

OCENA POTENCJAŁU ENERGII SŁONECZNEJ W WARSZAWIE Z WYKORZYSTANIEM MODELU R.SUN

Estimating solar energy potential in Warsaw with the „r.sun” model

BARTOSZ CZERNECKI*, KATARZYNA JABŁOŃSKA**

Zarys treści. W pracy przedstawiono założenia metodyczne szacowania potencjału energii słonecznej w Warszawie. Symulacje GIS wykonano na podstawie uproszczonego, trójwymiarowego modelu zabudowy. Główną część obliczeń przeprowadzono dzięki otwartoźródłowemu modułowi *r.sun* dedykowanemu dla środowiska GRASS-GIS 6.4. Po pozytywnej weryfikacji symulacji testowych ze zdjęciami lotniczymi przystąpiono do stworzenia procedur automatyzacyjnych, które pozwoliły na skrócenie czasu obliczeń. Symulacje przeprowadzono z rozdzielczością 1 m² dla obszaru ponad 517 km², na klastrach obliczeniowych uruchamianych w środowisku GNU/Linux. W celu ograniczenia rozmiaru bazy danych rezultaty symulacji dla każdej godziny w roku ograniczono do powierzchni dachów budynków stosując binarną reklasyfikację danych (tj. 0 – obszar zacieniony, 1 – obszar nasłoneczniony). Syntetyczne warunki atmosferyczne parametrów insolacyjnych dla każdej godziny w roku uwzględniano w obliczeniach wartości promieniowania bezpośredniego, rozproszonego i całkowitego dla obszarów nasłonecznionych i zacienionych. Uzyskane wartości stanowiły następnie informację wejściową dla pozostałych modułów udostępnionego on-line kalkulatora energetycznego oceniającego potencjalną produkcję energii, wpływ inwestycji na środowisko oraz efekty ekonomiczne.

Słowa kluczowe: promieniowanie słoneczne, zacienienie, fotowoltaika, energia odnawialna, *r.sun*, GRASS, modelowanie GIS, Cities on Power

Abstract. This research shows the methodological assumptions related to estimating solar energy potential in Warsaw. All calculations were performed with the use of an open-source “r.sun” model available within the GRASS-GIS 6.4. software. Introductory simulations were validated against airborne images confirming the high quality of model calibration against astronomical and simplified 3D model of buildings in Warsaw. Subsequent automation procedures were created for the GNU/Linux supercomputing clusters in order to reduce computation time. To limit the final size of the database, results for the area of 517,000,000 square meters were clipped to cover the surface of rooftops only, using a binary data type (i.e. 0 – shadow, 1 – sunny areas) and synthetic atmospheric conditions (i.e. taking into account annual changes of sun declination, cloudiness, Linke atmospheric turbidity coefficient, etc.). Such a solution enables the following calculations: direct, diffuse and total solar radiation for every square meter of a building’s surface in Warsaw. The obtained GIS layers were then transformed as input information for other modules of a fully interactive IT-toolbox for estimating solar potential, which allows citizens and decision makers to estimate how much energy they can derive in a specific point from solar panels, when they can expect a return on their investment and how it will affect the natural environment.

Key words: solar radiation, shading, photovoltaics, renewable energy, *r.sun*, GRASS, GIS modeling, Cities on Power

Wstęp

Zgodnie z przyjętym pakietem klimatycznym produkcja energii elektrycznej z odnawialnych źródeł energii (OZE) w Unii Europejskiej powinna pokrywać przynajmniej 20% ogólnego bilansu zużycia energii w 2020 roku, przy jednoczesnej redukcji emisji dwutlenku węgla o 20% w porów-

naniu do roku 1990 (Dyrektywa PEiR 2009/29/WE). Cel ten nie jest identyczny dla wszystkich krajów członkowskich. W przypadku Polski wypracowane ustalenia przekładają się na wzrost udziału odnawialnych źródeł energii w finalnym zużyciu do poziomu przynajmniej 15% w roku 2020 i 20% w roku 2030 oraz zwiększenia stopnia dywersyfikacji źródeł i rozwoju energetyki rozproszonej (Ministerstwo Gospodarki 2009). Tymcza-

* Uniwersytet im. Adama Mickiewicza w Poznaniu, Wydział Nauk Geograficznych i Geologicznych, Instytut Geografii Fizycznej i Kształtowania Środowiska Przyrodniczego, Zakład Klimatologii, ul. Krygowskiego 10, 61-680 Poznań; e-mail: nwp@amu.edu.pl

** Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej – Państwowy Instytut Badawczy, ul. Podleśna 61, 01-673 Warszawa; e-mail: katarzyna.jablonska@imgw.pl

sem wśród wykorzystywanych źródeł produkcji energii elektrycznej w Polsce w dalszym ciągu dominujący udział (85,91%) przypada na złoża węgla kamiennego (51,28% – 2014 roku) i brunatnego (34,63% – 2014 roku) (Polskie Sieci Energetyczne 2015).

Po wstąpieniu Polski do Unii Europejskiej udział energetyki odnawialnej w całkowitej produkcji energii elektrycznej jest z roku na rok coraz większy, jednak dynamika wzrostu jest mniejsza niż w latach ubiegłych. Przykładowo, w latach 2008–2011, średnioroczny przyrost udziału produkcji elektrycznej z odnawialnych źródeł energii wyniósł 1,3% i był dwukrotnie wyższy w porównaniu do okresu 2011–2014. Obecnie wg Urzędu Regulacji Energetyki (stan na 2014 rok) OZE pokrywa 13,3% zapotrzebowania energetycznego kraju, z czego blisko połowa przypada na energię uzyskiwaną ze współspalania i biomasy. Oznacza to, że dalszy rozwój OZE musi odbywać się w kierunku bardziej przyjaznych środowisku metod pozyskiwania energii takich jak np. geotermia, hydroenergetyka, fotowoltaika czy energetyka wiatrowa. Spośród wymienionych gałęzi energetyki odnawialnej największa produkcja przypada na energię z wiatru, która w 2012 roku pokrywała ok. 3,2% zapotrzebowania krajowego przy średnim rocznym wzroście tego udziału na poziomie ok. 0,6–0,8%. Udział produkcji elektrycznej z hydroenergetyki waha się w granicach 1,5–2,5% w zależności od warunków hydrologicznych, przy czym długoterminowo nie obserwuje się znacznego przyrostu zainstalowanej mocy wytwórczej (Bajkowski, Górnikowska 2013). Na tle wyżej wymienionych OZE udział energii elektrycznej pochodzącej z energii słonecznej był najmniejszy i stanowił zaledwie 0,008% całości zapotrzebowania krajowego. Na uwagę zasługuje natomiast wysoka dynamika wzrostu zainstalowanej mocy pozyskiwanej z energii słonecznej. W 2015 roku zainstalowana moc osiągnęła 39,1 MW w porównaniu do 25,9 MW w roku 2014. Jednak w dalszym ciągu zainstalowana moc produkcyjna w przeliczeniu na mieszkańca jest kilkadziesiąt- lub kilkasetkrotnie mniejsza w porównaniu do krajów o bardzo zbliżonych warunkach aktywności (Niemcy – 474,1 W/os., Czechy – 196,1 W/os., Dania – 106,9 W/os.; Euroserv'ER 2015).

Mając na uwadze powyższe przesłanki podejmowane są różne inicjatywy dotyczące promocji OZE w Polsce, z uwzględnieniem wyznaczonych trendów dywersyfikacji, rozproszenia przestrzennego i optymalizacji produkcji z tych źródeł energii. Z tej perspektywy przez długie lata zaniedbywany był potencjał obszarów miejskich,

które odpowiadają za ponad 70% zużycia energii elektrycznej w krajach Unii Europejskiej. Jednym z projektów, który miał na uwadze wypełnienie istniejącej luki jest inicjatywa *Cities on Power*, która dąży do stworzenia interaktywnych narzędzi wspomagających proces decyzyjny inwestowania w OZE, a w konsekwencji realizacji wyznaczonego przez Unię Europejską progu 20% produkcji energii ze źródeł odnawialnych do roku 2020. Wspomniana inicjatywa dodatkowo uwzględnia założenia dyrektywy Unii Europejskiej 2010/31/EU zakładającej zerowy bilans energetyczny nowo powstających budynków od 2020 roku. Oznacza to, że nowe inwestycje będą musiały w optymalnym stopniu wykorzystywać dostępne źródła energii odnawialnej w miejscu potencjalnej inwestycji (Scognamiglio, Røstvik 2013).

W celu stworzenia odpowiednich narzędzi mogących wspomóc proces decyzyjny inwestowania w OZE bezpośrednio w miejscu, w którym energia ta jest zużywana, podjęto próbę stworzenia interaktywnej mapy potencjału energii słonecznej na dachach budynków w Warszawie w oparciu o rozwiązania systemów informacji geograficznych (GIS). W zamierzeniu autorów mapa warunków solarnych powinna możliwie dokładnie odzwierciedlać obszary predestynowane pod kątem inwestycji w energię słoneczną, przy jednoczesnym zapewnieniu możliwości szacowania potencjalnych kosztów ekonomicznych i środowiskowych planowanej inwestycji dla odbiorców końcowych.

Mając na uwadze powyższe przesłanki w niniejszym artykule podjęto próbę przedstawienia głównych założeń metodycznych wypracowanych algorytmów, które mogą służyć do oceny warunków solarnych w miastach, a które jednocześnie (1) mogą być stosowane w większości spotykanych warunków fizjonomii miast w Polsce, (2) w sposób szybki i efektywny pod względem obliczeniowym, (3) niewielkim nakładem inwestycyjnym, (4) w sposób precyzyjny (5) i łatwy do modyfikacji w przyszłości.

Dane i metody

Wieloletnie przestrzenne zróżnicowanie warunków aktywności w skali miasta (determinowanych czynnikami naturalnymi) jest zwykle stosunkowo niewielkie, zwłaszcza na obszarach o niezbyt skomplikowanej topografii terenu (Agugiaro i in. 2012). Najważniejszym czynnikiem modyfikującym wieloletnie zróżnicowanie przestrzenne warunków solarnych w skali miasta

są przeszkody terenowe związane ze zmianami krajobrazu wprowadzonymi przez człowieka (budynki, wiadukty, sztuczne zadrzewienia itd.), które z kolei powodują zwiększony udział obszarów zacienionych. Drugim istotnym elementem warunkującym potencjalną wielkość produkcji energii słonecznej jest zmętnienie atmosfery wynikające z obecności w obrębie miejskiej warstwy mieszanania zwiększonej koncentracji aerozoli. W obliczeniach klimatologicznych można przyjąć, że zmiany te zachodzą sezonowo i mogą być uwzględniane jako wartości korekcyjne dla miast, posługując się odpowiednimi wielkościami współczynnika zmętnienia atmosferycznego Linkego (Kasten 1996). Ze względu na specyfikę obszarów miejskich (Chwieduk, Bogdańska 2004) oraz aplikacyjny charakter projektu *Cities on Power* zdecydowano się na rozwiązanie alternatywne, polegające na uwzględnieniu kombinacji zmian światłocienia na obszarze miasta dla każdej godziny w roku oraz wykorzystania tzw. danych syntetycznych obliczonych według normy EN ISO 15927:4, które powinny odpowiadać przebiegowi typowych lat meteorologicznych. Szczegółowe informacje na temat tworzenia tych zbiorów danych zawarto m.in. w publikacji Budzyńskiego i in. (2004) oraz na stronach internetowych Ministerstwa Infrastruktury i Budownictwa (http://mib.gov.pl/2-wskazniki_emisji_wartosci_opalowe_paliwa.htm).

W zamierzeniu powinny one zawierać przetworzone, syntetyczne dane pomiarowe dla analizowanych parametrów, które uzyskano dzięki tzw. statystycznym generatorom pogody (*Weather Generator*; Wilks, Wilby 1999).

W niniejszym opracowaniu przyjęto, że warunki aktynometryczne odpowiadające obszarom zacienionym dla danej godziny w roku to wartości promieniowania rozproszonego, natomiast dla obszarów nasłonecznionych przyjęto do obliczeń wartości promieniowania całkowitego (tj. sumy promieniowania rozproszonego i bezpośredniego). Jak wspomniano chwilowe wartości promieniowania pochodziły z „Typowych lat meteorologicznych” rekomendowanych dla celów inżynierskich przez Ministerstwo Infrastruktury i Budownictwa (<http://mib.gov.pl/media/3670/wmo123750iso.txt>). Tak przetworzone dane powinny odzwierciedlać rzeczywistą wariację zjawiska, zachowując jego spójność fizyczną i wartości charakterystyk klimatologicznych. Publikowane dane, zdaniem autorów, częściowo nie spełniają tych wytycznych. Wątpliwości dotyczą m.in. metadanych związanych z lokalizacją pomiarów w Warszawie, które w rzeczywistości nie są prowadzone na

Okęciu, a na Bielanach, i dopiero od 1986 roku, a nie od 1970 roku. Wątpliwości budzi również relacja promieniowania bezpośredniego i rozproszonego, które różnią się w proporcjach obu składowych 3:7 (seria syntetyczna) zamiast oczekiwanych 5:5 (seria obserwacyjna), natomiast roczna suma napromieniowania całkowitego jest mniejsza w serii danych syntetycznych o ponad 60 kWh/rok. Mimo to jest to obecnie jedyna publicznie dostępna syntetyczna i bezpłatna seria danych aktynometrycznych stosowana w praktyce inżynierskiej, udostępniona przez Urząd m. st. Warszawy na potrzeby realizacji zamówienia wykonania mapy potencjału energii słonecznej dla Warszawy. Autorzy, mając świadomość niedoskonałości zastosowanej bazy danych, zdecydowali się na wypracowanie rozwiązania wykorzystującego chwilową (godzinową) konfigurację światłocienia, pozwalającą w łatwy sposób na zastosowanie dowolnego (syntetycznego) zbioru danych aktynometrycznych, także na późniejszym etapie aktualizacji mapy warunków solarnych. Koncepcja ta sprowadza się do rozdzielania części modelowej odpowiedzialnej za tworzenie warstw rastrowych światłocienia z syntetyczną bazą wartości warunków solarnych w Warszawie.

Zacienienie powierzchni dachowej obliczono na podstawie uproszczonego trójwymiarowego modelu budynków dostarczonego przez Wydział Geodezji i Katastru Urzędu m. st. Warszawy. Uproszczenie geometrii budynków związane było z pominięciem możliwych spadków dachów budynków (tzw. model 2D+H). W przypadku większych budowli powierzchnia dachów była dzielona na mniejsze, płaskie części o różnych wysokościach, co przedstawiono na przykładzie Pałacu Kultury i Nauki oraz jego najbliższego otoczenia w rzucie perspektywicznym (rys. 1).

Spośród szeregu dostępnych modeli do obliczeń warunków solarnych szeroko stosowane są zarówno rozwiązania bezpłatne, otwartoźródłowe (*open source*), jak i rozwiązania komercyjne. Wśród tych drugich często spotykane rozwiązania bazują na modelu Solar Analyst (Fu, Rich 1999) zaimplementowanym w środowisku ArcGIS. Pierwsze testy wykonane z tym oprogramowaniem wskazały jednak na pewne ograniczenia związane z brakiem możliwości modyfikacji kodu źródłowego, np. w celu zrównoleglenia obliczeń, co w dużym stopniu ogranicza przeprowadzenie symulacji na dużych zbiorach danych. Zdecydowanie większe możliwości dopasowania kodu źródłowego do potrzeb użytkownika dają rozwiązania otwartoźródłowe, które bazują zarówno na zupełnie autorskich rozwiązaniach, jak i mogą korzystać



Rys. 1. Uproszczony model budynków 2D+H wykorzystany w obliczeniach modelowych światłocienia.
Rzut perspektywiczny na centrum Warszawy od strony południowo-wschodniej

Simplified model of buildings (2D+H) used in this study.
Perspective view on the city center of Warsaw from a south-eastern side

z zewnętrznych bibliotek programistycznych specjalnie dedykowanych do tego celu (np. libRadtran (Mayer, Kylling 2005) lub solaR (Perpiñán 2012)), które z kolei mogą być implementowane w dowolnym środowisku GIS obsługującym dany język programowania (najczęściej jest to C, C++ lub Fortran).

Wśród tego typu rozwiązań najczęściej stosowanym modelem promieniowania słonecznego jest *r.sun* (Hofierka, Suri 2002; Hofierka, Kańuk 2009) dedykowany do bezpłatnego i otwartoźródłowego środowiska GRASS GIS (Neteler, Mitasova 2008). Bazuje on na algorytmach rastrowych uwzględniających m.in. wpływ rzeźby terenu, zmętnienie atmosfery oraz wykonujący obliczenia parametrów astronomicznych (azymut, kąt padania promieni słonecznych itp.) związanych z chwilowym położeniem słońca względem każdego piksela warstwy rastrowej. Moduł ten jest z powodzeniem stosowany zarówno w badaniach środowiskowych (Szymanowski i in. 2008; Kryza i in. 2010), jak i w rozpoznaniu warunków solarnych na obszarach miejskich (Hofierka, Kańuk 2009; Agugiario i in. 2012; Brito i in. 2012). Specyfika podejścia rastrowego modelu *r.sun* sprawia, że na obszarach miejskich powinien być on stosowany głównie dla dachów budynków lub powierzchni terenu. Uwzględnienie potencjału energii słonecznej dla ścian budynków możliwe jest jedynie w oparciu

o wyniki obecnie rozwijanych modeli trójwymiarowych (nie-rastrowych) (Hofierka, Zlocha 2012; Redweik i in. 2013), choć z punktu widzenia znacznie mniejszej produktywności powierzchni mocno nachylonych znaczenie tego typu rozwiązań w polskich warunkach nasłonecznienia jest obecnie drugorzędne.

Spośród szeregu opcji wynikających z szerokiej możliwości modułu *r.sun* skoncentrowano się na obliczeniach światłocienia wywołanego geometrią budynków, przyjmując jednolite warunki atmosferyczne dla całego miasta (tj. brak zachmurzenia, stały współczynnik zmętnienia atmosfery itp.). Symulacje wykonywano dla każdej pełnej godziny w roku ze słońcem powyżej horyzontu, z rozdzielczością przestrzenną piksela 1 metr. Wyniki symulacji przeprowadzonych przez Agugiario i in. (2012) wskazują, że zwiększenie rozdzielczości przestrzennej rastra powyżej 1 metra nie przynosi dodatkowych mierzalnych efektów w skali miejskiej, znacznie wydłużając przy tym czas wykonywania obliczeń.

W związku z czasochłonnością procedur obliczeniowych, wynikających z dużego obszaru analizy (ponad 517 000 000 m²), całość pracy podzielono na dwa etapy cząstkowe. W pierwszym etapie celem było przetestowanie wypracowanych założeń teoretycznych, wykonanie symulacji testowych oraz ich automatyzacja dla obszaru Śród-

mieścia. Wybór dzielnicy testowej nie był przypadkowy, gdyż stanowi ona zaledwie ok. 7% powierzchni całego miasta, umożliwiając jednocześnie przetestowanie działania modelu zarówno dla wysokich, jak i niskich konstrukcji oraz na obszarach o zwartej i luźnej zabudowie.

Aby uwzględnić potencjalne zacinienie generowane przez budynki znajdujące się w sąsiadujących dzielnicach zastosowano 200-metrowy bufor od granic administracyjnych dzielnicy. Wyniki cząstkowych symulacji były przycinane do powierzchni dachów, następnie reklasyfikowane zgodnie z przyjętym algorytmem dla powierzchni

zacienionych (oznaczonych jako 0) i nasłonecznionych (oznaczonych jako 1) oraz zapisywane do zaprojektowanej bazy danych PostgreSQL, przechowywanej w poszczególnych kolumnach: współrzędne w układzie PUWG 2000 oraz dopisywane kolejno wartości 0 lub 1 w zależności od uzyskanej wartości symulacji światłocienia (por. tab. 1). Zapis binarny pozwolił dodatkowo na znaczne ograniczenie potrzebnej przestrzeni dyskowej, która bez tego zabiegu wykraczałaby możliwościami poza pojemności obecnie dostępnych pojedynczych nośników danych.

Tabela 1

Schemat przyjętego zapisu godzinowych wartości zacinienia

A scheme of SQL database for storing hourly simulation results

	X	Y	Styczeń	Luty	...
ok. 517 mln rzędów	7498300	5787200	0 0 0 0 1 1..	0 0 0 0 1 1..	0 0 0 0 1 1 1
	7498301	5787200	0 0 0 0 1 1..	0 0 0 0 0 1..	0 0 0 0 1 0 1
	7498302	5787200	0 0 0 0 1 1..	0 0 0 0 1 1..	0 0 0 0 1 1 1
	7498303	5787200	0 0 0 0 1 1..	0 0 0 0 1 1..	0 0 0 0 1 1 1
	7498304	5787200	0 0 0 0 1 1..	0 0 0 0 1 1..	0 0 0 0 1 1 1
	7498305	5787200	0 0 0 0 1 1..	0 0 0 0 1 1..	0 0 0 0 1 1 1

kolejne wartości w kolumnach dla miesięcy oznaczają powierzchnię zaciennioną (0) lub nasłonecznioną (1); rzeczywiste wartości napromieniowania obliczane w trybie online na podstawie wyników symulacji, bazy danych syntetycznych oraz łączących je skryptów PHP i PostgreSQL

sunny pixels signed as 1, shadowed as 0; irradiation conditions for sunny and shadowed areas re-calculated using corresponding synthetic meteorological conditions using PHP and PostgreSQL online scripting solution

W ostatnim kroku tworzone były produkty testowe z zsumowanymi wartościami miesięcznymi i rocznymi napromieniowania całkowitego, bezpośredniego i rozproszonego według przyjętych otwartoźródłowych standardów (tj. mapy – w postaci plików GeoTIFF, bazy danych – w formacie PostgreSQL).

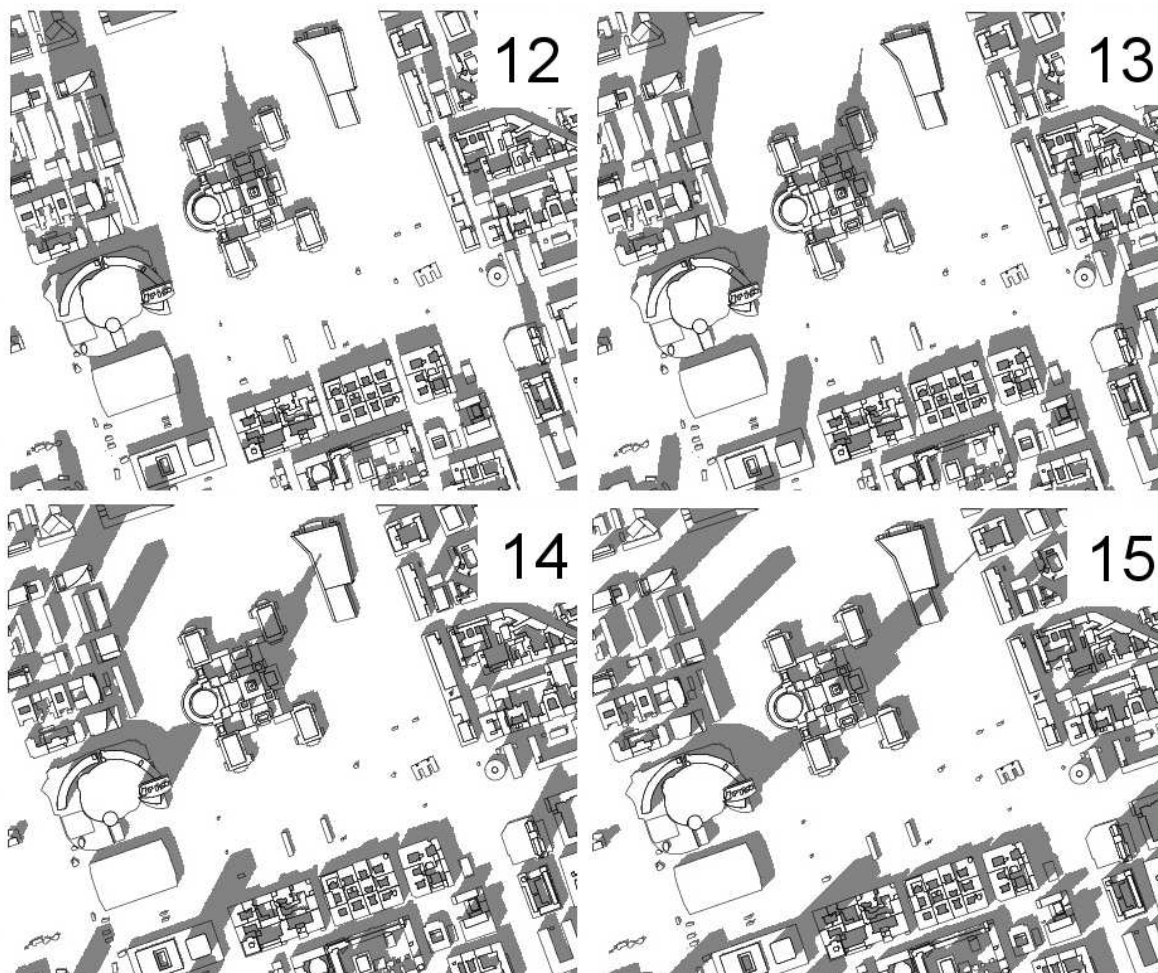
Wyniki symulacji testowych światłocienia zweryfikowano na podstawie zdjęć lotniczych wykonanych w dniu 1. września potwierdzając wysoką jakość symulacji modułu *r.sun*. Przykładowy wynik dla tego dnia zaprezentowano na przykładzie zachodniej części Śródmieścia (rys. 2). Warto zwrócić uwagę m.in. na prawoskrętny ruch cienia w ciągu dnia i wydłużający się w godzinach popołudniowych cień rzucany zwłaszcza przez najwyższe budynki.

Potwierdzenie poprawności obliczeń symulacji testowej dla obszaru Śródmieścia pozwoliło na

powielenie istniejącego wzorca dla pozostałych dzielnic miasta w drugim etapie prac. Przyspieszenie obliczeń było możliwe dzięki rozdzieleniu procedury modelowej na 18 klastrów obliczeniowych udostępnionych przez Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej – Państwowy Instytut Badawczy. Część obliczeniowa projektu trwała ponad 3 miesiące, po czym możliwe było złączenie wyników cząstkowych dla poszczególnych dzielnic oraz opracowanie produktu końcowego, tj. mapy potencjału energii słonecznej wraz z wypracowaną skalą kolorystyczną oraz bazy danych napromieniowania słonecznego. Przygotowane produkty zostały następnie sprzęgnięte w ramach synergii bazy PostgreSQL i kodu programistycznego PHP (wykonanego przez Research Studios Austria), jako jeden z kilku modułów kalkulatora energetycznego. Zastosowanie relacyjnych baz danych pozwoliło tym samym na stworzenie efektywnego

i w pełni interaktywnego narzędzia, które daje zdecydowanie większe możliwości niż w przypadku zastosowania tradycyjnych rozwiązań GIS opartych na statycznych warstwach rastrowych lub wektorowych. Stworzony produkt bazujący na wynikach obliczeń modułu *r.sun* pozwala w intuicyjny sposób m.in. ocenić zużycie energii w danym typie budynku, określić koszty ekonomiczne

i środowiskowe związane z planowanymi inwestycjami w odnawialne źródła energii (w tym także określenia potencjału słonecznego danego fragmentu dachu czy ewentualnej opłacalności, np. instalacji pompy ciepła), także dla osób nie będących specjalistami w zakresie odnawialnych źródeł energii oraz GIS.



Rys. 2. Przykładowe wyniki zreklasyfikowanych wyników symulacji dla zachodniej części Śródmieścia Warszawy w dniu 1. września

kolor szary – obszary zacienione; kolor biały – obszary nasłonecznione;
wartości w prawym górnym rogu oznaczają godziny według czasu CEST

Example of reclassified simulations for areas over southern part of city center on 1st September
gray colour – sunny areas; white colour – shadowed areas; values in upper right corner denote to CEST time

Wyniki

Uzyskane wyniki symulacji z wykorzystaniem modułu *r.sun* mogą być wykorzystane nie tylko w kontekście ich docelowego przeznaczenia jako produktu końcowego dla mieszkańców War-

szawy, ale także w szczegółowych badaniach klimatu miasta, w tym miejskiej wyspy ciepła oraz w procesie decyzyjnym na szczeblu administracyjnym, gdzie mogą w niedalekiej przyszłości zapadać losy dotyczące priorytetowości ewentualnego dofinansowania inwestycji w energię słoneczną. Poniżej przedstawiono przykładowe re-

zultaty z udziałami powierzchni dachowej w poszczególnych dzielnicach Warszawy, które w trakcie całego roku nie są zacienione (rys. 3). Zgodnie z przypuszczeniami najwięcej powierzchni zacienionych na dachach budynków występuje w Śródmieściu, podczas gdy w dzielnicach z dominującym udziałem zabudowy niskiej i jednorodzinnej (Białołęka, Ursus, Wawer, Wesola) udział ten jest ponad dwukrotnie mniejszy.

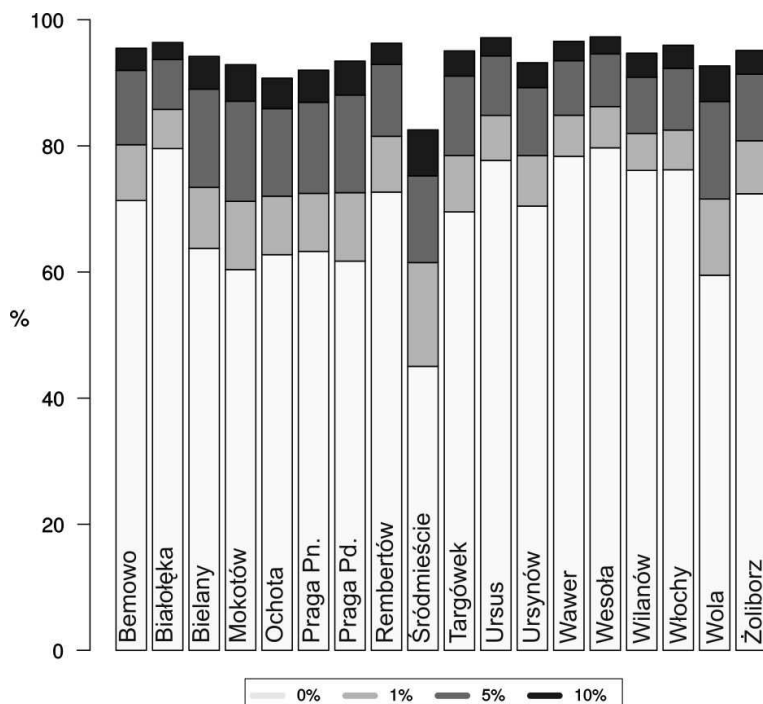
Podobne statystyki mogą zostać wygenerowane w odniesieniu, np. do procentowego czasu

w ciągu roku, w którym potencjalne warunki nasłonecznienia przekraczają określone wartości progowe. Przedstawiony poniżej przykład dotyczy procentowego udziału powierzchni dachowej w poszczególnych dzielnicach, z określoną liczbą godzin z nasłonecznieniem potencjalnym. Okazuje się, że w ciągu 90% czasu roku (ze słońcem powyżej horyzontu) ponad 69% powierzchni dachowej Warszawy nie jest zacieniona, co potwierdzają wcześniejsze statystyki dotyczące zdiagnozowanych prawidłowości pomiędzy dzielnicami (rys. 4).



Rys. 3. Udział procentowy powierzchni dachowej w poszczególnych dzielnicach Warszawy bez możliwości wystąpienia zacienienia

Percentage of roof areas in particular district of Warsaw with no shading impact of other buildings



Rys. 4. Wielkość powierzchni dachowej (w %) bez udziału zacienienia w poszczególnych dzielnicach lub zacienionej rzadko

odcienie szarości oznaczają procentowy czas zacienienia w ciągu roku

Percentage of roof areas in particular district of Warsaw with „never shading” and „almost never shading” conditions

gray colours denote to ratio of time with shading impact

Wnioski i dyskusja

W artykule opisano założenia metodyczne związane z tworzeniem map potencjału energii słonecznej, które mogą być uniwersalnie stosowane dla powierzchni dachów na obszarach miejskich. Rosnąca wydajność ogniw fotowoltaicznych sprawia, że w najbliższych latach zainteresowanie właśnie tym sektorem OZE będzie się nasilać, zwłaszcza w kontekście realizacji polityki klimatycznej Unii Europejskiej i postanowień strategii energetycznej Polski. Jednocześnie niedoszacowany potencjał rozwoju energetyki słonecznej w Polsce na tle krajów ościennych oraz konieczność dywersyfikacji OZE mogą wskazywać na duże szanse rozwoju tego sektora gospodarki. Warto zatem zadbać o dostarczenie możliwie pełnej i rzetelnej informacji związanej z aspektami klimatologicznymi (i ekonomicznymi) energetyki słonecznej na obszarach miejskich, które mogą być uzupełnieniem dostępnych na rynku rozwiązań komercyjnych.

Cieszący się dużą popularnością otwartoźródłowy i bezpłatny moduł *r.sun* dedykowany dla środowiska GRASS GIS pozwala na wypełnienie tej luki. Pod względem swoich możliwości, precyzji obliczeń i wydajności często przewyższa on także komercyjnie dostępne rozwiązania (Ruiz-Arias i in. 2009). Potwierdzeniem tych przypuszczeń okazała się weryfikacja przyjętych założeń dla uzyskanego rozkładu przestrzennego światłocienia, którą konfrontowano ze zdjęciami lotniczymi wykonanymi w dniu 1. września. Wypracowane rozwiązanie wymagało wykorzystania w praktyce zarówno wiedzy aktynometrycznej, odpowiedniego zaplanowania i walidacji wyników cząstkowych obliczeń oraz tworzenia łatwych do ewentualnych modyfikacji procedur programistycznych.

Końcowy algorytm postępowania, polegający na połączeniu syntetycznej serii danych modelowych warunków aktynometrycznych z godzinowymi wartościami obliczonego światłocienia z rozdzielczością 1 m^2 , jest zdaniem autorów rozsądnym kompromisem pomiędzy precyzją obliczeń, koniecznymi do użycia mocami obliczeniowymi, a mobilnością bazy danych i możliwością wykorzystania tych obliczeń w wersji interaktywnej na potrzeby odbiorców końcowych. Uwzględnienie niedoskonałości związanych z zastosowaniem rekomendowanych w praktyce inżynierskiej serii danych aktynometrycznych polegało na wypracowaniu rozwiązania umożliwiającego wykonywanie obliczeń wartości promie-

niowania bezpośredniego, rozproszonego i całkowitego w trybie interaktywnym. Takie rozwiązanie pozwala na łatwą i praktycznie bezkosztową aktualizację wyników wielomiesięcznych obliczeń astronomicznych parametrów położenia słońca (azymut, kąt padania promieni słonecznych itp.) i wywołanych przez nie efektów zacielenia względem każdego piksela utworzonej warstwy rastrowej dachów budynków.

Wcześniejsze rekomendacje dotyczące modelu *r.sun*, zawarte m.in. w publikacji Agugiario i in. (2012) oraz Redweik i in. (2013), użyte w niniejszym studium przypadku potwierdzają dużą uniwersalność tego narzędzia w ocenie warunków solarnych na obszarach miejskich, choć z pewnością nie mogą być one traktowane jednoznacznie jako kategoryczne zalecenia mające zastosowanie w każdym (potencjalnie możliwym) przypadku. Mimo to uzyskane rezultaty symulacji stanowią skuteczne i precyzyjne narzędzie wyróżniania obszarów predestynowanych pod kątem potencjalnych inwestycji w energetykę słoneczną, zarówno na potrzeby mieszkańców, jak i władz lokalnych.

Otrzymane w niniejszym opracowaniu wyniki obliczeń wskazują, że blisko 70% powierzchni dachowych w Warszawie pozostaje niezacieleniona przez cały rok. Wartości te różnią się w rozbięciu na poszczególne dzielnice miasta. Przykładowo w Śródmieściu takich powierzchni jest tylko 45%, podczas gdy na Białołęce i w Wesołej – ponad 79%. Są to wartości teoretyczne, nie uwzględniające możliwości technicznych i prawnych instalacji fotowoltaicznych. Celem końcowym było zatem udostępnienie wyników obliczeń w przystępnej i interaktywnej formie, o wysokich możliwościach personalizacji obliczeń. Takie rozwiązanie pozwala zarówno na wybór odpowiedniej lokalizacji potencjalnej inwestycji poprzez wykorzystanie mapy warunków solarnych, jak i umożliwia wykonanie niezbędnych obliczeń przy użyciu kalkulatora energetycznego. W efekcie końcowym odbiorca indywidualny ma możliwość odpowiedniego skonfigurowania różnych form inwestycji w odnawialne źródła energii, w tym także uwzględniającej synergię kilku alternatywnych rozwiązań.

Podziękowania

Autorzy chcieliby serdecznie podziękować osobom, które przyczyniły się do pomyślnej realizacji mapy potencjału energii słonecznej dla Warszawy, realizowanej w ramach projektu „Cities on Power” na zlecenie

m. st. Warszawy. W szczególności chcielibyśmy podziękować Pani mgr Barbarze Bogdańskiej z Pracowni Aktywności Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej – Państwowego Instytutu Badawczego, Pracownikom Biura Ochrony Środowiska Biura Geodezji i Katastru Urzędu m. st. Warszawy oraz osobom współpracującym z ramienia Research Studios Austria.

Literatura

- Agugiario Giorgio, Francesco Nex, Fabio Remondino, Riccardo de Filippi, Shamar Droghetti, Cesare Furlanello. 2012. „Solar radiation estimation on building roofs and web-based solar cadaster”. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* I-2: 177-182.
- Bajkowski Sławomir, Barbara Górnikowska. 2013. „Hydroenergetyka na tle produkcji energii z innych źródeł odnawialnych”. *Przegląd Naukowy – Inżynieria i Kształtowanie Środowiska* 59: 77-87.
- Brito Miguel C., Nuno Gomes, Teresa Santos, José A. Tenedório. 2012. „Photovoltaic potential in a Lisbon suburb using LiDAR data”. *Solar Energy* 86 (1): 283-288.
- Budzyński Karol, Piotr G. Narowski, Jerzy Czechowicz. 2004. Przygotowanie zbiorów zagregowanych danych klimatycznych dla potrzeb obliczeń energetycznych budynków, Ministerstwo Infrastruktury, dane źródłowe Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej, Warszawa.
- Chwieduk Dorota, Barbara Bogdańska. 2004. „Some recommendations for inclinations and orientations of building elements under solar radiation in Polish conditions”. *Renewable Energy* 29 (9): 1569-1581.
- Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2009/29/WE z dnia 23 kwietnia 2009 r. zmieniająca dyrektywę 2003/87/WE w celu usprawnienia i rozszerzenia wspólnotowego systemu handlu uprawnieniami do emisji gazów cieplarnianych. *Dziennik Urzędowy Unii Europejskiej*: L 140/63 – L 140/-87.
- EurObserv'ER. 2015. Barometr Fotowoltaiczny. *Biuletyn energetyki odnawialnej Fotowoltaika*: 1-16, <http://www.eurobserv-er.org/pdf/photo-voltaic-barometer-2015-pl/>
- Fu Pinde, Paul M. Rich. 1999. Design and implementation of the solar analyst: an ArcView extension for modeling solar radiation at landscape scales. W: *Proceedings of the 19th Annual ESRI User Conference, San Diego*, 1-33.
- Hofierka Jaroslav, Jan Kaňuk. 2009. „Assessment of photovoltaic potential in urban areas using open-source solar radiation tools”. *Renewable Energy* 34 (10): 2206-2214.
- Hofierka Jaroslav, Marcel Suri. 2002. The solar radiation model for Open source GIS: implementation and applications. W: *Proceedings of the Open source GIS-GRASS users conference*: 1-19.
- Hofierka Jaroslav, Marian Zlocha. 2012. „A New 3-D Solar Radiation Model for 3-D City Models”. *Transactions in GIS* 16 (5): 681-690.
- Kasten Fritz. 1996. „The Linke turbidity factor based on improved values of the integral Rayleigh optical thickness”. *Solar Energy* 56 (3): 239-244.
- Kryza Maciej, Mariusz Szymanowski, Krzysztof Migala, Małgorzata Pietras. 2010. „Spatial information on total solar radiation: Application and evaluation of the r. sun model for the Wedel Jarlsberg Land, Svalbard”. *Polish Polar Research* 31 (1): 17-32.
- Mayer Bernhard, Arve Kylling. 2005. „The libRadtran software package for radiative transfer calculations – description and examples of use”. *Atmospheric and Chemistry Physics* 5: 1855-1877.
- Ministerstwo Gospodarki. 2009. Polityka energetyczna Polski do 2030 roku. Załącznik do uchwały nr 202/2009 Rady Ministrów z dnia 10 listopada 2009 r.
- Neteler Markus, Helena Mitasova. 2008. Open Source GIS: A GRASS GIS Approach. The International Series in Engineering and Computer Science, Vol. 773. New York: Springer.
- Perpiñán Oscar. 2012. „solaR: Solar Radiation and Photovoltaic Systems with R”. *Journal of Statistical Software* 50 (9): 1-32.
- Polskie Sieci Energetyczne. 2015. Polskie Sieci Elektroenergetyczne 2015. Raport roczny <http://www.pse.pl/index.php?did=2232>
- Redweik Paula, Cristina Catita, Miguel Brito. 2013. „Solar energy potential on roofs and façades in an urban landscape”. *Solar Energy* 97: 332-341.
- Ruiz-Arias José A., Joaquín Tovar-Pescador, David Pozo-Vázquez, Husain Alsamamra. 2009. „A comparative analysis of DEM-based models to estimate the solar radiation in mountainous terrain”. *International Journal of Geographical Information Science* 23 (8): 1049-1076.
- Scognamiglio Alessandra, Harald N. Røstvik. 2013. „Photovoltaics and zero energy buildings: a new opportunity and challenge for design”. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* 21 (6): 1319-1336.
- Szymanowski Mariusz, Maciej Kryza, Krzysztof Migala, Piotr Sobolewski, Lech Kolondra. 2008. „Modelling and validation of the potential solar radiation for the Hornsund region – application of the r.sun model”. *Annals of Geomatics – Roczniki Geomatyki* VI (2): 107-112.

Wilks Daniel S., Robert L. Wilby. 1999. „The weather generation game: A review of stochastic weather models”. *Progress in Physical Geography* 23 (3): 329-357.

Summary

According to the EU climate change policy, Poland is obliged to cover at least 15% of its energy consumption with renewable energy resources by 2020. To reach this target, widespread investments in renewable energy are required, especially in urban areas where over 70% of EU energy production is consumed. Therefore, local initiatives are raised in order to deliver an interactive tool to support citizens in the decision making on new means of energy supply. This is also a significant opportunity for a wide range of GIS specialists and urban climatologists to provide reliable and fully interactive maps of e.g. solar potential, which allows citizens and decision makers to estimate how much energy they can derive in a specific point from solar panels, when they can expect a return on their investment and how it will affect the natural environment. On the other hand, there are not many methodological studies that may cover the gap and provide clear suggestions about using devices such as GIS tools that might be applied for this kind of research. Therefore, the aim of this study was to shed light on our experiences with creating a solar potential map

for the city of Warsaw within the framework of „Cities on Power” project.

Simulations were based on a simplified 3D model of the buildings in Warsaw. The main part of the simulations was conducted using the „*r.sun*” module dedicated to GRASS-GIS 6.4. Introductory results were validated against airborne images providing a high quality of created methodological assumptions. The entire simulation for the area of over 517,000,000 m² was run on a high-performance GNU/Linux machines. To limit the final size of the database, the results were clipped to contain surface of rooftops only, using a binary data type (i.e. 0 – shadow, 1 – sunny) and synthetic atmospheric conditions (i.e. taking into account annual changes of sun declination, cloudiness, Linke atmospheric turbidity coefficient, etc.) as provided for engineering purposes by the Ministry of Infrastructure and Construction. Such a solution enables the following calculations: direct, diffuse and total solar radiation for every square meter of a building’s surface in Warsaw, which were later coupled with online scripting solutions.

The obtained results show that almost 70% of roof surface in Warsaw is not directly impacted by the shadow of the neighboring buildings at any time of year. These statistics vary significantly in particular districts of the city, from only 45% of „never shaded” conditions in the city center up to almost 80% in the most external districts.