej arterii*, Warszawa Nasze Miasto. Available at: <https://warszawa.naszemiasto.pl/przebudowa-ulicy-chmielnej-pod-lupa-aktywistow-obroncy/ar/c1-9164717> (accessed: 29.03.2025).
- Gov.pl. Narodowy Fundusz Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej: *Ponad 36 mln zł na zazielenianie sześciu polskich miast*. Available at: <https://www.gov.pl/web/nfosigw/ponad-36-mln-zl-na-zazielenianie-szesciu-polskich-miast> (accessed: 29.03.2025).
- Gunawardena, K.R., Wells, M.J., Kershaw, T. (2017), 'Utilising Green and Bluespace to Mitigate Urban Heat Island Intensity', *Science of The Total Environment*, 584–585, pp. 1040–1055. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.01.158> (accessed: 23.09.2025).
- Han, S. et al. (2022), 'Behaviour in Public Open Spaces: A Systematic Review of Studies with Quantitative Research Methods', *Building and Environment*, 223, p. 109444. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109444> (accessed: 23.09.2025).
- Hongbing, W. et al. (2010), 'Optimal Tree Design for Daylighting in Residential Buildings', *Building and Environment*, 45(12), pp. 2594–2606. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.05.019> (accessed: 23.09.2025).
- Humpel, N., Owen, N., Leslie, E. (2002), 'Environmental Factors Associated with Adults' Participation in Physical Activity: A Review', *American Journal of Preventive Medicine*, 22(3), pp. 188–199. Available at: [https://doi.org/10.1016/S0749-3797\(01\)00426-3](https://doi.org/10.1016/S0749-3797(01)00426-3) (accessed: 23.09.2025).
- Hwang, R.-L., Lin, T.-P., Matzarakis, A. (2011), 'Seasonal Effects of Urban Street Shading on Long-Term Outdoor Thermal Comfort', *Building and Environment*, 46(4), pp. 863–870. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.10.017> (accessed: 23.09.2025).
- Jakość życia a procesy zarządzania rozwojem i funkcjonowaniem organizacji publicznych* (2010), Noworól, A. et al. (eds.), 2. Kraków: Instytut Spraw Publicznych Uniwersytetu Jagiellońskiego.
- Janiak, J. (2021), *Architektura zintegrowana z zielenią. Szpalery drzew liściastych jako ochrona przeciwsłoneczna budynków*, doctoral dissertation, p. 197.
- Karendys, E. (2024a), *Drzewa pod lepszą ochroną. Gdańska Karta dla Drzew*. Available at: <https://www.architekturaibiznes.pl/drzewa-pod-lepsza-ochrona.-gdanska-karta-dla-drzew,36611.html> (accessed: 29.05.2025).
- Karendys, E. (2024b), *Zieleń musi być priorytetem. Powstaje Gdańska Karta dla Drzew*. Available at: <https://www.architekturaibiznes.pl/zielen-musi-byc-priorytetem.-powstaje-gdanska-karta-dla-drzew,32968.html> (accessed: 29.03.2025).
- Kędzierski, M. (2019), 'Poczucie bezpieczeństwa w parkach miejskich. Przykład badań jakościowych przeprowadzonych wśród mieszkańców Krakowa', *Annales Universitatis Paedagogicae Cracoviensis Studia Geographica*, 13, pp. 178–189. Available at: <http://dx.doi.org/10.24917/20845456.13.13> (accessed: 23.09.2025).
- Kou, R., Yang, S., Shi, Z. (2025), 'Visibility Analysis of 3D Urban Space Navigation Satellites Based on Virtual Panoramic Obstruction Images', *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 18, pp. 8312–8324. Available at: <http://dx.doi.org/10.1109/JSTARS.2025.3550341> (available at: 23.09.2025).
- Li, H. et al. (2024), 'Nature Connectedness Connects the Visibility of Trees through Windows and Mental Wellbeing: A Study on the "3 Visible Trees" Component of the 3-30-300 Rule', *International Journal of Environmental Health Research*, 34(11), pp. 3919–3931. Available at: <http://dx.doi.org/10.1080/09603123.2024.2334767> (accessed: 23.05.2025).
- Li, X., Zhang, C., Li, W. (2015), 'Does the Visibility of Greenery Increase Perceived Safety in Urban Areas? Evidence from the Place Pulse 1.0 Dataset', *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 4(3), pp. 1166–1183. Available at: <http://dx.doi.org/10.3390/ijgi4031166> (accessed: 23.09.2025).
- Lis, A., Pardela, Ł., Iwankowski, P. (2019), 'Impact of Vegetation on Perceived Safety and Preference in City Parks', *Sustainability*, 11(22), p. 6324. Available at: <http://dx.doi.org/10.3390/su11226324> (accessed: 23.09.2025).
- Lopez-Haro, J. et al. (2024), 'Association between Active Use of Urban Green Spaces and Well-Being in Adults Aged 18–65 Years: A Systematic Review', *Journal of Health and Pollution*, 12(1–4), p. 016002. Available at: <http://dx.doi.org/10.1289/JHP1040> (accessed: 23.09.2025).
- Małyżek, A. (2021), 'Criteria of Livable Public Spaces Quality. Case Study Analysis on the Example of Selected Public Spaces Lublin, Poland', *Teka Komisji Architektury, Urbanistyki i Studiów Krajobrazowych*, 17(2), pp. 55–75. Available at: <http://dx.doi.org/10.35784/teka.2785> (accessed: 23.09.2025).

- Metropolie Wobec Wyzwań i Problemów Społecznych* (2021), Mędrzycki, R. (ed.), Gdańsk: Instytut Metropolitarny.
- Middel, A. et al. (2016), 'Impact of Shade on Outdoor Thermal Comfort—a Seasonal Field Study in Tempe, Arizona', *International Journal of Biometeorology*, 60(12), pp. 1849–1861. Available at: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00484-016-1172-5> (accessed: 23.09.2025).
- Mohajerani, A., Bakaric, J., Jeffrey-Bailey, T. (2017), 'The Urban Heat Island Effect, Its Causes, and Mitigation, with Reference to the Thermal Properties of Asphalt Concrete', *Journal of Environmental Management*, 197, pp. 522–538. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.03.095> (accessed: 23.09.2025).
- Park, Y., Guldmann, J.-M., and Liu, D. (2021), 'Impacts of Tree and Building Shades on the Urban Heat Island: Combining Remote Sensing, 3D Digital City and Spatial Regression Approaches', *Computers, Environment and Urban Systems*, 88, p. 101655. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2021.101655> (accessed: 23.09.2025).
- Pauleit, S., Duhme, F. (2000), 'GIS Assessment of Munich's Urban Forest Structure for Urban Planning', *Arboriculture & Urban Forestry*, 26(3), pp. 133–141. Available at: <http://dx.doi.org/10.48044/jauf.2000.016> (accessed: 23.09.2025).
- Polska Agencja Prasowa: *Obrońcy zabytków protestują przeciwko sadzeniu drzew na Chmielnej w Warszawie*. Available at: <https://www.pap.pl/aktualnosci/news%2C1519843%-2Cobroncy-zabytkow-protestuja-przeciwko-sadzeniu-drzew-na-chmielnej-w> (accessed: 29.03.2025).
- Ruzickova, K., Ruzicka, J., Bitta, J. (2021), 'A New GIS-Compatible Methodology for Visibility Analysis in Digital Surface Models of Earth Sites', *Geoscience Frontiers*, 12(4), p. 101109. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2020.11.006> (accessed: 23.09.2025).
- Saaroni, H. et al. (2018), 'Urban Green Infrastructure as a Tool for Urban Heat Mitigation: Survey of Research Methodologies and Findings across Different Climatic Regions', *Urban Climate*, 24, pp. 94–110. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2018.02.001> (accessed: 23.09.2025).
- Szczepanowska, H.B. (2015), 'Drzewa w mieście – zielony kapitał wartości i usług ekosystemowych', *Człowiek i Środowisko*, 39(2), pp. 5–28.
- Trees for Life: Making Our Cities Greener Can Cut Early Deaths by a Third* (2023), World Economic Forum. Available at: <https://www.weforum.org/stories/2023/02/urban-trees-reduce-heat-deaths/> (accessed: 30.03.2025).
- Ustawa z dnia 27 marca 2003 r. o planowaniu i zagospodarowaniu przestrzennym (Dz.U. 2003 nr 80 poz. 717). Available at: <https://isap.sejm.gov.pl/isap.nsf/DocDetails.xsp?id=wdu20030800717> (accessed: 20.03.2025).
- Ustawa z dnia 9 października 2015 r. o rewitalizacji (Dz.U. 2015 poz. 1777). Available at: <https://isap.sejm.gov.pl/isap.nsf/DocDetails.xsp?id=wdu20150001777> (accessed: 20.03.2025).
- Wang, W. et al. (2023), 'Branching the Limits: Robust 3D Tree Reconstruction from Incomplete Laser Point Clouds', *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 125, p. 103557. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jag.2023.103557> (accessed: 23.09.2025).
- Wickramathilaka, N. et al. (2022), 'Influence of Urban Green Spaces on Road Traffic Noise Levels: A Review', *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLVIII-4/W3-2022, pp. 195–201. Available at: <http://dx.doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-4-W3-2022-195-2022> (accessed: 23.09.2025).
- World Meteorological Organization. *WMO Confirms 2024 as Warmest Year on Record at about 1.55°C above Pre-Industrial Level* (2025). Available at: <https://wmo.int/news/media-centre/wmo-confirms-2024-warmest-year-record-about-155degc-above-pre-industrial-level> (accessed: 30.03.2025).
- Wozniak, M., Radzinski, A., Wajchman-Świtalska, S. (2025), 'Is More Always Better? Evaluating Accessibility to Parks and Forests in 33 European Cities Using Sustainable Modes of Transportation', *Urban Forestry & Urban Greening*, 104, p. 128656. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2024.128656> (accessed: 23.09.2025).
- Zarządzenie Nr 279/25 Prezydenta Miasta Gdańska z dnia 14 lutego 2025 r. w sprawie wprowadzenia 'Gdańskiej Karty Dla Drzew'. Available at: https://baw.bip.gdansk.pl/UrządMiejskiwGdanskudokument/562094/Zarządzenie-279_25 (accessed: 29.03.2025).
- Zwierzchowska, I., Mizgajski, A. (2019), 'Potencjał zielonej infrastruktury w dużych polskich miastach do świadczenia usług ekosystemowych', *Rozwój Regionalny i Polityka Regionalna*, (47), pp. 21–36. Available at: <http://dx.doi.org/10.14746/rrpr.2019.47.03> (accessed: 23.09.2025).