

Analiza potencjału ekspozycji słonecznej dachów o zróżnicowanej konstrukcji z uwzględnieniem zacinienia na przykładzie wybranych obiektów budowlanych z terenu miasta Nowy Sącz

Analysis of solar exposure potential of different roof types
with consideration of overshadowing, on the example
of selected buildings located in the city of Nowy Sącz

Artur Krawczyk¹, Maria Zawisza², Marta Zygmunt², Anna Żądło², Marcin Zajac³

¹AGH Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, Wydział Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska,
Katedra Ochrony Terenów Górniczych, Geoinformatyki i Geodezji Górniczej

²AGH Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, Wydział Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska,
Kierunek Geodezja i Kartografia

³Uniwersytet Jagielloński, Wydział Geografii i Geologii, Kierunek Geografia

Słowa kluczowe: fotowoltaika, nasłonecznienie, usłonecznienie, potencjał ekspozycji słonecznej dachów

Keywords: photovoltaics, insolation, solar radiation, solar exposure potential of roofs

Wstęp

Wraz z dynamicznym wzrostem populacji oraz koniecznością ograniczenia emisji gazów cieplarnianych zaczęto zwracać większą uwagę na energię pochodzącą z odnawialnych źródeł energii (OZE). Pojęcie to oznacza energię pochodzącą z naturalnych, powtarzających się procesów przyrodniczych, pozyskiwaną z odnawialnych niekopalnych źródeł energii, takich jak: energia wody, wiatru, promieniowania słonecznego, geotermalna, fal, prądów i pływów morskich oraz energia wytwarzana z: biopaliw stałych, biogazu, biopaliw ciekłych, a także energia otoczenia (środowiska naturalnego) wykorzystywana za pomocą pompy ciepła (Berent-Kowalska i in., 2016). Spośród nich to odnawialna energia słoneczna została określona jako jedno z najlepszych alternatywnych źródeł energii, ponieważ jej wykorzystanie do zasilania domów, fabryk i pojazdów zmniejsza emisję dwutlenku węgla, która uznawana jest za główny powód zmian klimatycznych (Yadao i in., 2017). W Polsce w 2015 roku udział energii odnawialnej w ogólnej produkcji energii elektrycznej kształtował się na poziomie 13,7%,

w 2014 roku było to 12,5%, a w roku 2013 tylko 10,4%, zatem wartość tego wskaźnika systematycznie wzrasta (GUS, 2016). Zwiększanie wartości produkcji energii ze źródeł odnawialnych jest bardzo pozytywnym zjawiskiem, niestety udział energii pozyskiwanej ze słońca w Polsce w 2014 roku stanowił jedynie 0,4% całej ilości energii pozyskanej z OZE, dla porównania w krajach UE ta wartość wyniosła 6,1% (Berent-Kowalska i in., 2016). Tak mały udział energii ze słońca wskazuje, że należy podjąć wiele działań zmierzających do popularyzacji wykorzystania energii słonecznej wśród odbiorców prywatnych i przedsiębiorców. Aby móc efektywnie korzystać z naturalnych zasobów energetycznych naszej planety, konieczne jest badanie ich potencjału w zależności od wielu czynników, a także dostępności do ich źródła. Jednym ze sposobów badania potencjału słonecznego są obliczenia w specjalistycznych oprogramowaniach, a następnie prezentacja wyników jako mapy potencjału słonecznego dachów. Tak otrzymane wyniki niekiedy publikowane są na stronach internetowych jako uzupełnienie lokalnych geoportali. Tworzone są tam warstwy informacyjne, które w formie kartograficznej prezentują w kolorach waloryzację warunków oświetlenia dachów, które pozwalają na wstępną ocenę zasadności instalacji paneli fotowoltaicznych (Witkowska, Bielecka, 2014).

Charakterystyka i cel projektu

Badania w zakresie nasłonecznienia obiektów budowlanych zostały podjęte przez opiekuna i członków Koła Naukowego „KNGK Geoinformatyka” w ramach własnego wewnętrznego projektu „Fotowoltaika”. Studenci koła naukowego posiadają doświadczenie w zakresie tworzenia modeli wektorowych 3D, ponieważ w ramach koła były prowadzone stosowne szkolenia (Krawczyk, 2013). Projekt zrealizowano na podstawie danych z lotniczego skaningu laserowego wykonanego w ramach projektu ISOK, pozyskanych z CODGiK. Projekt pozwolił na wykorzystanie nabytych umiejętności w praktyce i polegał na wykonaniu analiz nasłonecznienia wybranych obiektów budowlanych w rejonie Nowego Sącza. Ze względu na metodę wykonywania obliczeń nasłonecznienia w programie MicroStation na modelu wektorowym, pierwszym etapem prowadzonych działań była wektoryzacja połączeń dachowych. Następnie wykonano analizę wybranych czynników mających wpływ na wartość pozyskanej energii.

Celem projektu była ocena wpływu skomplikowanej geometrii analizowanych dachów na ich potencjał energetyczny oraz zwrócenie uwagi na wpływ zacieniania (przesłaniania) promieni słońca przez inne obiekty. W związku ze specyfiką analiz pominięto wpływ zacienienia wynikający z warunków atmosferycznych (zachmurzenia). Stąd też otrzymane wyniki będą jednoznacznie prezentowały tylko efekty wzajemnego zacienienia obiektów.

Charakterystyka wpływu i analiza czynników opisujących pozyskiwanie energii ze słońca

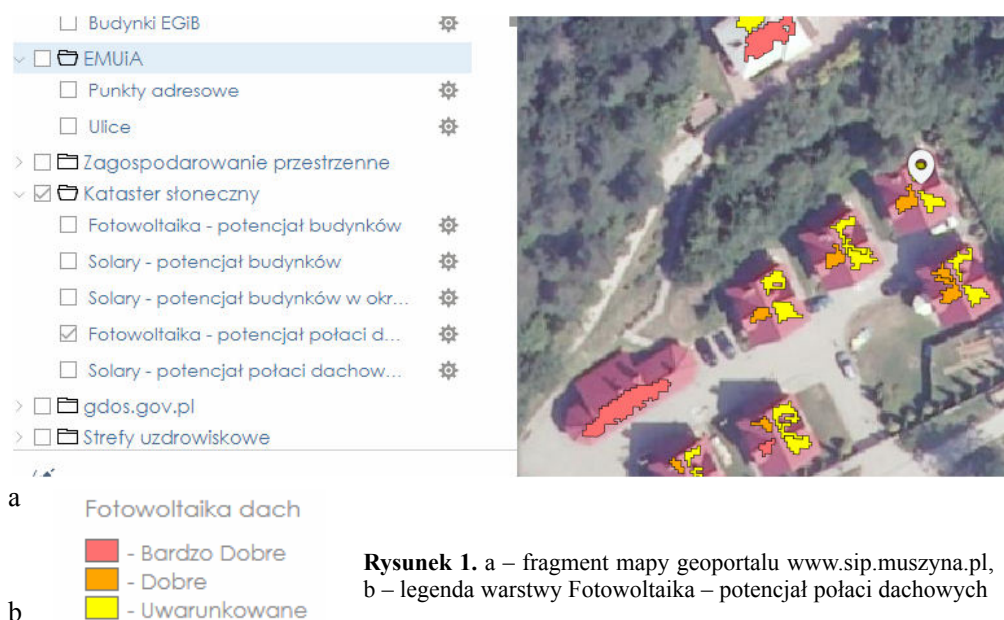
Analizując ilość energii, jaką można pozyskać ze słońca, istotne jest rozróżnienie kilku podstawowych pojęć. *Nasłonecznienie*, *insolacja*, *stosunek energii promieniowania słonecznego, padającego na daną powierzchnię poziomą (w jednostce czasu), do wielkości tej powierzchni* (Encyklopedia, 2017). Usłonecznienie natomiast definiowane jest w następujący

sposób: *Usłonecznienie, sumaryczny czas (w ciągu doby, miesiąca lub roku), w którym na określone miejsce na powierzchni Ziemi pada promieniowanie dochodzące bezpośrednio od tarczy Słońca* (Encyklopedia, 2017). Warto zwrócić uwagę, że terminy te, mimo iż często są stosowane zamiennie, nie są synonimami i charakteryzują zupełnie inne wartości. Dopiero po uwzględnieniu usłonecznienia, nasłonecznienia oraz natężenia promieniowania słonecznego otrzymujemy pełny obraz warunków, jakie panują na analizowanym obszarze. *Natężenie promieniowania słonecznego wyrażone w W/m^2 jest to gęstość mocy promieniowania padającego w ciągu jednej sekundy na powierzchnię prostopadłą do kierunku promieniowania.* Zatem, nasłonecznienie informuje nas o zasobach energii słonecznej, natomiast natężenie promieniowania słonecznego określa chwilowe warunki pracy urządzeń wykorzystujących energię słoneczną (Tatar-Kieć, 2015).

Wśród czynników wpływających na nasłonecznienie możemy wyróżnić te związane z warunkami naturalnymi oraz aspekty architektoniczne obiektu, na którym planuje się montaż instalacji. Korzyści, jakie można czerpać z instalacji PV, zależą od położenia geograficznego instalacji oraz ukształtowania terenu, zwłaszcza ekspozycji stoku. Preferowane są tereny o ekspozycji południowej i południowo-wschodniej. Kluczowe dla wartości nasłonecznienia, są również warunki pogodowe. Należy zauważyć, że przejrzystość powietrza, a więc gęstość powietrza oraz smog, będą miały wpływ na wydajność instalacji. Na analizowanym obszarze średnia wartość promieniowania słonecznego wynosi $10 MJ/m^2$ na dobę, natomiast roczna suma usłonecznienia wynosi 1250 godzin (Śleszyński i in., 2011).

Analizując aspekty architektoniczne, należy zauważyć, że użytkownikami instalacji PV w Polsce są głównie osoby fizyczne, które decydują się na jej montaż na dachach posiadanych budynków. Prowadzenie analiz dotyczących określania potencjału ekspozycji słonecznej dachów oraz odpowiednia dokumentacja w postaci katastru słonecznego, pozwala na zaplanowanie instalacji pozyskiwania energii elektrycznej. Dachy budynków wolnostojących, zlokalizowanych z dala od roślinności wysokiej oraz innych zabudowań są wolne od wpływu zacienienia przez nie powodowanego. Ponadto odpowiedni kształt dachu oraz jego powierzchnia wraz z właściwym usytuowaniem obiektu względem stron świata pozwala zmaksymalizować ilość pozyskanej energii. Istotnym czynnikiem jest również kąt nachylenia połaci dachu. Ponadto, połacie o nieskomplikowanym geometrycznie kształcie są pożądane, gdyż nie mają elementów powodujących zacienienie. Należy podkreślić, że dla niektórych miejscowości są dostępne mapy tak zwanego „katastru słonecznego”, w których określono potencjał połaci dachowych w zakresie instalacji paneli fotowoltaicznych. Dobrym przykładem może być portal miasta Muszyny, gdzie znajdują się informacje o potencjale połaci dachowych (rys. 1).

Legenda tej warstwy dzieli połacie dachowe na „bardzo dobre”, „dobre” i „uwarunkowane”. Analizując geometrię potencjału połaci dachowych, widać niepełne pokrycie dachów informacją o ich potencjale nasłonecznienia. Wynika to zapewne z faktu użycia do wyznaczenia powierzchni dachów metody rastrowej, co powoduje, że wyznaczone powierzchnie potencjału nie stykają się krawędziami dachów. Z tego powodu można przypuszczać, że obliczone wartości potencjału słonecznego dachów są niższe niż w rzeczywistości. Tymczasem istnieją możliwości wykonywania obliczeń na modelu wektorowym z precyzyjnym oszacowaniem potencjału słonecznego dla konkretnej połaci dachowej. W związku z tym podjęto badania i zaprojektowano eksperymenty w celu analizy wybranych dachów – kilku obiektów budownictwa jednorodzinnego i jednego obiektu przemysłowego.

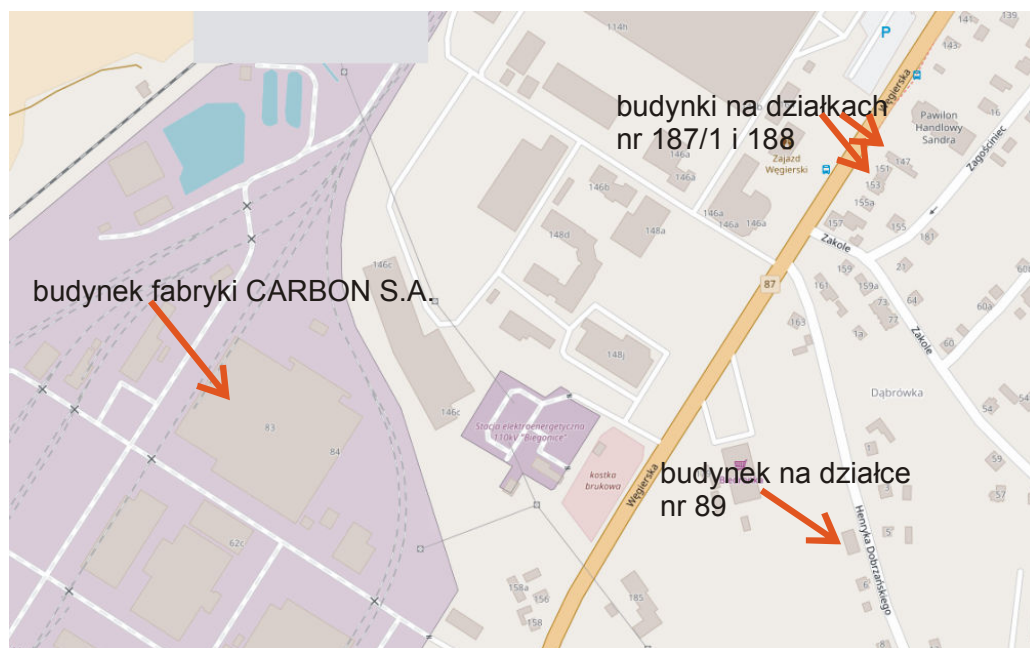


Rysunek 1. a – fragment mapy geoportalu www.sip.muszyna.pl,
b – legenda warstwy Fotowoltaika – potencjał połaci dachowych

Opis rejonu i metodyki badań

Obszar badań obejmował wybrane działki na terenie miasta Nowy Sącz – fabryki CARBON SA położonej w dzielnicy Biegonice oraz trzech działek na obszarze dzielnicy Dąbrówka. Nowy Sącz jest miastem na prawach powiatu położonym w południowo-zachodniej części województwa małopolskiego. Usytuowany jest w centrum Kotliny Sądeckiej, w paśmie Karpat, łańcuchu Beskidu Sądeckiego, pomiędzy dwiema rzekami – Dunajcem i Kamienicą Nawojowską. Rejon ten charakteryzuje urozmaicona rzeźba terenu, typowa dla obszarów karpacczych, co ma bezpośredni wpływ na nasłonecznienie regionu. Dzielnice Biegonice i Dąbrówka znajdują się w południowo-zachodniej części miasta. Obiektem szczególnych analiz były obiekty przemysłowe na terenie zakładów fabrycznych oraz dachy budynków mieszkalnych i gospodarczych znajdujących się na okolicznych działkach. Na rysunku 2 przedstawiono obiekty wybrane do dalszych analiz na podkładzie mapy Nowego Sącza z serwisu OpenStreetMap.

Analizy przeprowadzono w oprogramowaniu firmy Bentley Systems – MicroStation v8i SELECT Series 3 udostępnionego w ramach licencji akademickiej oraz w oprogramowaniu GIS, które zostało opisane w dalszej części artykułu. W MicroStation pierwszym krokiem było stworzenie wektorowych modeli dachów analizowanych budynków – wykonano wektoryzację w przestrzeni 3D opierając się o sklasyfikowaną chmurę punktów pochodzącą z lotniczego skaningu laserowego. W celu wykonania obliczeń nasłonecznienia wykorzystano narzędzie Solar Exposure Calculator, które bazuje na modelu obliczeniowym położenia słońca SPA (*Solar Position Algorithm*) opracowanym przez NREL (National Renewable Energy Laboratory) (Reda i in., 2008). Narzędzie pozwala na ustawienie parametrów obliczeń oraz konkretnego dnia, dla którego mają zostać wykonane analizy. W projekcie obliczone zostały wartości nasłonecznienia (wyrażone w kWh/m²). Dla wszystkich analiz przyjęto jednakowe parametry: interwał godzinny oraz stałe źródło energii słonecznej o wartości



Rysunek 2. Lokalizacja obiektów wybranych do przeprowadzenia badań

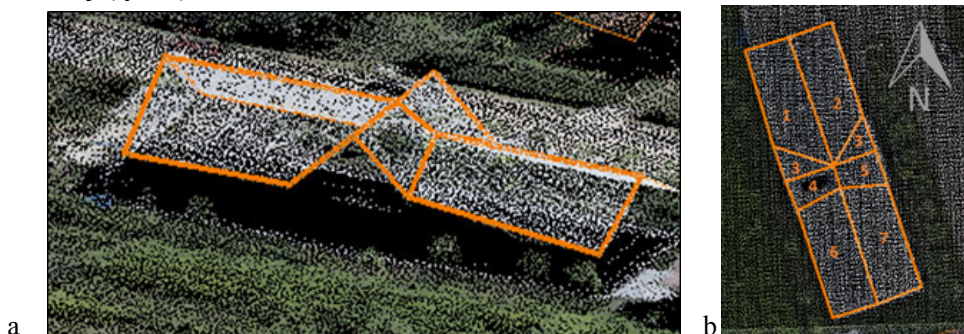
1000 W/m². Wartość ta stanowi średnie natężenie promieniowania słonecznego docierającego do granicy atmosfery (1367 W/m²) pomniejszone o wpływ rozpraszania i pochłaniania promieniowania w atmosferze (Stronka i in., 2015). Narzędzie pozwala również na ustalenie rozmiaru siatki modelu wyjściowego (w przypadku artykułu – 1m) oraz pomijanie w symulacji obiektów mniejszych niż zadana wartość, w tym wypadku ustalona jako 0 – wszystkie elementy zostały przeanalizowane. Podczas obliczeń nie wzięto pod uwagę wpływu żadnych warunków atmosferycznych, które można uwzględnić przez wgranie pliku pogodowego. Obliczenia wykonano dla dnia rozpoczęcia każdej kalendarzowej pory roku, to jest 21 marca, 22 czerwca, 23 września i 22 grudnia. Jako wynik analiz zdefiniowano osobny plik projektowy z graficzną prezentacją nasłonecznienia lub nasłonecznienia w formie tekstury na badanych dachach przyjmujących barwy w określonej skali. Rezultaty badań można wyeksportować również w postaci pliku CSV lub modelu wewnątrz pierwotnego pliku projektowego.

Analizy wybranych obiektów budowlanych – modele wektorowe

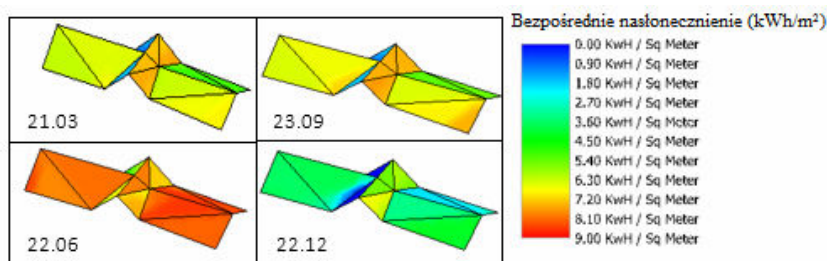
Do wykonania szczegółowych analiz wybrano 6 budynków na terenie o niskiej zabudowie jednorodzinnej, jeden na działce ewidencyjnej nr 89 w obrębie 0111, dwa na działce ewidencyjnej nr 188 i trzy na działce ewidencyjnej nr 187/1, w obrębie 0109. Starano się poddać badaniom dachy o zróżnicowanym kształcie, wielkości, ekspozycji i otoczeniu. Wyniki zaprezentowano w formie graficznej prezentacji nasłonecznienia dachów oraz tabeli z wartościami liczbowymi. Na ich podstawie wyciągnięto wnioski odnośnie wpływu różnych czynników na potencjał solarny danego dachu.

Analiza budynku jednorodzinnego na działce nr 89

W pierwszej kolejności przeanalizowano szczegółowo przydatności połąci dachowych budynku usytuowanego na działce nr 89 (rys. 3). Wyniki analiz przedstawiono w postaci graficznej (rys. 4).



Rysunek 3. Dach budynku na działce nr 89: a – zwektoryzowany w przestrzeni 3D, b – podzielony na analizowane połąci dachowe, w odniesieniu do kierunku północy



Rysunek 4. Zestawienie wizualizacji analizy nasłonecznienia dachu na działce nr 89 w dniach: 21 marca, 22 czerwca, 23 września i 22 grudnia

W najkrótszym dniu roku i w najdłuższym dniu roku oraz dla dni równonocy wiosennej i jesiennej zostały obliczone wartości nasłonecznienia w kWh/m² i przedstawione w tabeli 1.

Dach budynku na działce nr 89 jest dachem wielopołąciowym i cechuje go bardzo zróżnicowany kształt. Przewyższenie kalenicy poprzecznej w stosunku do kalenic usytuowanych wzdłuż długości budynku powoduje powstanie efektu okresowego, wzajemnego zacięniania połąci dachowych. Stopień zacięniania zależy od pory roku, kierunku i kąta padania promieni słonecznych. Biorąc pod uwagę nasłonecznienie w ciągu najdłuższego dnia w roku w lecie w stosunku do najkrótszego dnia w roku, to różnica nasłonecznienia dla wszystkich połąci dachowych wynosi 57,1%. Pomimo w miarę dobrego doświetlania połąci nr 3 w lecie, to w zimie będzie ona generowała znikome ilości energii. Różnica nasłonecznienia pomiędzy najdłuższym a najkrótszym dniem w roku wynosi aż 91,8%. Z kolei różnica nasłonecznienia między najdłuższym dniem a dniem równonocy wynosi 75,4%. Biorąc pod uwagę fakt występowania dodatkowych czynników ograniczających nasłonecznienie, takich jak zachmurzenie i smog, można przyjąć, że instalowanie na tej połąci paneli jest nieuzasadnione i połąci dachową nr 3 należy wyłączyć z zabudowy fotowoltaicznej. Wykonana analiza pozwala również na optymalizację kolejności zagospodarowania połąci dachowych, najpierw

Tabela 1. Zestawienie wartości nasłonecznienia z analizy połaci dachowych budynku na działce nr 89

Numer połaci dachowej	Nasłonecznienie dachu				
	21.03	22.06	23.09	22.12	22.06+22.12
	[kWh/m ²]				
1	6,37	7,96	6,57	3,46	11,42
2	4,45	8,11	4,64	1,45	9,56
3	1,48	6,02	1,60	0,49	6,51
4	7,40	7,51	7,47	6,05	13,56
5	7,33	7,43	7,40	5,71	13,14
6	6,47	8,25	6,70	3,72	11,97
7	5,11	8,40	5,36	2,14	10,54
Suma nasłonecznienia wszystkich połaci		53,68		23,02	
Średnie nasłonecznienie dla całej powierzchni dachu		7,66		3,28	

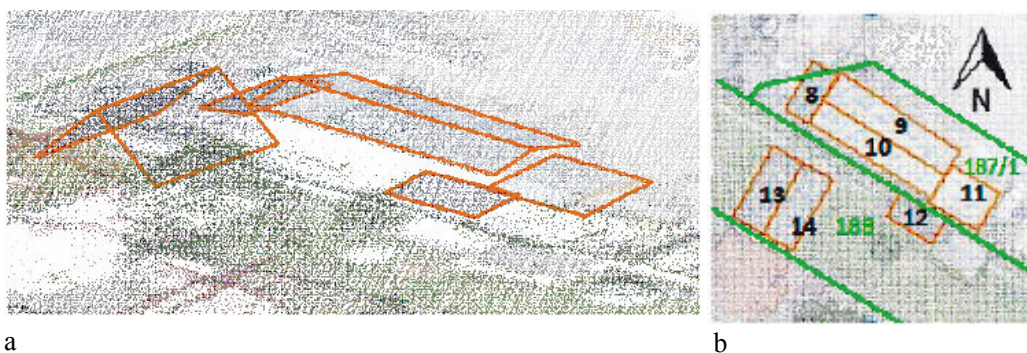
bowiem należy zagospodarować połacie o numerach 5 i 4, potem 1, 6 i 7, a następnie ewentualnie połac nr 2.

Połacie tego dachu o ekspozycji wschodniej nr 7 i 2 w okresie letnim dają bardzo wysokie wyniki nasłonecznienia, natomiast w okresie zimowym są jednymi ze słabiej oświetlonych ze względu na niskie położenie słońca nad horyzontem. Tak jak można było przypuszczać, największą stabilnością cechują się połacie o ekspozycji południowej, czyli połacie dachowe nr 5 i 4. Na bazie analizy połaci dachowej nr 3 można przyjąć, że połac ta praktycznie nie nadaje się do zabudowy paneli fotowoltaicznych.

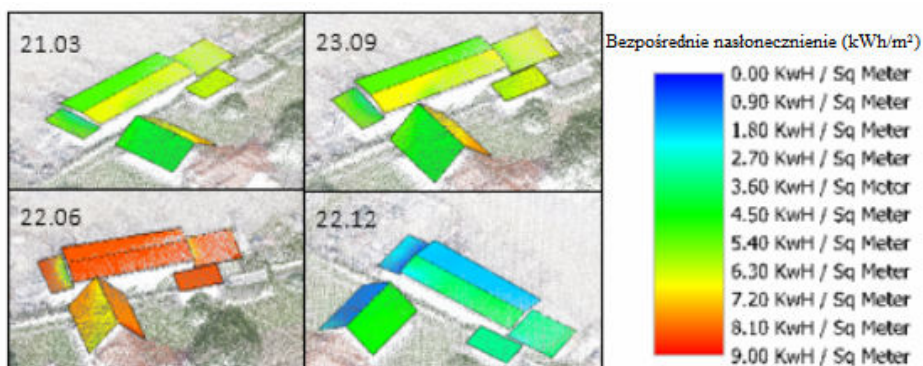
Analiza budynków jednorodzinnych na działkach nr 187/1 i 188

W drugiej kolejności przeanalizowano przydatność połaci dachowych budynków usytuowanych na działce nr 187/1 i 188, które przedstawiono na rysunkach 5 i 6, natomiast wyniki zestawiono w tabeli 2.

Dachy wszystkich budynków mają regularny kształt, są jedno- lub dwuspadowe. Wyraźnie widać, że połacie dachu o ekspozycji północnej uzyskują najniższe wartości nasłonecznienia. Można również zaobserwować znaczący wpływ wywołany przez zacienienie wyższym budynkiem na działce nr 187/1 niżej położonej połaci, szczególnie w zimie, gdy słońce znajduje się nisko nad horyzontem. Ponadto, różnica wartości nasłonecznienia dla połaci dachu o wschodniej ekspozycji jest największa między latem a zimą. Analizując uzyskane wartości, zauważamy, że najkorzystniejsze pod względem montażu są połacie 10, 11 na działce nr 187/1 oraz połacie 12 i 14 na działce nr 188, a więc te działki powinny zostać pokryte instalacją PV w pierwszej kolejności. Dach oznaczony numerem 11 jest dachem jednospadowym o korzystnej ekspozycji, co powoduje, że instalacja może być zamontowana na całej jego powierzchni. Dla budynków o dwuspadowej więźbie dachowej (np. połacie oznaczone nr 9 i 10), ze względu na niekorzystną ekspozycję jednej połaci oraz przesłonięcia kalenicą, montaż paneli jest racjonalny wyłącznie na jednej połaci o ekspozycji południowo-zachodniej. Wartości nasłonecznienia uzyskane dla połaci dachowych na działce nr 188



Rysunek 5. Dachy budynków na działkach nr 187/1 i 188: a – zwektoryzowane w przestrzeni 3D, b – podzielone na analizowane połacie dachowe w odniesieniu do kierunku północy



Rysunek 6. Zestawienie wizualizacji analizy nasłonecznienia dachów na działkach nr 187/1 i 188 dla: 21 marca, 22 czerwca, 23 września i 22 grudnia

Tabela 2. Zestawienie wartości nasłonecznienia z analizy połaci dachowych budynku na działkach nr 187/1 i 188

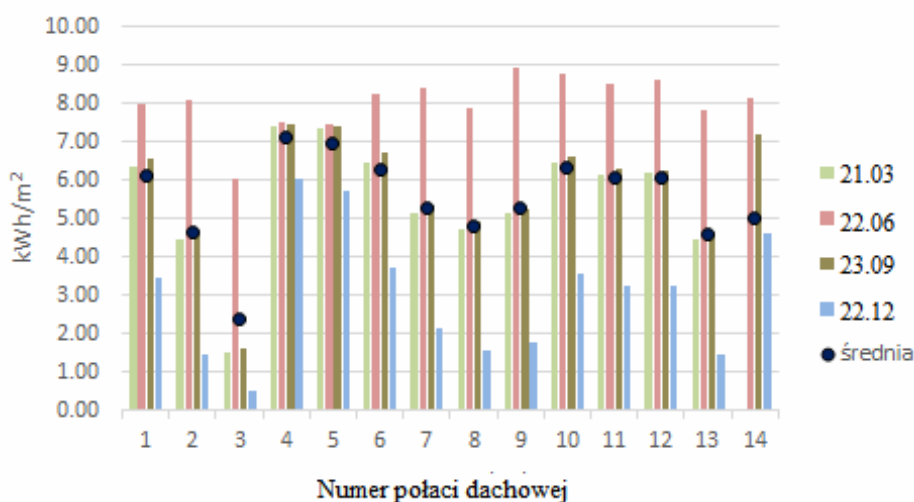
Nasłonecznienie dachów						
	21.03	22.06	23.09	22.12	suma	średnia
	[kWh/m²]					
działka nr 187/1						
8	4,71	7,88	4,95	1,54	19,08	4,77
9	5,14	8,93	5,23	1,75	21,05	5,26
10	6,45	8,75	6,62	3,56	25,38	6,35
11	6,15	8,49	6,28	3,26	24,18	6,05
Suma	22,45	34,05	23,08	10,11	89,69	5,61
działka nr 188						
12	6,19	8,62	6,24	3,22	24,27	6,07
13	4,43	7,80	4,56	1,45	18,24	4,56
14	6,81	8,16	7,46	4,59	27,02	6,76
Suma	17,43	24,58	18,24	9,26	69,53	5,79

ukazują kluczowy wpływ ekspozycji. Dla połaci oznaczonej numerem 13 o ekspozycji północno-zachodniej wartość nasłonecznienia w dniu równonocy jesiennej wynosi $4,56 \text{ kWh/m}^2$, natomiast połac oznaczona numerem 14 generuje więcej energii w najkrótszym dniu w roku. Wartość nasłonecznienia w wybranym dniu w zimie wyniosła $4,59 \text{ kWh/m}^2$. Należy jednak pamiętać, że prowadzone analizy nie uwzględniają zachmurzenia, które często występuje w okresie zimowym.

Zestawienie wyników dla zabudowy jednorodzinnej

Zestawienie wyników dla wszystkich analizowanych obiektów zabudowy jednorodzinnej przedstawiono na rysunku 7.

Wartości nasłonecznienia poszczególnych połaci dachowych oraz średnia wartość

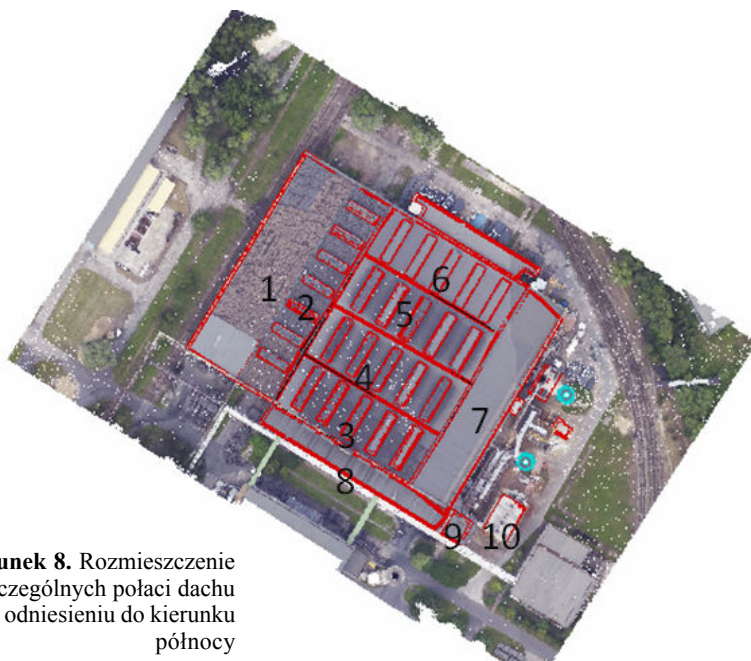


Rysunek 7. Wykres przedstawiający nasłonecznienie poszczególnych dachów dla czterech reprezentatywnych dni roku oraz średnią

Wykres (rys. 7) prezentuje wartości nasłonecznienia uzyskane dla każdej z połaci dachów w zależności od pory roku oraz ich średnią wartość. Najkorzystniejsze do założenia paneli słonecznych są miejsca o wysokich wartościach dla każdej z pór roku – zatem połacie oznaczone numerami 4 i 5, a także 6. Są to niewielkie połacie dachu budynku położonego na działce nr 89 o ekspozycji południowej/południowo-wschodniej oraz jedna większa o ekspozycji południowo-zachodniej. Korzystne są również połacie 10, 11 i 12. To część dwuspadowego dachu o ekspozycji południowo-wschodniej oraz płaskiego dachu po wschodniej stronie na działce nr 187/1, a także płaski dach od strony południowej na działce nr 188. Na podstawie tych analiz, przy założeniu odpowiedniej powierzchni paneli słonecznych i ich liczby, zależnej od powierzchni dachu i budżetu zainteresowanej osoby, można wyznaczyć potencjalnie najbardziej optymalną lokalizację paneli fotowoltaicznych na dachu nieruchomości, co może być bardzo pomocne przy realizacji tego typu inwestycji i znacznie ułatwia proces projektowania instalacji.

Analiza zacienienia dachów fabryki z uwzględnieniem kominów

Analizowanym obiektem jest hala fabryczna grafitowni firmy SGL Carbon z dobudowanymi pomieszczeniami aparatu absorpcyjnego i wymiennika ciepła. Dach hali zawiera dużą liczbę świetlików komplikujących układ geometryczny dachu. Hala w przeszłości była rozbudowywana, stąd też dla tego obiektu wyróżniono aż 10 połaci dachowych przedstawionych na rysunku 8.

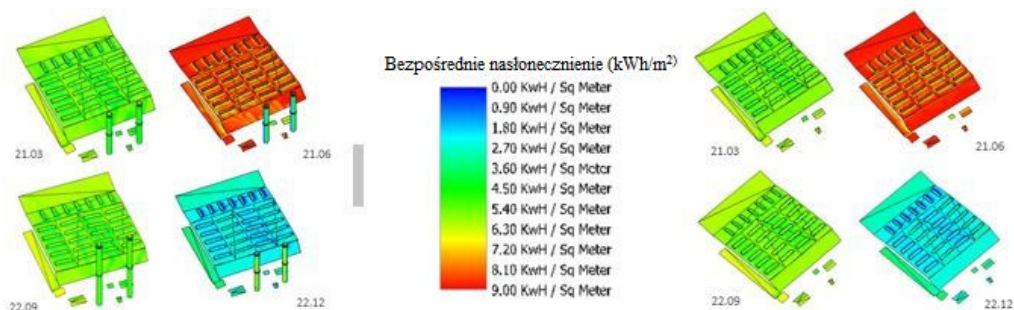


Rysunek 8. Rozmieszczenie poszczególnych połaci dachu fabryki w odniesieniu do kierunku północy

Dla dachu hali fabrycznej wykonano dwie analizy – pierwszą odpowiadającą faktycznemu stanowi, uwzględniającą wpływ dwóch kominów zaciniających dach od strony wschodniej oraz drugą – symulującą nasłonecznienie dachu bez obecności kominów. Wyniki zaprezentowano na rysunku 9 i w tabeli 3. Dodatkowo obliczono wartości różnic potencjału solarne dachów 7 i 9 (tab. 4).

Podobnie jak dla domów jednorodzinnych, wykonano analizy nasłonecznienia dachów fabryk dla pierwszych dni poszczególnych pór roku. Dodatkowo wykonano obliczenia wpływu zacienienia dachów fabryki przez kominy. Wykonano obliczenia nasłonecznienia połaci dachów dla przypadku, gdy kominy znajdowały się obok fabryki oraz gdyby ich nie było.

Zaobserwowano wyraźny wpływ zacienienia wywołanego przez kominy. W dniu 21 czerwca dla dachu nr 7, jak i dla średniej wartości wszystkich dachów, wyniósł on 0,2 kWh/m² w ciągu doby. Natomiast dla dachu nr 9 wpływ zacienienia jest najmniejszy. Wyniósł on średnio o 0,02 kWh/m² w ciągu doby mniej, w przypadku gdy kominy dawały cień. Ten dach wypadł najkorzystniej w wykonanych analizach ze względu na południową ekspozycję, wysokość oraz nieznaczny wpływ zacienienia. Jednak ze względu na powierzchnię nie jest



Rysunek 9. Nasłonecznienie dachów fabryki w pierwsze dni poszczególnych pór roku: 21 marca, 22 czerwca, 23 września i 22 grudnia

Tabela 3. Zestawienie wartości nasłonecznienia z analizy poszczególnych połaci dachowych dla hali fabrycznej: a – w sytuacji, w której nie ma sąsiadujących kominów, b – z uwzględnieniem sąsiedztwa kominów

Fabryka bez kominów				
	21.03	22.06	23.09	22.12
	[kWh/m ²]			
1	5,96	8,74	6,04	2,82
2	4,37	7,12	4,47	1,54
3	3,85	6,08	3,89	1,55
4	4,17	6,34	4,24	1,81
5	3,76	6,03	3,78	1,42
6	4,00	6,07	4,04	1,73
7	5,70	8,71	5,86	2,54
8	6,10	7,99	6,28	3,34
9	6,49	8,74	6,80	3,62
10	5,83	8,59	5,91	2,65
Średnia	5,17	7,54	5,24	2,43

a

Fabryka z kominami				
	21.03	22.06	23.09	22.12
	[kWh/m ²]			
1	5,93	8,73	6,02	2,79
2	4,33	7,12	4,44	1,53
3	3,80	5,97	3,83	1,55
4	4,04	6,28	4,12	1,80
5	3,66	6,02	3,64	1,37
6	3,95	6,07	4,01	1,63
7	5,37	8,34	5,53	2,36
8	6,10	7,93	6,28	3,34
9	6,49	8,74	6,71	3,62
10	5,82	8,59	5,92	2,65
Średnia	4,93	7,32	5,01	2,31

b

miejszem, z którego uzyskać można zadowalającą ilość energii dla całej fabryki. Jednak należy podkreślić nieporównywalnie większy potencjał uzysku energii słonecznej z dachów hal fabrycznych niż z indywidualnych obiektów budowlanych.

Analizy wykonane przed rozpoczęciem budowy fabryki oraz hali produkcyjnej mogą przyczynić się do modyfikacji w projektach, tak by wygospodarować możliwie dużą przestrzeń dachu do pozyskania energii słonecznej.

Tabela 4. Zestawienie wartości różnic nasłonecznienia z analizy połaci dachowych dla hali fabrycznej i dwóch połaci dachowych nr 7 i 9 w sytuacji, w której nie ma sąsiadujących kominów oraz z uwzględnieniem sąsiedztwa kominów

Porównanie średnich wartości					
	21.03	22.06	23.09	22.12	średnia
	[kWh/m ²]				
Bez kominów	5,17	7,54	5,24	2,43	5,09
Z kominami	4,93	7,32	5,01	2,31	4,89
Różnice	0,24	0,22	0,23	0,12	0,20
Wartości dla dachu nr 7					
	21.03	22.06	23.09	22.12	średnia
	[kWh/m ²]				
Bez kominów	5,70	8,71	5,86	2,54	5,70
Z kominami	5,37	8,34	5,53	2,36	5,40
Różnice	0,33	0,37	0,33	0,18	0,30
Wartości dla dachu nr 9					
	21.03	22.06	23.09	22.12	średnia
	[kWh/m ²]				
Bez kominów	6,49	8,74	6,80	3,62	6,41
Z kominami	6,49	8,74	6,71	3,62	6,39
Różnice	0,01	0,00	0,09	0,00	0,02

Analizy wybranych obiektów budowlanych – model rastrowy

Kolejne analizy wykonano w programie ArcMap 10.4 oraz SAGA GIS. Ich celem było porównanie wyników obliczeń przeprowadzonych na rastрах z wynikami modelu wektorowego, a także ocena różnic pomiędzy narzędziami zaimplementowanymi w oprogramowaniu. Wykorzystane zostało narzędzie *Area Solar Radiation* z programu ArcMap oraz *Module Potential Incoming Solar Radiation* dostępne w SAGA GIS. Pierwszy z programów nie bierze pod uwagę żadnych dodatkowych czynników wpływających na wartość nasłonecznienia, takich jak wpływ warunków atmosferycznych bądź zanieczyszczenie powietrza. W drugim narzędziu są predefiniowane gotowe modele atmosfery uwzględniające poszczególne czynniki mające wpływ na faktyczny wynik nasłonecznienia, między innymi takie jak: zanieczyszczenie, ciśnienie powietrza, wysokość atmosfery lub ilość pary wodnej. W obu programach istnieje możliwość wybrania dnia, interwału czasowego i jednostki wyniku. Dodatkowo SAGA GIS wynikowo generuje dwa rastry, dzieląc promieniowanie słoneczne na bezpośrednie i rozproszone. Wartości tych rastrow zostały zsumowane i przedstawione w tabeli 5.

Niewątpliwą zaletą analizy na modelu rastrowym jest możliwość szybkiego generowania danych dla dużych obszarów bez konieczności wektoryzacji analizowanych obiektów. Za

Tabela 5. Zestawienie wartości nasłonecznienia obliczonych w trzech programach: MicroStation, ArcMap i SAGA

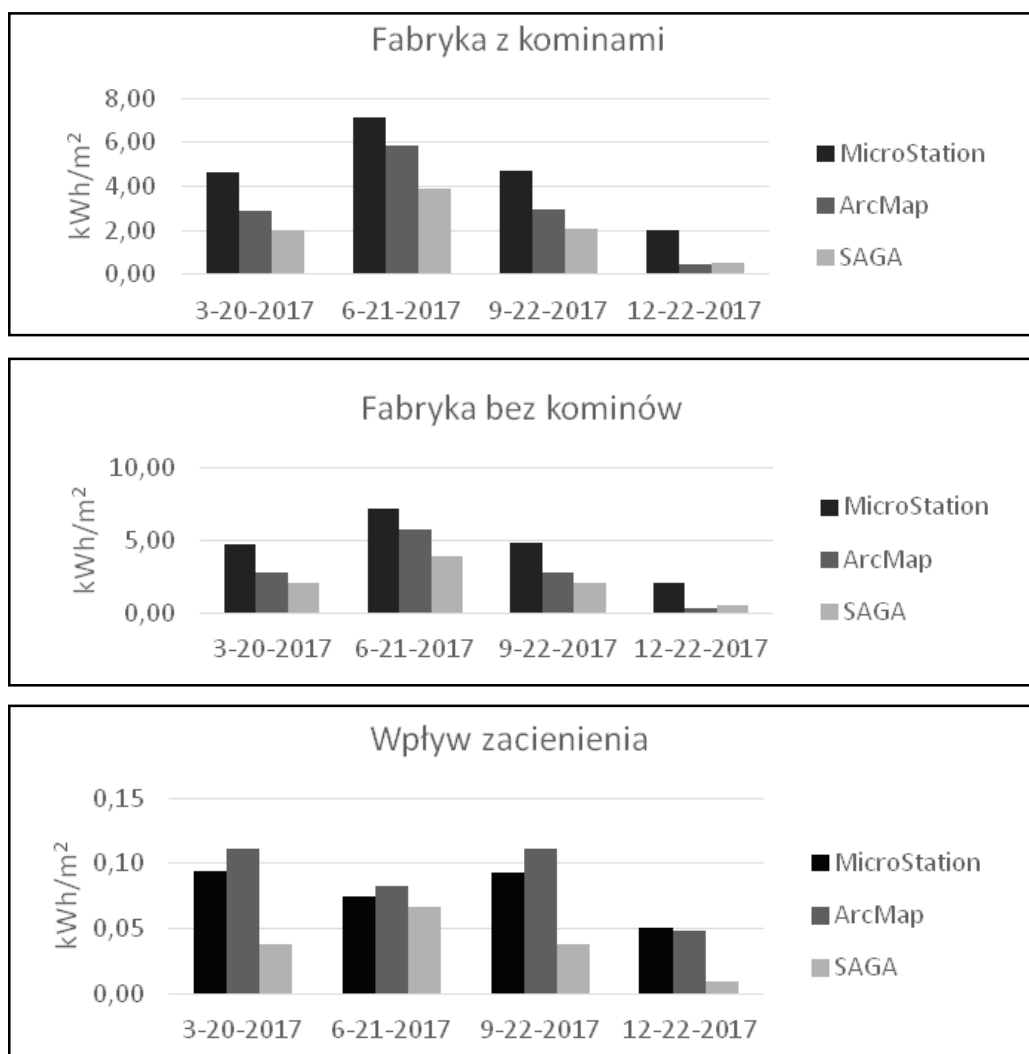
Data	Wszystkie klasy NPT		Fabryka		Różnica	
	[kWh/dach]	[kWh/m ²]	[kWh/dach]	[kWh/m ²]	[kWh/m ²]	[%]
MicroStation						
20.03.2017	62 905,00	4,65	64 178,73	4,75	0,09	1,98
21.06.2017	96 340,00	7,13	97 342,32	7,20	0,07	1,03
22.09.2017	64 023,00	4,74	65 279,05	4,83	0,09	1,92
22.12.2017	27 366,00	2,02	28 042,73	2,08	0,05	2,41
Średnia	62 658,50	4,64	63 710,71	4,71	0,08	1,84
ArcMap						
20.03.2017	41 407,40	2,76	43 087,80	2,87	0,11	3,90
21.06.2017	86 491,30	5,76	87 738,20	5,84	0,08	1,42
22.09.2017	42 692,40	2,84	44 360,00	2,95	0,11	3,76
22.12.2017	5 882,15	0,39	6 616,33	0,44	0,05	11,10
Średnia	44 118,31	2,94	45 450,58	3,03	0,09	5,04
SAGA						
20.03.2017	30 424,36	2,03	30 997,45	2,06	0,04	1,85
21.06.2017	58 126,59	3,87	59 134,28	3,94	0,07	1,70
22.09.2017	30 862,57	2,05	31 432,13	2,09	0,04	1,81
22.12.2017	8 196,51	0,55	8 332,65	0,55	0,01	1,63
Średnia	31 902,51	2,12	32 474,13	2,16	0,04	1,75

podstawę obu analiz posłużył numeryczny model pokrycia terenu (NMPT) wygenerowany z chmury punktów pochodzącej z lotniczego skaningu laserowego. Za pomocą wyżej wspomnianych narzędzi policzono wartość nasłonecznienia dla dachu fabryki wraz z otaczającymi ją obiektami przestrzennymi (w tym przyległe kominy), następnie z modelu wycięto fragment obejmujący jedynie fabrykę. Pozwoliło to porównać wartości energii teoretycznie możliwej do pozyskania (bez uwzględniania innych strat) z dachu fabryki, a także oszacować wpływ zacienienia powodowanego przez kominy (tab. 5).

Na podstawie uzyskanych danych można stwierdzić, jaka jest wielkość strat energii powodowanych przez zacienienie. Można także zauważyć, że zastosowane narzędzia dają różne wyniki. Ma na to wpływ kilka czynników, głównie model atmosfery, jaki jest wykorzystywany przez dany program. W MicroStation, aby móc brać pod uwagę wpływ pogody, należy wgrać plik, tak zwany *Weather File*, który zawiera informacje o pogodzie. W niniejszych analizach nie był on wykorzystywany, ponieważ uwzględnianie wpływu pogody nie jest konieczne, aby ocenić wpływ samego zacienienia. Oba programy w swoich narzędziach mają parametr odwzorowujący wpływ atmosfery i nie ma potrzeby korzystania z dodatkowych danych w tej analizie. SAGA w narzędziu *Potential Incoming Solar Radiation* daje zupełnie inne możliwości konfiguracyjne niż ArcMap. Najważniejsze i mające największy wpływ na wynik parametry, jakie dobrano w ArcGIS, to: szerokość geograficzna zgodna z rzeczywistą lokalizacją badanego obszaru, rozdzielczość rastra odwzorowującego niebo

(*Sky size/resolution*) pozostawiono w domyślnej wartości 200×200 pikseli, dzień roku jak w przyjętej konwencji badań, czyli pierwsze dni kalendarzowych pór roku, czas startu i końca analizy od godz. 00.00 do 24.00. Interwał czasowy wynosił 10 minut, proporcję promieniowaną rozproszonego do bezpośredniego (*Diffuse proportion*) ustawiono na 0,3. Wszystkie pozostałe parametry pozostawiono w wartościach domyślnych. W SAGA GIS najważniejsze parametry zostały ustawione jak w ArcGIS.

Zestawienie wyników trzech analiz, które zostały wykonane, a także obliczoną wielkość wpływu zacienienia na ilość teoretycznie możliwej do pozyskania energii dla dachu fabryki przedstawiono na wykresach (rys. 10). Można stwierdzić, że wyniki z poszczególnych programów są różne, choć porównywalne. Wyraźnie daje się zauważyć różnicę wartości nasłonecznienia pomiędzy najdłuższym a najkrótszym dniem w roku.



Rysunek 10. Zestawienie wyników nasłonecznienia obliczone w trzech programach GIS

Średnia roczna strata ze wszystkich analiz wynosi $0,07 \text{ kWh/m}^2$, czyli 2,88%. Najmniejszy wpływ zacienienia ma miejsce w najkrótszym dniu roku. Znając wartość obliczonych strat i mnożąc je przez stawkę za 1 kWh energii elektrycznej, można otrzymać przybliżoną finansową stratę powodowaną przez cień rzucany na halę przez kominy.

Dyskusja

W wyniku badań można sformułować kilka szczegółowych obserwacji dotyczących wykonanych analiz nasłonecznienia. Szczegółowe analizy wykazały, że niektóre połacie dachowe obiektów jednorodzinnych są efektywnie nasłonecznione tylko i wyłącznie w okresie letnim, w pozostałych miesiącach ich nasłonecznienie jest bardzo małe, a w zimie znikome. Oznacza to, że instalacja paneli fotowoltaicznych nie jest na nich uzasadniona przy tej konfiguracji dachu i lokalizacji badanych obiektów.

W trakcie analizy połaci dachowych hali fabrycznej pierwszym spostrzeżeniem jest duża różnica w powierzchniach połaci dachowych dostępnych do zabudowy pomiędzy halą a budynkami jednorodzinными, jednak ze względu na fakt nachylenia dachów w budynkach jednorodzinnych ich bezpośrednie nasłonecznienie jest większe niż to uzyskiwane na praktycznie płaskim dachu fabryki. Szczególnie ten parametr jest istotny w zimie, kiedy słońce jest nisko nad horyzontem. Uśrednione ze wszystkich połaci dachowych nasłonecznienie budynku położonego na działce nr 89 w zimie wyniosło $3,38 \text{ kWh/m}^2$, zaś dla połaci dachowych fabryki – $2,31 \text{ kWh/m}^2$.

Biorąc pod uwagę zacienienie dachu hali przez sąsiednie kominy przeprowadzone analizy w programie MicroStation wykazały, że różnica wartości nasłonecznienia wynosi $0,20 \text{ kWh/m}^2$. Poszerzenie analizy zacienienia dachu hali przez kominy z wykorzystaniem innego typu oprogramowania wykazało, że strata ze wszystkich analiz wynosi w zaokrągleniu $0,07 \text{ kWh/m}^2$, czyli 2,88%. Zatem strata powodowana przez zacienienie kominami hali nie jest wielka, choć wyraźnie zauważalna i przy przeliczeniu tej różnicy względem zacienianej powierzchni dachu może generować stosunkowo duże straty energii w ciągu roku.

Zidentyfikowanie połaci dachowych o bardzo niskim nasłonecznieniu w ciągu 3 dni roku (jesień, zima, wiosna) skłania autorów niniejszego opracowania do sformułowania wniosku o konieczności uzupełnienia standardowej legendy mapy „katastru słonecznego” z Muszyny (SIP Muszyna, 2017) o czwartą kategorię połaci słonecznych: nieodpowiednie, czyli takie, które praktycznie nie nadają się do montażu paneli fotowoltaicznych. Analiza na przykładzie dachu fabryki i przyległych do niej kominów pokazuje, że wpływ zacienienia w stosunku do sytuacji z jego brakiem nie jest aż tak istotny, co częściowo wynika z dość niskiego nasłonecznienia płasko ułożonego dachu fabryki.

Wnioski

Wykonane analizy pozwalają sformułować również pewne wnioski na przyszłość. W pierwszej kolejności należy podkreślić, że kluczowym czynnikiem w kształtowaniu potencjału nasłonecznienia połaci dachowych jest usytuowanie budynku i konstrukcja dachu, o których decyduje się na etapie projektowania budynku. Zainwestowanie czasu i środków w optymalne położenie budynku i ekspozycję połaci dachowych względem południa może

przynieść istotne korzyści energetyczne w nowo wybudowanym obiekcie. W przypadku budynków wielkogabarytowych, typu hale produkcyjne, bardzo opłacalne jest montowanie instalacji paneli fotowoltaicznych po wcześniejszym zaprojektowaniu budynku tak, by jak najwięcej połąci dachowej miało podniesioną nośność w celu montażu urządzeń lub stelaży zwiększających nachylenie paneli. Dachy płaskie pozwalają bowiem ustawić panele w najbardziej korzystnym kącie nachylenia (np. 30 stopni zorientowanym w kierunku południowym). Możliwe jest również stosowanie bardziej zaawansowanych urządzeń, tak zwanych „trackerów” solarnych, które automatycznie dostosowują kąt nachylenia i kierunek ekspozycji paneli w odniesieniu do pozycji słońca. Natomiast na dachach skośnych (o kącie nachylenia większym od 15 stopni) instaluje się panele, które bezpośrednio przylegają do połąci dachu. W takim wypadku kąt nachylenia paneli wyznaczony jest zatem przez konstrukcję dachu (Fotowoltaika24, 2017). Ważne też jest, aby pozostała infrastruktura przemysłowa w pobliżu hali nie przysłańiała promieniowania słońca.

Mając kilka budynków w obrębie jednej nieruchomości, warto zbadać zatem ich potencjał solarny, ocenić zacienienie, a następnie dobrać optymalną instalację fotowoltaiczną w zależności od indywidualnych potrzeb.

W przypadku posiadania modelu geometrii dachu można wykonać analizy nasłonecznienia w systemach GIS w celu obliczenia maksymalnego potencjału solarnego połąci dachowych. W zależności od typu geometrii (wektor lub chmura punktów) można otrzymać różne wartości nasłonecznienia. Natomiast obliczenie wartości nasłonecznienia zbliżonej do wartości rzeczywistej można uzyskać jedynie przez wykorzystanie parametrów charakteryzujących zjawiska przenikania, rozpraszania i pochłaniania promieni słonecznych w atmosferze. Problem identyfikacji wartości tych parametrów w poszczególnych programach GIS stanowić będzie osobny temat badań planowanych do podjęcia w przyszłości.

Na zakończenie należy podkreślić, że wykonane obliczenia nasłonecznienia dachów są zaledwie wstępnym, początkowym etapem obliczania ekonomicznej opłacalności instalacji PV na badanych obiektach, ponieważ na dalszych etapach należy wziąć pod uwagę takie czynniki jak na przykład: wpływ warunków pogodowych (zachmurzenie i mgły), zanieczyszczenie atmosfery, nośność dachu (która może ograniczać powierzchnię instalacji paneli), ostateczny kształt i liczbę paneli, a także kąt nachylenia, pod jakim zostaną zainstalowane. Nie bez znaczenia są także straty w poszczególnych elementach samej instalacji, a także obowiązujące normy prawne.

Podziękowania. Niniejszy artykuł powstał na podstawie danych z lotniczego skanowania laserowego projektu ISOK. Zespół Autorów jest wdzięczny Recenzentom za cenne wskazówki i korekty, które znacząco wpłynęły na jakość artykułu.

Finansowanie. Publikacja artykułu została sfinansowana z funduszu dydaktycznego Dziekana Wydziału Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska AGH przekazanego do dyspozycji Koła Naukowego KNGK Geoinformatyka.

Literatura (References)

Berent-Kowalska Grażyna, Kacprowska Joanna, Moskal Iwona, Jurgaś Aureliusz, Kacperczyk Grzegorz, 2016: Energia ze źródeł odnawialnych w 2015 r. (Energy from renewable sources, 2015) Główny Urząd Statystyczny, Departament Produkcji, Ministerstwo Energii, Agencja Rynku Energii S.A. <http://stat.gov.pl/obszary-tematyczne/srodowisko-energia/energia/energia-ze-zrodel-odnawialnych-w-2015-roku,3,10.html#>

- Encyklopedia PWN – wersja internetowa (The PWN Encyclopaedia – Internet version). Dostęp 30.08.2017 r. <http://encyklopedia.pwn.pl/>
- Fotowoltaika24 – Blog o fotowoltaice i tematach pokrewnych (Blog about photovoltaics and related topics). Dostęp 18.09.2017 r. <http://www.fotowoltaika24.info.pl/systemy-mocowan-paneli-fotowoltaicznych/>
- GUS, 2016: Bank Danych Lokalnych – Rynek materiałowy i paliwowo-energetyczny – Rynek materiałowy – Produkcja energii elektrycznej wg źródeł (The material and fuel-and energy market – Electric energy production by sources). Dostęp 30.08.2017 r. <https://bdl.stat.gov.pl/BDL/dane/podgrup/teryt>
- Krawczyk Artur, 2013: Podsumowanie zajęć dydaktycznych Koła Naukowego Studentów AGH w zakresie grafiki komputerowej (Summary of teaching computer graphics to members of the AGH student association). *Roczniki Geomatyki* 11(5): 43-49, Warszawa, PTIP.
- Reda Ibrahim, Andreas Afshin, 2008: Solar Position Algorithm for Solar Radiation Applications, National Renewable Energy Laboratory, Technical Report NREL/TP-560-34302.
- SIPMuszyna, 2017: Kataster Słoneczny, Systemu Informacji Przestrzennej Miasta i Gminy Uzdrowskiej Muszyna (The solar cadastre, The Spatial Information System of the Muszyna Spa Town and Municipality). Dostęp 18.09.2017 r. www.sip.muszyna.pl
- Stronka Maciej, Masłowski Adam, 2015: Energia słoneczna w Polsce – nasłonecznienie (The solar energy in Poland – insolation) [W:] Poradnik Projektanta Adam Masłowski. Dostęp 29.01.2018 r. <https://poradnikprojektanta.pl/energia-sloneczna-w-polsce-naslonecznienie/>
- Śleszyński Przemysław, Degórski Marek, 2011: Mapa nr 20 Zasoby Energii Odnawialnej, mapa diagnostyczna w Koncepcji Przestrzennego Zagospodarowania Kraju 2030 (The map no.20 – Renewable energy resources, diagnostic map according to the Concept of the Spatial Management of Poland, 2030). 25.01.2011. Warszawa, Ministerstwo Rozwoju Regionalnego. Dostęp 18.09.2017 r. http://mr.bip.gov.pl/fobjects/download/48504/mapa_20_energia_odnawialna_230112-pdf.html
- Tatar-Kieć Dorota, 2015: Określenie przydatności narzędzi GIS-owych do tworzenia katastru słonecznego oraz lokalizacji instalacji solarnych (Determination of usefulness of GIS tools for creation of the solar cadastre and location of solar installations). Praca końcowa, Studia Podyplomowe w zakresie Systemów Informacji Geograficznej AGH WGGIIS Kraków, promotor dr inż. Artur Krawczyk, praca niepublikowana.
- Witkowska Aleksandra, Bielecka Elżbieta, 2014: Wykorzystanie danych ze skaningu laserowego do analizy nachylenia i ekspozycji dachów w celu montażu kolektorów słonecznych (The use of data from laser scanning to analyze the slope and the exposure of roofs for the assembly of solar collectors), *Biuletyn WAT LXIII* (2).
- Yadao Richard Dean, Madalipay Jholeeh Charls, Alibuyog Nathaniel, Utrera Rodel, Galacgac Evageline, 2017: Solar Resource Assessment of Batac City, Ilocos Norte, Philippines using Airborne Lidar and Topography-based Solar Model – As Part of the Renewable Energy Resource Assessment of Phil-Lidar 2 Program. *Proceedings of Conference GISTAM 2017*: 231-236, Porto, Portugal.

Streszczenie

Przedmiotem przeprowadzonych badań było określenie potencjału ekspozycji słonecznej wybranych dachów w celu sprawdzenia ich przydatności dla montażu instalacji fotowoltaicznej. Teren badań objął wybrane obiekty z dwóch dzielnic miasta Nowy Sącz: Biegonice i Dąbrówka. Analizie poddano zarówno obiekt przemysłowy – halę fabryki CARBON SA., jak i budynki zabudowy mieszkalno-gospodarczej, charakterystycznej dla tego rejonu zabudowy wiejskiej. Do analizy zakwalifikowano łącznie 14 połaci dachowych zabudowy wiejskiej oraz 10 połaci dachowych zabudowy przemysłowej. Przebadano dachy jednorodowe, dwuspadowe, wielopołaciowe i płaskie, które następnie na podstawie chmury punktów będącej produktem lotniczego skaningu laserowego zwektoryzowano do postaci trójwymiarowych poligonów odwzorowujących połacie dachowe.

Modele wektorowe dachów wykonano w aplikacji typu CAD, gdzie również dokonano wcześniej filtracji chmury punktów, a następnie zwektoryzowano połacie dachowe w przestrzeni trójwymiarowej. W przypadku obiektu przemysłowego zwektoryzowano również obiekty sąsiadujące, które mogą wpływać na zacinienie dachów hali fabrycznej. Do obliczeń nasłonecznienia wykorzystano narzędzie

Kalkulator Słoneczny (Solar Exposure Calculator), który pozwala na oszacowanie ekspozycji słonecznej dla konkretnego dachu, jego usłonecznienia oraz nasłonecznienia. Wykonano obliczenia dobowe dla czterech charakterystycznych dni w roku – najdłuższego, najkrótszego i dwóch dni równonocy. Wyniki zostały zaprezentowane w postaci ilustracji oraz w formie tabelarycznej. Analiza pozwoliła zidentyfikować i zwaloryzować połacie dachowe pod względem obliczonych wartości nasłonecznienia oraz ustalić wpływ zacienienia generowany przez obiekty sąsiadujące. Na zakończenie artykułu przedstawiono szczegółowe wnioski z wykonanej analizy oraz wskazano na korzyści z realizacji tego typu obliczeń.

Abstract

The subject of the research was to determine the solar exposure potential of selected roofs in order to check their suitability for installation of solar panels. The research area covered selected objects from two districts in Nowy Sącz: Biegonice and Dąbrówka. The analysis was conducted both, for an industrial building - the hall of the CARBON SA Plant and residential and farm buildings typical for the rural region. A total number of 14 roofs of rural buildings and 10 roofs of industrial buildings were considered during the analysis. The research was carried out for different kinds of roofs – pitched, gable, multi-pitched and flat. They were vectorised and converted into three-dimensional polygons on the basis of the point cloud resulting from aerial laser scanning.

Vector models of roofs were prepared in a CAD type application, where the point clouds were also pre-filtered and then roofs were vectorized in the three-dimensional space. In the case of an industrial facility, neighbouring buildings were also inspected which might overshadow the plant roofs. Solar Calculator [Solar Exposure Calculator] was used to calculate solar radiation, which allows to estimate solar exposure and insolation for a particular roof. Diel calculations were made for four characteristic days of the year - the longest and the shortest day and two equinox days.

The results were presented in the form of illustrations and tables. The analysis allowed to identify and calibrate roof slopes in terms of the calculated values of insolation and to determine the overshadowing effect generated by neighbouring objects. At the end of the paper, conclusions from the analysis were presented and the benefits of this type of calculation were pointed out.

Dane autorów / Authors details:

dr inż. Artur Krawczyk
<https://orcid.org/0000-0002-1864-0327>
artkraw@agh.edu.pl

Marta Zygmunt
<https://orcid.org/0000-0001-6126-7524>
marta.anna.zygmunt@gmail.com

Marcin Zajac
mr.marcinzajac@outlook.com

Maria Zawisza
zawisza_m@interia.pl

Anna Żądło
annazadlo888@gmail.com

Przesłano / Received 31.12.2017
Zaakceptowano / Accepted 31.01.2018
Opublikowano / Published 15.05.2018