



Wykorzystanie danych z lotniczego skaningu laserowego do analizy nachylenia i ekspozycji dachów w celu montażu kolektorów słonecznych

ALEKSANDRA WITKOWSKA, ELŻBIETA BIELECKA

Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Inżynierii Lądowej i Geodezji,
Instytut Geodezji, Zakład Systemów Informacji Geograficznej,
00-908 Warszawa, ul. gen. S. Kaliskiego 2, rosinska@wp.pl; ebielecka@wat.edu.pl

Streszczenie. Ograniczone zasoby złóż paliw oraz ich rosnąca cena na rynku, a także postępujące w ostatnich latach zmiany klimatyczne sprawiły, że coraz więcej uwagi poświęca się środowisku oraz odnawialnym źródłom energii. Wychodząc naprzeciw wymienionym problemom, w artykule podjęto próbę analizy geometrii dachów wybranego osiedla domów jednorodzinnych w kontekście montażu kolektorów słonecznych. Do badań nad przedstawionym zagadnieniem wykorzystano dane pochodzące z lotniczego skaningu laserowego oraz obrysy budynków. Na użytek gospodarstw domowych dachy budynków wydają się być najodpowiedniejszą lokalizacją do montażu kolektorów słonecznych, dlatego przeprowadzone analizy zawężono do tych obszarów. Z uwagi na specyfikę samych urządzeń w analizach uwzględniono kilka czynników, takich jak: efekt zacienienia, minimalna powierzchnia, jak również nachylenie czy orientacja połaci dachowych. Właściwie dobrane kryteria klasyfikacyjne rastrowych modeli spadków, ekspozycji i usłonecznienia umożliwiły wskazanie obszarów dogodnych pod względem montażu kolektorów słonecznych, a tym samym stały się podstawą do określenia indywidualnych „predyspozycji słonecznych” dachów zabudowy mieszkalnej.

Słowa kluczowe: lotniczy skaningu laserowy, słoneczny kataster, numeryczny model pokrycia terenu (NMPT), zacienienie, panele słoneczne

1. Wprowadzenie

Z najnowszych badań przeprowadzonych przez Instytut Energetyki Odnawialnej wynika, że rok 2012 okazał się w Polsce być rekordowy pod względem sprzedaży kolektorów słonecznych — aż 302 tys. m² zainstalowanej powierzchni,

co odpowiada 211,4 MW mocy cieplnej [27]. W konsekwencji takiego wzrostu łączna powierzchnia zainstalowanych i użytkowanych instalacji solarnych w ubiegłym roku osiągnęła poziom 1,2 mln m² (840 MW mocy cieplnej). Chociaż wśród źródeł energii odnawialnej (OZE) wymienia się: Słońce, wiatr, ciepło geotermalne, biomasę, instalacje wodne oraz ruch morza [17], to kolektory słoneczne stanowią drugą, po energetyce wiatrowej, technologię OZE w Polsce. Instalacje solarne są przede wszystkim wykorzystywane do wytwarzania prądu oraz podgrzewania wody. Jednak oprócz wcześniej wymienionych zastosowań mają również pośredni udział w chłodzeniu pomieszczeń.

Pod nazwą mapa potencjału słonecznego dachów, znaną również jako słoneczny kataster, kataster dachowy lub mapa i atlas słoneczny [13], kryje się mapa udostępniana najczęściej w Internecie w postaci geoportalu, umożliwiająca użytkownikowi ocenę opłacalności inwestycji w ogniwa fotowoltaiczne. Historia mapy potencjału słonecznego dachów jest dość krótka, bo sięga roku 2008, kiedy to dokonano pierwszego wdrożenia portalu o omawianej tematyce dla miasta Osnabrück w Niemczech [1]. Właśnie ten kraj jest liderem tworzenia map potencjału słonecznego dachów. Następne w kolejności są Stany Zjednoczone, które w ramach federalnego programu Solar American Cities zainwestowały w mapy potencjału słonecznego dachów dla sześciu miast, między innymi dla Bostonu i Detroit. Pojedyncze wdrożenia można odnotować również w Austrii, Chile oraz Kanadzie. W Polsce na realizację podobnego projektu zdecydowała się tylko Warszawa, której władze w drugiej połowie 2012 roku ogłosiły przetarg na wykonanie mapy potencjału energii słonecznej stolicy. Zamówienie obejmuje swym zasięgiem powierzchnię dachów około 232 tys. budynków zawartych w granicach administracyjnych miasta [16].

2. Problemy badawcze słonecznego katastru

W badaniach nad możliwością stworzenia słonecznego katastru wykorzystywane są z reguły cyfrowe modele zabudowy, zbiory punktów z pomiaru lidarowego, Numeryczny Model Pokrycia Terenu (NMPT), Numeryczny Model Terenu (NMT) i znormalizowany Numeryczny Model Pokrycia Terenu (nNMPT). Proces przetworzenia danych wejściowych dzieli się na trzy etapy:

1. Detekcja budynków — identyfikacja punktów pozyskanych z lotniczego skaningu laserowego należących do budynków, tzw. punktów budynkowych.
2. Rekonstrukcji budynków, czyli odtworzenie ich brył polegające na opracowaniu modelu, który daje pogląd o wymiarach, kształcie, a także typie dachu.
3. Analizy potencjału słonecznego, umożliwiającej śledzenie w kreślonym interwale czasu przestrzennego rozkładu promieniowania słonecznego (Wh/m²) w obszarze dachów.

2.1. Detekcja budynków

W większości przypadków proces wykrywania budynków odbywa się na podstawie danych z lotniczego skaningu laserowego, przetworzonych do postaci rastrowego modelu danych. Wybranie tej metody na etapie detekcji powoduje redukcję danych źródłowych, ale również skraca czas wykonywania operacji. Do detekcji budynków wykorzystuje się Numeryczny Model Pokrycia Terenu (NMPT) lub znormalizowany Numeryczny Model Pokrycia Terenu (nNMPT) oraz charakterystyczne cechy szczególne budynków, które wyróżniają je od innych obiektów terenowych (np. roślinności) [26]. Tymi cechami charakterystycznymi mogą być: różnice wysokości, krzywizna oraz homogeniczność wektorów normalnych do badanej powierzchni [19].

Budynki mogą być również wykryte bezpośrednio w drodze przetwarzania chmury punktów z lotniczego skaningu laserowego. Algorytm umożliwiający detekcję budynków bezpośrednio z chmury punktów opracowali Dorninger i Pfeifer [7]. Założyli oni, że obrys budynku można pozyskać poprzez zrzutowanie zidentyfikowanych wcześniej punktów na płaszczyznę poziomą, a następnie wygładzenie uzyskanych konturów. Z kolei rozwiązanie Höflego i współautorów [10] wykorzystuje model rastrowy oraz zbiór punktów pozyskanych techniką LiDAR. Autorzy na podstawie chmury punktów wyliczają dla każdego elementu zbioru *Echo Ratio* (*ER*)¹, a następnie przeprowadzają interpolację zbioru danych punktowych w oparciu o otrzymane dla nich wartości *ER*. Dalsze analizy, które mają doprowadzić do detekcji budynków, wykonują na modelu rastrowym. Inni autorzy włączają do danych źródłowych także dane pomocnicze, takie jak obrazy wielospektralne [18, 19, 22] czy wektorowe obrysy przyziemi zabudowy pozyskane z różnych zbiorów danych lub z katastru [3, 18].

2.2. Rekonstrukcja budynków

Metody rekonstrukcji modeli 3D budynków można podzielić na trzy grupy [2, 8, 21]. Rekonstrukcja może być przeprowadzona na predefiniowanych kształtach dachów dostępnych w bibliotekach BDA — *model driven* lub na danych automatycznie określonych z chmury punktów opisujących kształt dachów i budynków — *data driven*. Istnieje także trzecie rozwiązanie będące kombinacją wyżej wymienionych metod posługujące się technikami eksploracji danych (*data mining*).

Pierwsze podejście wykorzystuje bibliotekę zaopatrzoną w podstawowe modele budynków. W zależności od danych źródłowych, z dostępnego zestawu schematów algorytm dobiera najbardziej odpowiedni szablon lub ich kombinację. Otrzymane modele są zawsze poprawne topologicznie, a skomplikowane kształty nie są

¹ *Echo Ratio* (*ER*) jest miarą lokalnej szorstkości terenu.

odtworzone wiarygodnie, ponieważ biblioteka BDA zawiera ograniczoną liczbę modeli. Z uwagi na to podejście *model driven* jest wykorzystywane przede wszystkim do zbiorów charakteryzujących się małą gęstością punktów.

Drugie rozwiązanie — *data driven* — posługuje się nadliczbowością danych w zbiorze punktów z pomiaru lidarowego lub obrazów cyfrowych, co czyni je skutecznym dla danych źródłowych o dużej gęstości punktów. Dane wejściowe są poddane procesowi segmentacji na grupy punktów lub pikseli przypisanych do tego samego detalu. W tej koncepcji istotne znaczenie odgrywają zależności pomiędzy szczegółami, segmentami obiektów i sposób, w jaki obiekt jest prezentowany przez dane, gdyż te czynniki decydują o przynależności punktu do konkretnego segmentu.

Całkiem nowe podejście do zagadnienia rekonstrukcji modeli 3D budynków zaproponowała Borowiec [3, 4]. Swoją myśl oparła na regularnych teselacjach, dzielących chmurę punktów na prostopadłościany zwane wokselami². W pierwszej fazie każdy element prostopadłościanu analizowany jest indywidualnie w celu aproksymacji płaszczyzn na podstawie punktów znajdujących się w jego wnętrzu. Następnie woksele są scalane w większe skupiska. Proces łączenia polega na odnajdywaniu podobieństw wśród wyaproksymowanych płaszczyzn. Ostatnim krokiem koncepcji jest odtworzenie kształtu dachu na podstawie wyłonięnych połączeń dachowych. W tym celu autorka wykorzystwała metodę opartą na zasadzie dziel-łącz (ang. *split-merge*) [4].

2.3. Analiza potencjału słonecznego

Promieniowanie słoneczne, które dociera do powierzchni naszej planety, ulega osłabieniu w wyniku przejścia przez atmosferę. Dodatkowo jest ono silnie powiązane z topografią terenu oraz z samym otoczeniem: zabudową, drzewami czy roślinami znajdującymi się w bezpośrednim sąsiedztwie badanego obiektu. Wymienione bariery topograficzno-architektoniczne przyczyniają się do osłabienia strumienia energii promieniowania, co w następstwie prowadzi do powstania zacienienia [28]. Do powierzchni, które zorientowane są poziomo, dociera promieniowanie bezpośrednie i rozproszone, zwane również promieniowaniem dyfuzyjnym. Gdy badamy powierzchnię dowolnie zorientowaną, wówczas pojawia się kolejny składnik promieniowania słonecznego — promieniowanie odbite od otoczenia [6, 11]. Całkowite promieniowanie słoneczne można mierzyć za pomocą naziemnych stacji meteorologicznych, satelitów meteorologicznych lub szacować z wykorzystaniem modeli matematycznych [24]. Literatura opisuje i wykorzystuje w wizualizacji potencjału słonecznego dachów modele matematyczne: SOLPOS Code [12], model opracowany przez *Joint Research Centre (JRC)* dla portalu *pvGIS*, czy *Solar Radiation* firmy ESRI [5, 14].

² Woksel (ang. *volumetric element*, w skrócie *Voxel*) — najmniejszy element przestrzeni w grafice trójwymiarowej, w pewnym sensie odpowiednik piksela w grafice dwuwymiarowej.

3. Analiza nachylenia, ekspozycji i nasłonecznienie budynków jednorodzinnych. Studium przypadku

3.1. Obszar badań i dane źródłowe

Obszar badań prezentuje osiedle mieszkaniowe położone na przedmieściach miasta Nysa w województwie opolskim (rys. 1), swym zasięgiem obejmuje powierzchnię około 9,8 ha. Zabudowę osiedla stanowią w przeważającej większości wolno stojące budynki mieszkalne jednorodzinne lub domy w zabudowie szeregowej. W sąsiedztwie gospodarstw domowych rośnie niska i średnia roślinność.



Rys. 1. Lokalizacja obszaru badań

Do analizy wykorzystano dane z lotniczego skaningu laserowego pozyskane w ramach ogólnokrajowego projektu o nazwie Informatyczny System Osłony Kraju przed nadzwyczajnymi zagrożeniami (ISOK), pochodzące z Centralnego Ośrodka Dokumentacji Geodezyjnej i Kartograficznej. Do analiz wybrano zbiór punktów w Standardzie II, o dokładnościach przedstawionych w tabeli 1.

TABELA 1
Parametry dokładnościowe danych z lotniczego skaningu laserowego
Standard II (GUGiK 2012)

Nazwa parametru	Wartość
dokładność wysokościowa m_h	$\leq 0,10$ m
dokładność sytuacyjna m_p	$\leq 0,40$ m
średnia gęstość punktów na 1 m ²	12

Obrysy przyziemi budynków pozyskano z warstwy tematycznej *budynki*, wchodzącej w skład Bazy Danych Obiektów Topograficznych (BDOT10k). Stopień szczegółowości opracowania BDOT10k odpowiada mapie w skali 1:10000. Warstwa dotycząca budynków zawiera między innymi informacje dotyczące pełnionej funkcji, co pozwoliło ograniczyć analizy tylko do budynków przeznaczonych na cele mieszkalne.

Do analizy danych wykorzystano moduł Solar Radiation, będący częścią środowiska ArcGIS Desktop 10.0. Moduł ten nie uwzględnia promieniowania odbitego, tak więc wyliczone całkowite nasłonecznienie stanowi sumę promieniowania bezpośredniego i rozproszonego [9].

3.2. Założenia wstępne

Strefa na dachu przeznaczona pod instalacje solarne musi spełniać szereg warunków. Przyjęte kryteria dotyczą miejsca przeznaczonego pod montaż oraz jego minimalnej powierzchni i parametrów orientacji, czyli kąta nachylenia i kąta ekspozycji. Powierzchnia pojedynczego panelu kolektora płaskiego wynosi od 2 do 2,5 m², zaś na zaspokojenie potrzeb czteroosobowego gospodarstwa domowego potrzebne są minimum dwa zasobniki. Biorąc te informacje pod uwagę, w analizach przyjęto, że minimalna powierzchnia dachu konieczna do instalacji kolektorów wynosi $P_{\min} = 5 \text{ m}^2$.

Nie mniej ważny jest fakt, by instalacja solarna umieszczona we wskazanej na dachu strefie nie była zacieniona w ciągu swojej pracy. Aby praca kolektora słonecznego była wydajna, powinien on pracować minimum 6 godzin w ciągu doby. Z tego względu wytypowano rejony, do których dochodzi promieniowanie słoneczne co najmniej przez 6 godzin w ciągu najkrótszego i najdłuższego dnia w roku (21 grudnia i czerwca).

W badaniach założono, że kolektory słoneczne instalowane będą dokładnie w płaszczyźnie dachu, a zatem zarówno nachylenie połączy dachowych, jak i ekspozycja muszą spełniać określone wymagania. Przez kąt nachylenia rozumiemy kąt między poziomem a powierzchnią kolektora słonecznego, w naszym przypadku powierzchnią połączy dachu. Kolektory słoneczne o całorocznym okresie wykorzystania są nachylone do poziomu pod kątem $\beta = \varphi \pm 15^\circ$, gdzie φ oznacza szerokość geograficzną. W Polsce w myśl tej zasady kąt nachylenia kolektora powinien wynosić od 34° do 70° ($49^\circ \leq \varphi \leq 55^\circ$). Wieloletnie obserwacje prowadzone przez Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej wykazały, że optymalny w warunkach klimatycznych Polski kąt nachylenia powierzchni kolektora płaskiego eksploatowanego w ciągu roku wynosi $\beta = 40^\circ$, z dużym zróżnicowaniem w poszczególnych okresach wykorzystania. Z kolei kąt ekspozycji określa odchylenie płaszczyzny kolektora (płaszczyzny połączy dachu) od kierunku południowego. Kąty nachylenia i ekspozycji to parametry, które są ściśle ze sobą powiązane i mają duży wpływ na uzysk energii przez ogniwa fotowoltaiczne. Ową zależność przedstawiono w tabeli 2 prezentującej wpływ kąta

TABELA 2
Klasyfikacja kątów nachylenia i ekspozycji połaci dachowych ze względu na oszacowaną ilość rocznego nasłonecznienia

Nachylenie dachu	POŁUDNIE												Północ	Wschód	Północ	
	Północ	Zachód	Południowy - Zachód	70° - 51°	50° - 31°	30° - 11°	10° - 1°	0°	1° - 10°	11° - 30°	Południowy - Wschód	51° - 70°				71° - 90°
> 111°	100	101	102	103	104	105	106	106	106	105	104	103	102	101	100	KOD
0 - 10	85	85	85	85	85	85	85	85	85	85	85	85	85	85	85	200
11 - 20	75	85	90	90	95	95	95	95	95	95	95	95	90	90	85	201
21 - 30	75	80	85	90	95	100	100	100	100	100	100	95	90	85	80	202
31 - 40	70	75	85	90	95	100	100	100	100	100	95	90	85	75	70	203
41 - 50	70	70	80	90	95	100	100	100	100	100	95	90	80	70	70	204
51 - 60			75	85	90	95	100	100	100	95	90	85	75			205
61 - 70			70	80	85	90	95	95	95	90	85	80	70			206
71 - 80				75	80	85	85	85	85	85	80	75				207
81 - 90				70	75	75	80	80	80	75	75	70				208
> 291°	290° - 271°	270° - 251°	250° - 231°	230° - 211°	210° - 181°	180°	181° - 170°	171° - 150°	151° - 130°	131° - 110°	111° - 90°	91° - 70°	71° <			

Źródło: SUN-AREA ze zmianami, 2011.

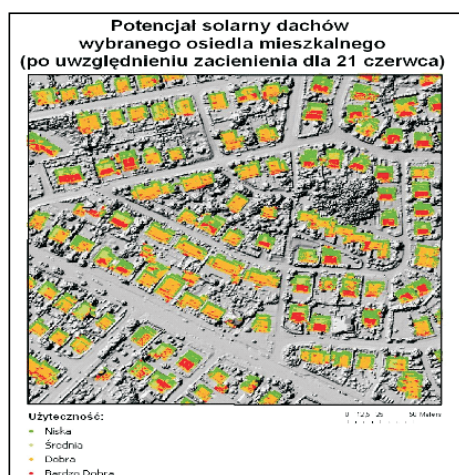
nachylenia i kąta ekspozycji (azymutu) na oszacowaną wielkość promieniowania słonecznego [25]. Kąty nachylenia sklasyfikowano w dziewięciu grupach z progiem próbkowania 10° . Kąty ekspozycji przyporządkowano do dwunastu grup. Jedna z nich zawiera przedział od 290° W do 70° E, zaś pozostałych jedenaście zawiera się w przedziałach 20-stopniowych. Znając kąt nachylenia połaci dachu oraz jej azymut, możemy oszacować roczne nasłonecznienie wyrażone w procentach.

3.3. Metoda badań

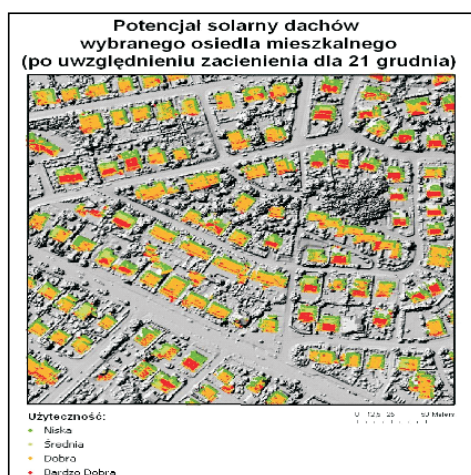
Ze zbioru chmury punktów wygenerowano NMPT, który zapisano w formacie rastrowym o rozdzielczości przestrzennej $0,5 \text{ m}^2$. Tak utworzony NMPT zawierał kompletną informację o elementach znajdujących się na powierzchni terenu w chwili wykonywania nalotu. Wśród nich znalazła się zabudowa, wysoka i niska zieleń przydomowa, elementy infrastruktury technicznej oraz inne obiekty, na przykład samochody, tablice reklamowe, które potencjalnie osłabiają ilość docierającego promieniowania słonecznego do powierzchni terenu. Z tego modelu następnie wyodrębniono budynki mieszkalne, bazując na wektorowej warstwie budynków zgromadzonej w BDOT10k.

Tak przygotowane dane umożliwiły obliczenie nachylenia i ekspozycji połaci dachowych i stanowiły podstawę do oszacowania rocznego nasłonecznienia wyrażonego w procentach. NMPT został wykorzystany także do zamodelowania zacienienia dachów w dwóch wybranych dniach roku, tj. 21 grudnia i 21 czerwca,

a)



b)



Rys. 2. Mapa potencjału solarnego dachów po uwzględnieniu zacienienia: a) 21 czerwca; b) 21 grudnia

dzięki czemu wyznaczono miejsca charakteryzujące się ograniczonym dostępem do promieniowania słonecznego, tj. takie, do których promieniowanie w ciągu dnia dociera przez mniej niż 6 godz. i dłużej niż 6 godz. Ostatni etap analiz polegał na graficznym przedstawieniu otrzymanych wyników. Pokazane na rysunku 2 mapy obrazują w czterostopniowej skali potencjał solarny dachów osiedla jednorodzinnego w Nysie w najdłuższym i najkrótszym dniu roku.

4. Analiza wyników

Na badanym obszarze o powierzchni 9,8 ha znajduje się 135 budynków, z czego 126 to budynki mieszkalne. Powierzchnia dachów poddanych analizie zajmuje 2,3 ha, co stanowi około 23% analizowanego terenu. Budynki mają różne kształty dachów, od płaskich po dachy dwuspadowe i wielopołaciowe z lukarnami. Połacie dachowe nachylone są przeważnie pod kątem od 20° do 40°. Dachy płaskie lub o niewielkim nachyleniu (tab. 3a) stanowią 15% analizowanej powierzchni.

Poddając analizie kąty ekspozycji, można zauważyć, że zaledwie 8% powierzchni zajmowanej przez połacie dachowe jest zorientowane w kierunku południowym, zawiera się w przedziale od 170° do 190°. Połacie dachowe zorientowane w kierunku północnym, północno-wschodnim i północno-zachodnim stanowią 37%. Taka ekspozycja jest najmniej korzystna pod montaż instalacji solarnych (tab. 3b).

TABELA 3

Rozkład powierzchni zajmowanej przez dachy w zależności od (a) kąta nachylenia, (b) kąta ekspozycji (azymutu)

(a)	Kąt nachylenia		(b)	Kąt ekspozycji (azymut)	
	[°]	[m ²] [%]		[°]	[m ²] [%]
	<0-10>	3489 15		<0-70> u (290-360>	8388 37
	(10-20>	2036 9		(70-90> u (270-290>	2741 12
	(20-30>	2177 10		(90-110> u (250-270>	2846 12
	(30-40>	3120 14		(110-130> u (230-250>	2201 10
	(40-50>	1958 9		(130-150> u (210-230>	2287 10
	(50-60>	1829 8		(150-170> u (180-210>	2587 11
	(60-70>	2926 13		(170-190>	1726 8
	(70-80>	4497 20		Suma =	22776 100
	(80-90>	745 3			
	Suma =	22776 100			

W pierwszym etapie analizy stopnia przydatności dachów na potrzeby montażu instalacji solarnych uwzględniono tylko elementy ich orientacji, a mianowicie nachylenie i ekspozycję. W tym celu przeanalizowano łącznie kąty nachylenia i ekspozycji, a wyniki tej analizy zamieszczono w kolumnach 2 i 3 tabeli 4. Najliczniejsza grupa, stanowiąca aż 36%, to powierzchnie sklasyfikowane jako dobre (tab. 4). W klasie bardzo dobrej, najbardziej pożądanej przez potencjalnych inwestorów, znalazło się zaledwie 14% analizowanego obszaru dachów. Z kolei aż 34% przeanalizowanych powierzchni charakteryzuje się niską użytecznością.

TABELA 4

Zestawienie powierzchni zajmowanej przez dachy przed uwzględnieniem zacienienia i po nim

Klasa przydatności	Zajmowana powierzchnia					
	bez zacienienia		z zacienieniem			
			21 grudnia		21 czerwca	
[%]	[m ²]	[%]	[m ²]	[%]	[m ²]	[%]
1	2	3	4	5	6	7
Niska	7772	34	2729	12	5242	23
Średnia	3667	16	2613	11	3241	14
Dobra	8195	36	7104	31	7738	34
Bardzo dobra	3143	14	2781	12	2974	13
Suma	22776	100	15228	67	19194	84

W drugim etapie analizy uwzględniono zacienienie spowodowane zarówno przez topografię terenu, jak i obiekty znajdujące się w sąsiedztwie badanego budynku (tab. 4, kolumny 4-7). Uwzględnienie tego czynnika spowodowało zmniejszenie przydatnej powierzchni w każdej z klas, w obu analizowanych okresach. W dniu 21 grudnia spadek ten wyniósł aż 33%, natomiast 21 czerwca 16%.

Udział powierzchni w poszczególnych klasach również uległ zmianie w porównaniu do danych nieuwzględniających zacienienia. Interesujące jest to, że powierzchnia w każdej z czterech klas dla 21 grudnia zmalała o 2/3, a dla 21 czerwca o 1/3.

Spośród 126 budynków mieszkalnych znajdujących się na badanym obszarze 37 charakteryzuje się bardzo dobrymi, zaś 89 dobrymi warunkami do instalacji paneli słonecznych. Użyteczność pozostałych zabudowań można uznać za średnią i niską, czyli najmniej atrakcyjną w badanym kontekście. W analizie uwzględniono nie tylko efekt zacienienia, lecz także minimalny wymiar powierzchni dachu niezbędnej do instalacji kolektorów (P_{\min}). Na potrzeby przeprowadzonego eksperymentu badawczego przyjęto, że minimalna powierzchnia wynosi co najmniej 5 m².

5. Wnioski

W wyniku analiz określono stopień przydatności dachów do instalacji paneli słonecznych. Powierzchnie dachów przyporządkowano do jednej z czterech klas użyteczności, określanych jako: niska, średnia, dobra i bardzo dobra. Opłacalność korzystania z paneli słonecznych w dużym stopniu uzależniona jest od geometrii dachów budynku. Mapy potencjału solarne (słonecznego katastru) pomagają potencjalnemu inwestorowi w podjęciu decyzji, czy inwestycja w panele słoneczne jest opłacalna.

Wizualizacja wyników pozwala zaobserwować, że geometrie dachów typowego osiedla mieszkalnego spełniają kryteria dotyczące montażu kolektorów słonecznych przy założeniu, że instalacja będzie umieszczona w płaszczyźnie dachu. Istnieje również możliwość poprawy wyników przez indywidualne skorygowanie orientacji paneli słonecznych, co nie było przedmiotem pracy. Przedstawione wyniki potwierdzają przekonanie, że każdy budynek należy analizować indywidualnie, ponieważ na końcowe wyniki ma wpływ nie tylko charakterystyka położenia płaszczyzny dachu, lecz także sąsiedztwo obiektów powodujących zacienienie. Sąsiedztwo innych obiektów w znacznym stopniu wpłynęło na końcowe wyniki analiz, przyczyniając się do redukcji powierzchni nadającej się pod montaż kolektorów słonecznych.

Artykuł wpłynął do redakcji 11.02.2013 r. Zweryfikowaną wersję po recenzji otrzymano 24.03.2014 r.

LITERATURA

- [1] BOLKOWSKI J., *Słoneczne katastry*, Administrator, 5, 2011, 37-38.
- [2] BUJAKIEWICZ A., PREUSS R., *Ocena możliwości automatycznej rekonstrukcji 3D modeli budynków z danych fotogrametrycznych*, Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji, 19, 2009, 23-33.
- [3] BOROWIEC N., *Generowanie trójwymiarowego modelu budynku na podstawie danych lidarowych*, Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji, 20, 2009, 47-56.
- [4] BOROWIEC N., *Budowa modelu budynku na podstawie danych z ewidencji gruntów i budynków oraz lotniczego skaningu laserowego*, Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji, 21, 2010, 43-52.
- [5] CHAVES A., BAHILL A.T., *Locating Sites for Photovoltaic Solar Panels. Pilot study uses DEM derived from LiDAR*, ArcUser, 13, 4, 2010, 24-27.
- [6] CHWIEDUK D., *Dostępność promieniowania słonecznego do obudowy budynku zlokalizowanego w Polsce Centralnej*, Polska Energetyka Słoneczna, 1-4, 2008, 46-56.
- [7] DORNINGER P., PFEIFER N., *A comprehensive automated 3D approach for building extraction, reconstruction, and regularization from airborne laser scanning point clouds*, Sensors, 8, 2008, 7323-7343.
- [8] ELBERINK S.O., *Problems in Automated Building Reconstruction based on Dense Airborne Laser Scanning Data*, The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science, Beijing, China, 37, WG III/3, 2008, 93-98.

- [9] ESRI, ArcGIS Desktop 10.0, 2013. <http://help.arcgis.com>.
- [10] HÖFLE B., MÜCKE W., DUTTER M., RUTZINGER M., DORNINGER P., *Detection of building regions using airborne LiDAR — A new combination of raster and point cloud based GIS methods, Proceedings of GI Forum — International Conference on Applied Geoinformatics*, Salzburg, Austria, 2009, 66-75.
- [11] ICKIEWICZ I., *Kolektory słoneczne — analiza opłacalności*, Polska Energetyka Słoneczna, 1, 2005, 13-15.
- [12] JOCHEM A., HÖFLE B., HOLLAUS M., RUTZINGER M., *Object Detection Airborne LiDAR data for improved solar radiation modeling in urban areas, The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Paryż, Francja, 38, 3/W8, 2009, 1-6.
- [13] KRÓLIKOWSKI J., *Słoneczny kataster*, Geodeta — Magazyn Geoinformacyjny, 1, 2011, 8-12.
- [14] LEVINSON R., AKBARI H., POMERANTZ M., GUPTA S., *Solar access of residential rooftops in four California cities*, Solar Energy, 83, 2009, 2120-2135.
- [15] MATIKAINEN L., HYYPPÄ J., HYYPPÄ H., *Automatic detection of bulding from laser scanner data for map updating, The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Dresden, Germany, 34, 3/W13, 2003.
- [16] MIASTO STOŁECZNE WARSZAWA, Biuro Zamówień Publicznych, 2013, <http://ogloszeniabzp.um.warszawa.pl/zamowienie.php?zamowienie=38301>.
- [17] NORWISZ J., MUSIELAK T., BORYCZKO B., *Odnawialne źródła energii — polskie definicje i standardy*, Rynek Energii, 1, 2006.
- [18] ROTTRNSTEINER F., BRIESE CH., *Automatic generation of building models from LIDAR data and the integration of aerial images*, The International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 34, 3/W13, 2003.
- [19] ROTTRNSTEINER F., TRINDER J., KUBIK K., *Automated delineation of roof planes from lidar data*, The International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 36, 3/W19, 2005, 221-226.
- [20] ROTTRNSTEINER F., *Automatic updating of building data bases from digital surface models and multi-spectral images: Potential and limitations*, The International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Istambuł, Turcja, 37, WG III/4, 2008, 265-270.
- [21] SAMPATH A., SHAN J., *Building roof segmentation and reconstruction from LiDAR point clouds using clustering techniques, The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 38, B3, 2008, 279-284.
- [22] SCHIEWE J., *Fusion and perceptual organization of features from multi-sensor data: general concepts and new developments, The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 37, B3, 2004, 605-610.
- [23] SOLAR AMERICAN CITIES, 2013. <http://solaramericancities.org>.
- [24] SUKIENNIK K., *Mapy potencjału słonecznego — ekomoda czy energetyczna szansa?*, ArcanaGIS Magazyn dla użytkowników oprogramowania ESRI, 8, 2013, 36-40.
- [25] SUN-AREA, *Research Project SUN-AREA Osnabrück, Solar-Roof Catastre Location study for photovoltaic panels with high resolution sensors (Laserscanning)*, Materiały konferencyjne, 2011.
- [26] TOVARI D., VÖGTLÉ T., *Object classification in laser scanning data*, The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science, 36, 8/W2, 2004, 45-49.
- [27] WIĘCKA A., SANTORSKA A., *Rozwój rynku kolektorów słonecznych w Polsce w 2012 r.*, VI Forum Przemysłu Energetyki Słonecznej, Toruń, 2012.

- [28] WITKOWSKA A., *Określenie zacielenia zabudowy jednorodzinnej na podstawie danych lotniczego skaningu laserowego*, Polskie Towarzystwo Informatyki Przemysłowej, Roczniki Geomatyki, t. 10, z. 4(54), 2012, 157-164.

A. WITKOWSKA, E. BIELECKA

**Analysis of exposure and slope of roofs for photovoltaics installation
based on airborne scanning data**

Abstract. The limited amount of fossil fuels, their growing price on the market and progressive climatical changes last years caused that more attention have been focused on environment and the renewable sources of energy. This paper presents the results of the analysis aiming at selection of roof areas suitable for the installation of photovoltaic devices. Airborne lasers scanning data combined with the digital topographic data were the basis for delimitation of the slope, exposure, and not shaded roof area.

Keywords: airborne lasers scanning, solar cadastre, digital surface model (DSM), solar radiation, shadowing, photovoltaics

