

Komunikat naukowy

**Wykorzystanie analiz przestrzennych 3D
do oceny efektywności instalacji paneli fotowoltaicznych
na przystankach komunikacji miejskiej**

The use of 3D spatial analyses to assess the effectiveness
of the installation of photovoltaic panels on the shelters
of public transport stops

Kamila Waksmundzka, Anna Fijałkowska, Jerzy Chmiel

Politechnika Warszawska, Wydział Geodezji i Kartografii

Abstract

This communication presents the results of the research project, the aim of which was a methodology proposal for assessing the efficiency of photovoltaic installations, taking into account the impact of shading the roofs of bus shelters, on which photovoltaic panels can be installed. This methodology assumes the 3D modelling of selected city space objects and the use of three-dimensional spatial analysis algorithms to estimate the real amount of solar energy reaching the tested area during the day, for selected, characteristic days of the year. The obtained results are promising, and the proposed methodology can be successfully used by city decision-makers to support investment decisions in the studied area.

Słowa kluczowe: panele fotowoltaiczne, zarządzanie miastem, trójwymiarowe analizy przestrzenne, analizy zacielenia, smart city

Keywords: photovoltaic panels, city management, three-dimensional spatial analysis, shading analysis, smart city

Wstęp

Ciągle zwiększające się zużycie energii elektrycznej powoduje poszukiwanie, alternatywnych do paliw kopalnych, źródeł jej pozyskiwania. Szkody, jakie powodują produkty spalania paliw konwencjonalnych są obecnie największym zagrożeniem dla środowiska i prowadzą do pogłębienia się efektu cieplarnianego, powiększenia się stref występowania wysokiego zanieczyszczenia powietrza i zmian klimatycznych powodujących nieodwracalne zmiany planety (Maziarz & Harasim, 2014). W grudniu 2019 roku Unia Europejska osiągnęła porozumienie dotyczące neutralności klimatycznej do 2050 roku. Nowa wizja rozwoju Unii obejmuje działania związane z redukcją CO₂ oraz ze zmianami w transporcie, przemyśle, redukcją emisji z budynków, produkcji żywności oraz ograniczeniem utraty bioróżnorodności. Celem inicjatywy jest redukcja emisji gazów cieplarnianych do 50% (BBC, 2019). Paliwa naturalne, które są praktycznie na wyczerpaniu, powinno się stopniowo eliminować i zastępować niekonwencjonalnymi źródłami energii. Nie tylko może to pomóc w poprawie stanu środowiska, ale także pozwoli zmniejszyć obawy przed wyczerpaniem się podstawowych źródeł energii, których żywotność szacuje się w niektórych przypadkach na 50-150 lat (Meadows, et al., 2004). Energia słoneczna powoli staje się ważnym paliwem i jest coraz częściej wykorzystywanym źródłem energii odnawialnej w Polsce.

Rozwój systemów fotowoltaicznych

Fotowoltaika (PV) stwarza ogromne możliwości dla rozwoju nowych technologii, w tym tworzenie nowych, unikalnych produktów, takich jak moduły zintegrowane z budownictwem, fotowoltaiczne fasady czy fotowoltaiczne szyby zespolone, które nie tylko podnoszą efektywność energetyczną, ale mogą być również dostosowane do różnych form architektonicznych. Przykładem budowli, w której wykorzystano moduły PV jest Aula Pawła VI w Watykanie, w której odbywają się audiencje generalne i inne wydarzenia (Pagliaro, et al., 2010). Przykładem budynku, w którym wykorzystano szereg zaawansowanych technologicznie rozwiązań jest wieżowiec Q22 znajdujący się w Warszawie. W tym przypadku ogniwa fotowoltaiczne zintegrowano z fasadą, co z jednej strony ograniczy nagrzewanie i będzie stanowiło element zacieniający, a z drugiej, będzie źródłem ciepła, co pozwoli na samoistne podgrzewanie zimą i odsnieżanie modułów (Głuchowski, 2016). Duży potencjał, jaki płynie z pozyskiwania energii słonecznej, zachęca do odkrywania nowych, innowacyjnych rozwiązań. Rozwiązania fotowoltaiczne rozpowszechnione są również w obszarze transportu miejskiego. Tym, który zyskał wiele

uwagi jest wykorzystanie przystanków komunikacji miejskiej zasilanych energią słoneczną. Pomysł ten zakłada instalację paneli fotowoltaicznych na wiacie przystanku w celu pozyskiwania energii w trakcie dnia. Następnie możliwe jest wygenerowanie energii do podświetlania tablic informacyjnych oraz rozkładów jazdy wieczorami i w nocy. Jedną z pierwszych takich instalacji powstała w Coronie, w stanie Kalifornia. Dla miasta Corona słoneczny przystanek w lecie praktycznie niweluje koszty związane z zasilaniem skrzyżowania dróg (Wesoff, 2011). Przykładem takiego rozwiązania w Polsce są fotowoltaiczne wiaty przystankowe zaprojektowane przez firmę ML System (ML System, 2018), które funkcjonują w Polsce (w Rzeszowie i Stalowej Woli) i mają za zadanie poprawę funkcjonowania miast i życia mieszkańców. Wiaty zasilane są energią fotowoltaiczną, która powstaje dzięki umieszczonym na dachu lub zastępującym ściany wiaty panelom fotowoltaicznym. Aby osiągnąć maksymalne korzyści z eksploatacji paneli, niezbędnym jest dokładne opracowanie modeli i zapewnienie wiarygodnych wyników – oszacowanie efektywności takich modeli i możliwie dokładna ocena dostarczonej energii.

Cel projektu, metodyka i dane źródłowe

Celem prezentowanych badań była ocena efektywności umiejscowienia paneli fotowoltaicznych na przystankach komunikacji miejskiej na przykładzie wybranych przystanków położonych na terenie miasta stołecznego Warszawy. Lokalizacja wiat przystankowych pośród wysokiej zabudowy śródmiejskiej niesie za sobą istotne ryzyko zacienienia. Dlatego podjęto się sprawdzenia na ile cień rzucany przez istniejącą zabudowę redukuje sprawność ewentualnych instalacji.

Podczas wykonywania analiz skorzystano z danych wysokościowych LiDAR, danych historycznych promieniowania słonecznego dla dat równonocy wiosennej i jesiennej, danych BDOT10k, Open Street Map, a także z modeli budynków 3D (o szczególności na poziomie LoD2) dostępnych w Geoportalu Krajowym. Wiaty przystankowe zostały zamodelowane w postaci 3D z wykorzystaniem danych BDOT10k i OSM z uwzględnieniem danych o kubaturach tych obiektów (Stowarzyszenie Integracji Stołecznej Komunikacji, 2007). Zestaw danych zawierających budynki 3D cechuje się aktualnością na rok 2012. Od tego czasu, ze względu na dynamicznie zmieniający się krajobraz miasta, powstało wiele nowych budynków biurowych i apartamentowców, a niektóre inwestycje są dopiero w planach lub w trakcie budowy. Ponieważ planowanych inwestycji nie uwzględnia jeszcze żadna baza danych przestrzennych, do celów analizy zaktualizowano pozyskaną bazę danych o budynkach o bryły wybudowanych po roku 2012, będących w trakcie budowy oraz planowanych wieżowców, aby możliwie jak najdokładniej ocenić stan zacienienia również w przyszłości. Do przeprowadzenia testów zaproponowanej metodyki wybrano 2 obszary badawcze – okolice Ronda ONZ

(<http://ukosne.um.warszawa.pl/?z=18&x=2337587.047224441&y=6842459.920396311&d=N>) oraz Dworca Centralnego w Warszawie (<http://ukosne.um.warszawa.pl/?z=18&x=2338003.270730025&y=6841458.714736764&d=N>).

Ważnym parametrem opracowanej metodyki było określenie odpowiedniej rozdzielczości przestrzennej wykorzystywanego w analizach NMT wykorzystanego do reprezentacji wiat przystankowych. Przetestowano różne warianty wartości tego parametru. Im większa rozdzielczość rastra, tym bardziej szczegółowa reprezentacja rzeczywistego kształtu modelowanego terenu. Należy zwrócić uwagę na fakt, że im bardziej zaawansowane przetworzenia są wykonywane, tym jest to bardziej czasochłonne. Stąd bardzo istotne jest określenie wpływu różnych rozdzielczości na dokładność przetworzeń (Alm, et al., 2016). W przeanalizowanych artykułach zaleca się przeprowadzanie tego rodzaju analiz w postaci rastrowej o rozdzielczości przestrzennej 1m (Catita, et al., 2014; Redweik, et al., 2013), 1,5m (Fath, et al., 2014) lub 2m (Carl, 2014). Bazując na przytoczonych opracowaniach oraz biorąc pod uwagę wielkość obszaru i powierzchnię dachu wiaty przystankowej, podczas analiz rozważono następujące rozdzielczości: 0,5 m, 0,25 m, 0,20 m, 0,15 m, 0,1 m i 0,05 m. Istotnym etapem wykonywanych przetworzeń były trójwymiarowe analizy zacienienia. Pozwoliły one ocenić wpływ zacienienia budynków na analizowane wiaty przystankowe. Celem, do którego dążono, było uzyskanie wyniku w postaci poligonów odzwierciedlających nasłonecznione i zacienione fragmenty przystanków w różnych porach dnia z interwałem 15-to minutowym. Cienie wygenerowano dla dwóch dni w roku: 22 czerwca oraz 22 grudnia od wschodu do zachodu Słońca.

Analiza uzyskanych wyników

Analizując potencjał słoneczny dla wiaty przystankowej przy Rondzie ONZ w czerwcu można zauważyć, że wartości powyżej zera zarejestrowane zostały w godzinach pomiędzy 4:45 a 19:00. Najwyższe wartości wystąpiły dla godzin 11:45 – 12:00 oraz 12:00 – 12:15, dostarczając w sumie ponad 3,8 kWh. Największe procentowe zacienienie dachu wiaty zauważa się po wschodzie i przed zachodem Słońca w godzinach od 7:00 do 10:00 oraz 17:30 do 21:15. W ciągu dnia zaobserwowano niewielkie zacienienie lub jego brak. Zakładając, że w okolicy Ronda ONZ nie byłoby żadnych budynków ani innych obiektów, suma teoretycznego potencjału słonecznego dla dachu wybranej wiaty w czerwcu wynosiłaby około 61,0 kWh. Po uwzględnieniu zacienienia przez budynki wynosi ona w przybliżeniu 46,6 kWh.

Dla dachu wiaty przy Dworcu Centralnym w czerwcu potencjał słoneczny powyżej zera zarejestrowano, podobnie jak przy Rondzie ONZ, w godzinach pomiędzy 4:45 a 19:00. Najwyższe wartości zanotowano również w godzinach między 11:45 a 12:15. Ze względu na różnice w powierzchni między przystankami przy Rondzie ONZ i Dworcu Centralnym, zauważalne są również różnice w maksymalnych wartościach. Przy Dworcu Centralnym wartość ta jest niższa i wynosi łącznie 3,1 kWh. Analizując procentowe zacienienie dachu wiaty można zauważyć, że największe jest ono między godziną 8:00 a 9:00 oraz wieczorem, przed zachodem Słońca w godzinach 19:00 – 20:15, w ciągu dnia natomiast nie występuje. Suma potencjału słonecznego w czerwcu dla dachu wiaty przy Dworcu Centralnym – przy założeniu braku zacienienia – wynosiłaby około 49,8 kWh, a uwzględniając zacienienie około 44,1 kWh. Strata w wyniku zacieniania jest więc znacznie mniejsza niż dla badanego przystanku zlokalizowanego na rondzie ONZ.

W grudniu najwyższe wartości potencjału słonecznego dla dachu wiaty przystankowej przy Rondzie ONZ zarejestrowano między godziną 10:00 a 11:00. O godzinie 10:30 – 10:45 suma potencjału wyniosła 0,4 kWh, a więc prawie 5 razy mniej niż w czerwcu o godzinie 12:00 – 12:15, kiedy wartość ta była najwyższa. Ze względu na fakt, że zimą promieniowanie dociera do powierzchni jedynie między godzinami 7:45 a 13:30, suma potencjału słonecznego dla dachu wynosi w przybliżeniu 5,4 kWh i jest ponad 11 razy niższa niż w czerwcu. Zacienienie wiaty jest wysokie przez większą część dnia (zakładając, że dzień zaczyna się o wschodzie i kończy o zachodzie Słońca). Suma potencjału słonecznego w grudniu dla wiaty przy Rondzie ONZ po uwzględnieniu zacienienia wynosi 2,33 kWh. Wyniki otrzymane dla wiaty zlokalizowanej przy Dworcu Centralnym w grudniu przypominają wynik dla wiaty przy Rondzie ONZ, a suma wartości przy założeniu braku zacienienia wynosi 4,4 kWh. Strata w wyniku zacienienia jest największa po wschodzie Słońca do godziny 10:00 oraz od 13:00 do zachodu Słońca. Przystanek ten może otrzymywać energię jedynie przez 3 godziny w ciągu dnia. Uwzględniając padające cienie suma potencjału słonecznego wyniosła w przybliżeniu 2,8 kWh.

Podsumowanie i wnioski

Wykorzystując otrzymane wyniki potencjału słonecznego oraz powierzchnię zacienienia przystanków możliwe było obliczenie efektywności paneli fotowoltaicznych. Suma energii z uwzględnieniem padających cieni względem potencjału jest najwyższa w czerwcu dla przystanku przy Dworcu Centralnym i wynosi 89% wartości teoretycznej. Dla przystanku przy Rondzie ONZ w tym samym dniu wynosi ona 77%. W grudniu dla obu lokalizacji efektywność jest niższa – dla wiaty przy Dworcu Centralnym jest równa 66%, natomiast dla wiaty przy Rondzie ONZ 43%.

Ocena potencjału słonecznego jest istotną kwestią podczas planowania rozmieszczenia paneli fotowoltaicznych, które stają się coraz bardziej popularnym źródłem energii na polskim rynku. Zaproponowana metodyka może być cennym dodatkiem do istniejących już rozwiązań w zakresie odpowiedniego planowania mocy instalacji i lokalizacji poszczególnych paneli. W przyszłości można rozważyć dodanie do warstwy trójwymiarowej innych obiektów wystających ponad powierzchnię gruntu. Uwzględnienie w badaniach wysokiej roślinności, plakatów reklamowych, a także wiaduktów i kładek nad ulicami może mieć również znaczący wpływ na wyniki, gdyż obiekty te mogą one odgrywać istotną rolę w kwestii zacielenia wiat przystankowych. Ze względu na skrajne wyniki dla dwóch wybranych dni w roku ciekawą kontynuacją badań byłoby znalezienie dni granicznych, w których instalacja paneli zaczyna (wiosną) oraz przestaje (jesienią) być rentowna. Tego rodzaju symulacje, uwzględniające również inne obiekty zacieleniające, pozwolą na optymalny wybór lokalizacji oraz typu wykorzystywanych paneli fotowoltaicznych. Zaproponowana metodyka mogła by być również udostępniona nie tylko decydom w miastach lub zarządzającym infrastrukturą transportową, ale również użytkownikom indywidualnym w formie aplikacji, w której mogliby wczytać lub zaprojektować budynek 3D, obliczyć potencjał słoneczny oraz zacielenie w wybranej lokalizacji, co pomogłoby przewidzieć miejsca, gdzie efektywność instalacji paneli byłaby największa. Wydaje się, że warto przeprowadzić tego rodzaju analizy na etapie planowanej inwestycji (np. wiaty przystankowej, domu jednorodzinnego lub innych obiektów małej i większej architektury), tak by planując instalacje fotowoltaiczne zoptymalizować kształt i położenie dachu lub innego elementu, na którym planuje się instalacje paneli, by ich efektywność była jak największa.

Literatura (References)

- Alm, N., Coors, V. i Oosterom, P. J. M., 2016. Solution in Photovoltaic Potential Computation. *Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 7-9 9, pp. 89-98,
- BBC, 2019. EU carbon neutrality: Leaders agree 2050 target without Poland. [Online] Available at: <https://www.bbc.com/news/world-europe-50778001> [Dostęp: 09. 2020],
- Carl, C., 2014. Calculating Solar Photovoltaic Potential On Residential. University of Southern California: Geographic Information Science and Technology,
- Catita, C., Redweik, P., Pereira, J. i Brito, M., 2014. Extending solar potential analysis in buildings to vertical facades. *Computers & Geosciences*, pp. 1-12,
- Fath, K. i inni, 2014. A method for predicting the economic potential of (building-integrated) photovoltaics in urban areas based on hourly Radiance simulations. *Solar Energy*, pp. 357-370,
- Głuchowski, M., 2016. Panele fotowoltaiczne BIPV pokryją szklany dach warszawskiego wieżowca Q22. [Online] Available at: <http://odnawialneźródłaenergii.pl> [Dostęp: 03.2021].

- Maziarz, P. i Harasim, E., 2014. Wpływ konwencjonalnych i niekonwencjonalnych źródeł energii na środowisko naturalne. *Економічні інновації*, Issue 58, pp. 192-198,
- Meadows, D. H., Meadows, D. L., Randers, J. i Behrens, W. W., 2004. *The Limits to Growth: The 30-Year Update*, Chelsea Green Publishing Company,
- ML System, 2018. Inteligentne wiaty przystankowe (fotowoltaiczne). [Online] Available at: <http://mlsystem.pl/inteligentna-wiata-przystankowa/> [Dostęp: 09.2020],
- Pagliaro, M., Criminna, R. i Palmisano, G., 2010. BIPV: merging the photovoltaic with the construction industry. *Progress in photovoltaics: research and applications*, pp. 61-72,
- Redweik, P., Catita, C., Pereira, J. i Brito, M., 2013. Solar energy potential on roofs and facades in an urban landscape. *Solar Energy*, pp. 332-341,
- Stowarzyszenie Integracji Stołecznej Komunikacji, 2007. Przystanek komunikacji miejskiej. [Online] Available at: <http://www.siskom.waw.pl/przestrzen-przystanki.htm> [Dostęp: 12.2020],
- Wesoff, E., 2011. Solar Bus Shelters From GoGreenSolar. [Online] Available at: <https://www.greentechmedia.com/articles/read/solar-bus-shelters-from-gogreensolar#gs.1QTZkO51> [Dostęp: 01.2021].

Streszczenie

Niniejszy komunikat prezentuje wyniki projektu, którego celem było zaproponowanie metodyki oceny efektywności instalacji fotowoltaicznych z uwzględnieniem wpływu zacieniania dachów wiat przystankowych, na których mogą być instalowane panele fotowoltaiczne. Metodyka ta zakłada zamodelowanie wybranych obiektów przestrzeni miasta w postaci trójwymiarowej oraz wykorzystanie algorytmów trójwymiarowych analiz przestrzennych dla przeprowadzenia szacowania realnej ilości energii słonecznej docierającej do badanej powierzchni w ciągu dnia, dla wybranych, charakterystycznych dni roku. Uzyskane wyniki są obiecujące, a zaproponowana metodyka może być z powodzeniem wykorzystane przez decydentów miejskich, do wspomagania podejmowania decyzji inwestycyjnych w badanym zakresie.

Dane autorów / Authors details:

mgr inż. Kamila Waksmundzka

ORCID 0000-0001-8021-0128

k.waksmundzka94@gmail.com

dr inż. Anna Fijałkowska
ORCID 0000-0002-0567-9863
anna.fijalkowska@pw.edu.pl

dr hab. inż. Jerzy Chmiel
ORCID 0000-0003-4656-4904
jerzy.chmiel@pw.edu.pl

Przesłano / Received	20.10.2021
Zaakceptowano / Accepted	22.11.2021
Opublikowano / Published	30.12.2021



© Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).