

# ANALIZA WARUNKÓW NASŁONECZNIENIA POLSKI NA PODSTAWIE BAZ DANYCH SSE

J. Tatarczak<sup>1</sup>, M. Sokołowska<sup>1</sup>, J. M. Olchowik<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Studenckie Koło Naukowe Energetyki Odnawialnej „GRUPA OGNIWO”,

<sup>2</sup> Instytut Inżynierii Odnawialnych Źródeł Energii, Wydział Inżynierii Środowiska, Politechnika Lubelska  
Lublin, Polska

## WSTĘP

Efektywne zagospodarowanie promieniowania słonecznego na Ziemi na cele użyteczne zależy silnie od jego charakterystyki na konkretnej szerokości geograficznej. Chodzi tu głównie o nasłonecznienie i usłonecznienie. Wiarygodność tych danych wynika przede wszystkim od sposobu i warunków rejestracji tego promieniowania. Stacje pomiarowe wykorzystują różne detektory, różnie skalibrowane. W niniejszej pracy podjęto próbę określenia warunków nasłonecznienia Polski wykorzystując bazę danych opartą na ponad 20-letniej rejestracji promieniowania słonecznego nad Polską przez system satelitarny NASA.

## BAZA DANYCH

W ramach naukowego programu badań NASA od dawna dostarcza istotnych danych klimatycznych pochodzących z satelitów krążących wokół Ziemi. Dane te obejmują długoterminowe szacunkowo-ilościowe dane o przepływie energii słonecznej na powierzchni Ziemi. Dostarczane dane są na tyle dokładne i niezawodne by objąć takie obszary, gdzie pomiary dokonywane są rzadko lub wcale. Baza danych „Surface meteorology and Solar Energy (SSE)”, dotycząca warunków klimatycznych jest dostępna na stronie internetowej należącej do NASA.

Obecnie dostępne są dane meteorologiczne w wersji 6.0 (SSE-Release 6.0), opublikowane w 2008 roku. Obejmują one okres od 1 lipca 1983 r. do 30 czerwca 2005r., co daje 22 lata pomiarów. Baza danych zawiera 200 różnych parametrów meteorologicznych opracowanych na podstawie pomiarów satelitarnych. Rozdzielczość tych pomiarów to 1 stopień szerokości i długości geograficznej. Daje to 64 800 punktów pomiarowych na całym globie. Wyniki pomiarów przedstawiane są jako średnie dzienne wartości dla poszczególnych miesięcy roku.

## DOKŁADNOŚĆ POMIARÓW

Zasadniczo dane dostarczane z naziemnych stacji meteorologicznych są bardziej dokładne. Jednak niepewność pomiarów spowodowana nieprawidłową kalibracją urządzeń czy brakiem danych (luka w pomia-

rach w naziemnych stacjach pomiarowych nie jest zawsze zgłaszana). Według szacunków „World Climate Research Programme” z 1989 r., niepewność pomiarowa naziemnych stacji wynosiła 6-12%.

Szacunkowe dane SSE zostały porównane z danymi naziemnych stacji pomiarowych – Baseline Surface Radiation Network (BSRN) w skali globalnej i przedstawione są w tabeli poniżej.

Tab. 1. Analiza regresji danych z SSE i BSRN, średnich miesięcznych wartości w okresie od lipca 1983 r. do czerwca 2006 r.

Parametr	Strefa	Bias (%)	RMSE (%)
Nasłonecznienie na powierzchnię horyzontalną	Globalnie	-0,01	10,25
	Powyżej +/- 60° N/S	-1,18	34,37
	Poniżej +/- 60° N/S	0,29	8,71
Promieniowanie rozproszone na powierzchnię horyzontalną	Globalnie	7,49	29,34
	Powyżej +/- 60° N/S	11,29	54,14
	Poniżej +/- 60° N/S	6,86	22,78
Promieniowanie bezpośrednie na powierzchnię normalną	Globalnie	-4,06	22,73
	Powyżej +/- 60° N/S	-15,66	33,12
	Poniżej +/- 60° N/S	2,4	20,93

## METODYKA OBLICZANIA

### Deklinacja

Deklinacja jest kątowym odchyleniem pozycji słońca podczas słonecznego południa w odniesieniu do płaszczyzny równika. Równanie Copper'a, pozwalające obliczyć tę wartość (w stopniach), przedstawiono poniżej (Duffie, Beckman, 1991):

$$\delta = 23,45 \sin\left(2\pi \frac{284+n}{365}\right) \quad (1)$$

Wartość deklinacji waha się w ciągu roku w granicach od +23,45° (21 czerwca) do -23,45° (21 grudnia).

Dla obliczeń wykorzystano średnią miesięczną wartość deklinacji przedstawioną w tab. 2.

Tab. 2. Wartości deklinacji

Miesiąc	Dzień miesiąca	Dzień roku	$\delta$ (°)
Styczeń	17	17	-20.9
Luty	16	47	-13.0
Marzec	16	75	-2.4
Kwiecień	15	105	9.4
Maj	15	135	18.8
Czerwiec	11	162	23.1
Lipiec	17	198	21.2
Sierpień	16	228	13.5
Wrzesień	15	258	2.2
Październik	15	288	-9.6
Listopad	14	318	-18.9
Grudzień	10	344	-23.0

#### Godzinowy kąt słoneczny i godzinowy kąt zachodu słońca

Godzinowy kąt słoneczny  $\omega$  jest to kąt odchylenia słońca na wschód lub zachód od lokalnego południka. Kąt ten jest równy zero w czasie południa słonecznego, ujemny przed południem i dodatni po południu. Godzina słoneczna odpowiada kątowi  $15^\circ$ .

Godzinowy kąt zachodu słońca  $\omega_s$ , odpowiadający wartości godzinowego kąta słonecznego w porze zachodu słońca, wyraża się następująco:

$$\cos(\omega_s) = -\tan(\varphi) \tan(\delta) \quad (2)$$

W przypadku dokonywania obliczeń w programach kalkulacyjnych (np. Microsoft Excel) należy wyrażać wartość kątową w radianach.

#### Nasłonecznienia powyżej granicy atmosfery

Nasłonecznienie poza atmosferą ziemską  $H_0$  na jednostkę powierzchni (horyzontalną) określa ile potencjalnej energii słonecznej dociera na zewnątrz atmosfery Ziemi. Tę wartość można obliczyć korzystając ze wzoru:

$$H_0 = \int_{\omega_{wzsch}}^{\omega_{zsch}} G_{SC} \left( 1 + 0,033 \cos \left( 360 \frac{n}{365} \right) \right) [\cos(\varphi) \cos(\delta) \cos(\omega) + \sin(\varphi) \sin(\delta)] d\omega \quad (3)$$

Założono, że:  $\omega_{wzsch} = \omega_{zsch} = \omega_s$ .

Zatem nasłonecznienie dzienne dla powierzchni horyzontalnej znajdującej się na zewnątrz atmosfery wynosi (Duffie, Beckman, 1991, Jastrzębska, 2009):

$$H_0 = \frac{86\,400}{\pi} G_{SC} \left( 1 + 0,033 \cos \left( 360 \frac{n}{365} \right) \right) [\cos(\varphi) \cos(\delta) \sin(|\omega_s|) + |\omega_s| \sin(\varphi) \sin(\delta)], \quad (4)$$

Po scałkowaniu nasłonecznienia  $H_0$  uzyskuje się wynik wyrażony w  $J/m^2$ . Aby przeliczyć tę wartość na  $kWh/m^2$  wynik należy przemnożyć przez  $3,6 \cdot 10^{-6}$ . Podobnie można określić nasłonecznienie poza granicą atmosfery  $\bar{H}_0$ .

#### Wskaźnik przejrzystości atmosfery

Wskaźnik przejrzystości atmosfery  $K$  określa jaka część promieniowania dociera do powierzchni Ziemi. Dla obliczeń i prezentacji danych, wskaźnik  $\bar{K}$ , odnosi się do średnich miesięcznych wartości i wyrażony jest zależnością (Duffie, Beckman, 1991, Jastrzębska, 2009):

$$\bar{K} = \frac{\bar{H}}{\bar{H}_0} \quad (5)$$

Średnie miesięczne wartości przedstawionego wskaźnika są zależne od lokalizacji i pory roku. Waha się one od 0,3 (duże miesięczne zachmurzenie) do 0,8 (duża miesięczna przejrzystość powietrza) (Duffie, Beckman, 1991).

#### Współczynnik składowej rozproszonej do całkowitego nasłonecznienia

Średnia miesięczna wartość współczynnika składowej rozproszonej do całkowitego nasłonecznienia  $\frac{\bar{H}_d}{\bar{H}}$  może zostać wyznaczona za pomocą następujących równań:

- dla szerokości geograficznych w granicach od  $45^\circ S$  do  $45^\circ N$ :

$$\frac{\bar{H}_d}{\bar{H}} = 0,96268 - (1,452 K) + (0,27365 K^2) + (0,04279 K^3) + (0,000246 \omega_s) + (0,001189 \alpha_n) \quad (6)$$

- dla szerokości geograficznych poniżej  $45^\circ S$  i powyżej  $45^\circ N$ :

- przy  $0^\circ \leq \omega_s \leq 81,4^\circ$ :

$$\frac{\bar{H}_d}{\bar{H}} = 1,441 - (3,6839 K) + (6,4927 K^2) - (4,147 K^3) + (0,0008 \omega_s) - (0,008175 \alpha_n) \quad (7)$$

- przy  $81,4^\circ < \omega_s \leq 100^\circ$ :

$$\frac{R_d}{R} = 1,6821 - (2,5866 K) + (2,373 K^2) - (0,5294 K^3) - (0,00277 \omega_s) - (0,004233 \alpha_n) \quad (8)$$

- przy  $100^\circ < \omega_s \leq 125^\circ$ :

$$\frac{R_d}{R} = 0,3498 + (3,8035 K) - (11,765 K^2) + (9,1748 K^3) + (0,001575 \omega_s) - (0,002837 \alpha_n) \quad (9)$$

- przy  $125^\circ < \omega_s \leq 150^\circ$ :

$$\frac{R_d}{R} = 1,6586 - (4,412 K) + (5,8 K^2) + (3,1223 K^3) + (0,000144 \omega_s) - (0,000829 \alpha_n) \quad (10)$$

- przy  $150^\circ < \omega_s \leq 180^\circ$ :

$$\frac{R_d}{R} = 0,6563 - (2,893 K) + (4,594 K^2) + (3,23 K^3) + (0,004 \omega_s) - (0,0023 \alpha_n) \quad (11)$$

Kąt wysokości słońca w porze południowej dla średniej miesięcznej wartości deklinacji (tab. 2) można obliczyć z następującej zależności:

$$\alpha_n = 90 - (\varphi - \delta) \quad (12)$$

#### Składowa rozproszona i bezpośrednia nasłonecznienia na powierzchnię horyzontalną

Całkowite średnie nasłonecznienie  $\bar{H}$  jest wartością pozyskaną z baz danych SSE. Średnią miesięczną składową rozproszoną  $\bar{H}_d$  można wyznaczyć ze wzoru:

$$\bar{H}_d = \bar{H} \cdot \frac{\bar{H}_d}{\bar{H}} \quad (13)$$

Średnią miesięczną składową bezpośrednią  $\bar{H}_b$  padającą na powierzchnię horyzontalną można określić jako:

$$\bar{H}_b = \bar{H} - \bar{H}_d \quad (14)$$

#### Średnie dzienne nasłonecznienie na powierzchnię pochyłą

Poniżej została przedstawiona metoda obliczania nasłonecznienia na powierzchnię nachyloną pod kątem od  $0^\circ$  do  $90^\circ$ , skierowaną na południe. Na początku należy określić promieniowanie całkowite  $H_h$ , rozproszone  $H_{hd}$  i bezpośrednie  $H_{hb}$  w poszczególnych godzinach dnia (Duffie, Beckman, 1991, Jastrzębska, 2009):

$$H_h = r_t \cdot \bar{H} \quad (15)$$

$$H_{hd} = r_d \cdot \bar{H}_d \quad (16)$$

$$H_{hb} = H_h - H_{hd} \quad (17)$$

Współczynnik korekcyjny  $r_t$  jest wymagany do obliczenia nasłonecznienia całkowitego godzinnego (wyr. (15)). Można go wyznaczyć z zależności

przedstawionych poniżej:

$$r_t = \frac{\pi}{24} [a + b \cdot \cos(\omega)] \frac{\cos(\omega) - \cos(\omega_s)}{\sin(\omega) - \omega_s \cos(\omega_s)} \quad (18)$$

$$a = 0,409 + 0,5016 \cdot \sin\left(\omega_s - \frac{\pi}{3}\right) \quad (19)$$

$$b = 0,6609 - 0,4767 \cdot \sin\left(\omega_s - \frac{\pi}{3}\right) \quad (20)$$

Współczynnik korekcyjny  $r_d$  jest wymagany do obliczenia nasłonecznienia rozproszonego godzinnego (wyr. (16)). Można go wyznaczyć z zależności przedstawionych poniżej (Duffie, Beckman, 1991, Jastrzębska, 2009):

$$r_d = \frac{\pi}{24} \frac{\cos(\omega) - \cos(\omega_s)}{\sin(\omega) - \omega_s \cos(\omega_s)} \quad (21)$$

Współczynnik korekcyjny  $R_b$  jest wymagany by skorygować bezpośrednie nasłonecznienie padające na nachyloną powierzchnię. Można go wyznaczyć następująco (Duffie, Beckman, 1991, Jastrzębska, 2009):

$$R_b = \frac{\cos(\theta)}{\cos(\theta_z)} \quad (22)$$

$$\cos(\theta_z) = \cos(\varphi) \cos(\delta) \cos(\omega) + \sin(\varphi) \sin(\delta) \quad (23)$$

$$\cos \theta = \cos(\varphi - \beta) \cos \delta \cos \omega + \sin(\varphi - \beta) \sin \delta \quad (24)$$

Godzinowa wartość całkowitego  $H_{ht}$  nasłonecznienia na nachyloną powierzchnię może być wyznaczona następująco:

$$H_{ht} = H_b R_b + H_d \left( \frac{1 + \cos(\beta)}{2} \right) + H \rho \left( \frac{1 - \cos(\beta)}{2} \right) \quad (25)$$

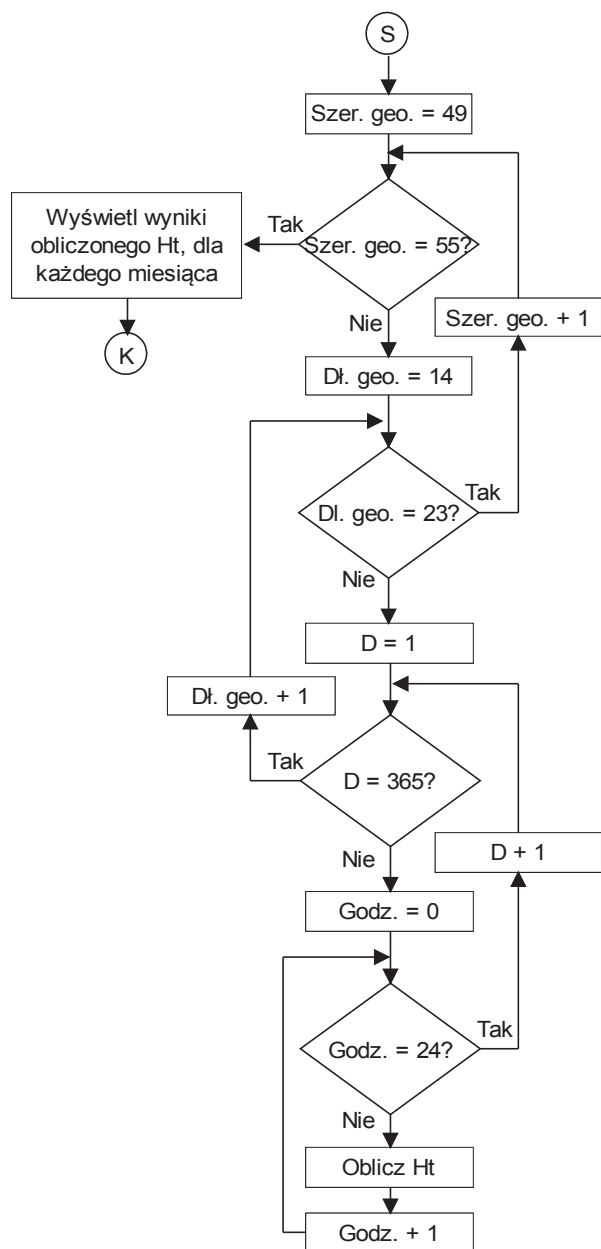
Tab. 3. Średnie wartości współczynnika albedo  $\rho$  dla charakterystycznych powierzchni (Wacławek, Rodziewicz, 2011)

Lp.	Rodzaj powierzchni	Wartość albedo
1.	Śnieg (świeży)	0,75
2.	Lustro wody (duży kąt padania)	0,07
3.	Ziemia (gliniasta)	0,14
4.	Las iglasty (zimą)	0,07
5.	Las jesienią, dojrzałe pola zbóż, plantacje	0,26
6.	Płaszczyzna asfaltowa	0,1
7.	Płaszczyzna betonowa	0,22
8.	Opadłe liście	0,3
9.	Wyschnięta trawa	0,2
10.	Zielona trawa	0,26

Współczynnik albedo  $\rho$  można wyliczyć także na podstawie średniej temperatury w ciągu miesiąca.

Jeżeli temperatura otoczenia wynosi powyżej 0°C, to wartość  $\rho = 0,2$ , a jeżeli temperatura wynosi poniżej -5°C, to  $\rho = 0,7$ . Dla temperatur pomiędzy -5°C a 0°C wartość albedo ( $\rho$ ) zmienia się w sposób liniowy.

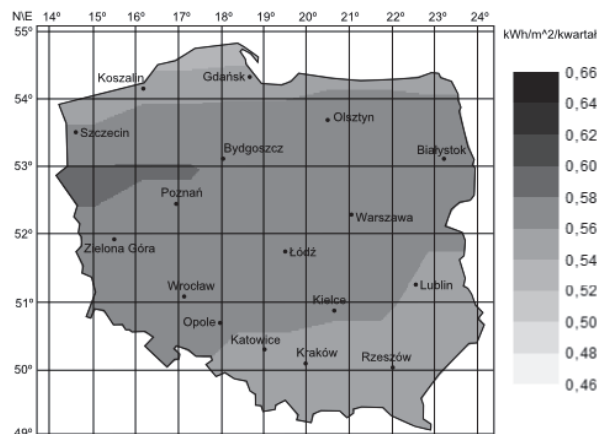
Średnia miesięczna wartość nasłonecznienia  $\bar{H}_t$  jest szacowana na podstawie sumowania wartości godzinowych nasłonecznienia na nachyloną powierzchnię  $H_{nt}$ . Algorytm wyznaczania średnio-miesięcznej wartości nasłonecznienia na pochyłą powierzchnię przedstawiony jest na rys. 1.



Rys. 1. Algorytm wyznaczania średniej miesięcznej wartości nasłonecznienia na pochyłą powierzchnię dla obszaru Polski (od 14°E do 23°E oraz od 49°N do 55°N)

## WYNIKI

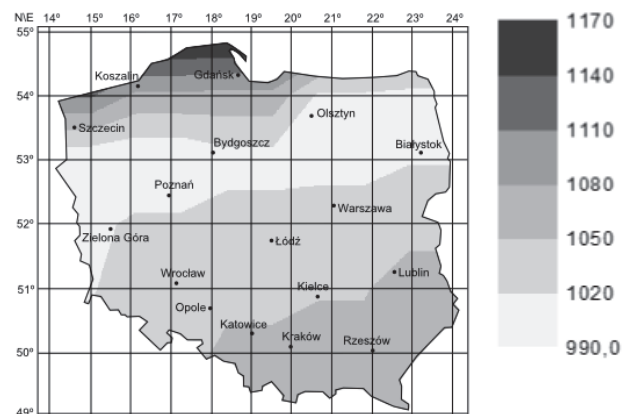
Wyniki obliczeń przedstawione są na rys. 2-9.



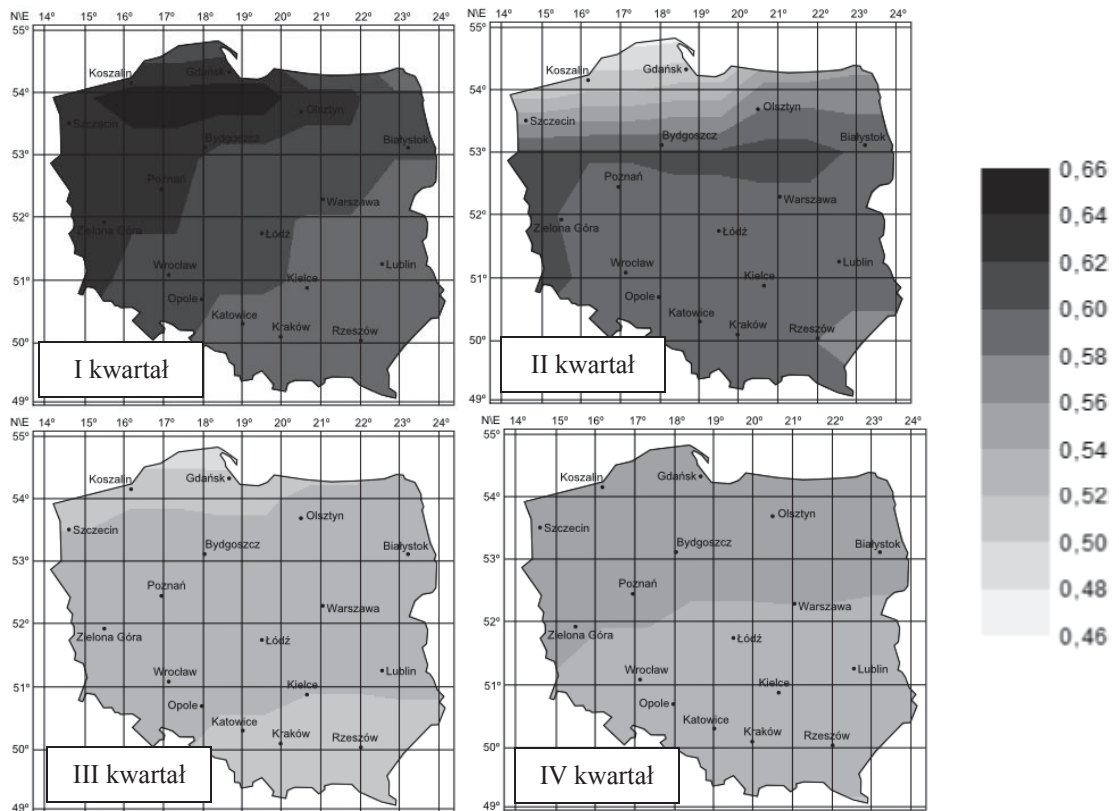
Rys. 2. Średnia roczna wartości składowej dyfuzyjnej promieniowania słonecznego do składowej całkowitej dla Polski (1.0 = 100%)



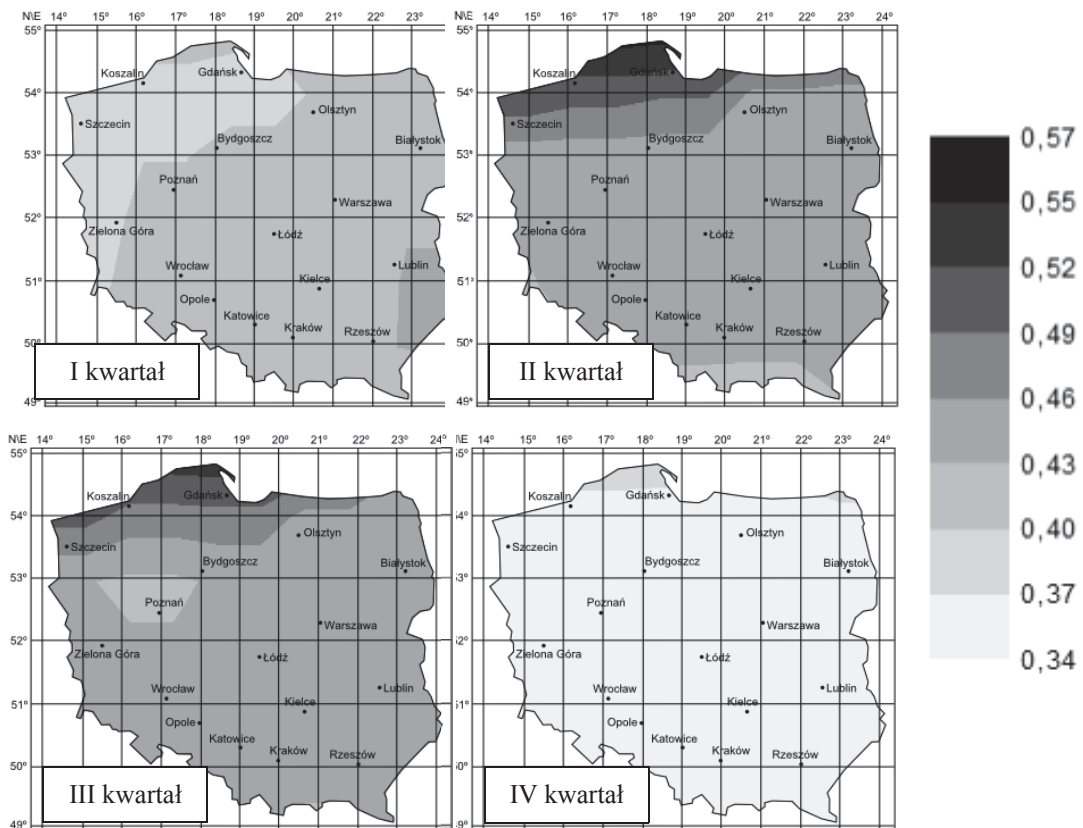
Rys. 3. Średni roczny wskaźnik przejrzystości powietrza dla terenu Polski (1.0 = 100% przejrzystości powietrza)



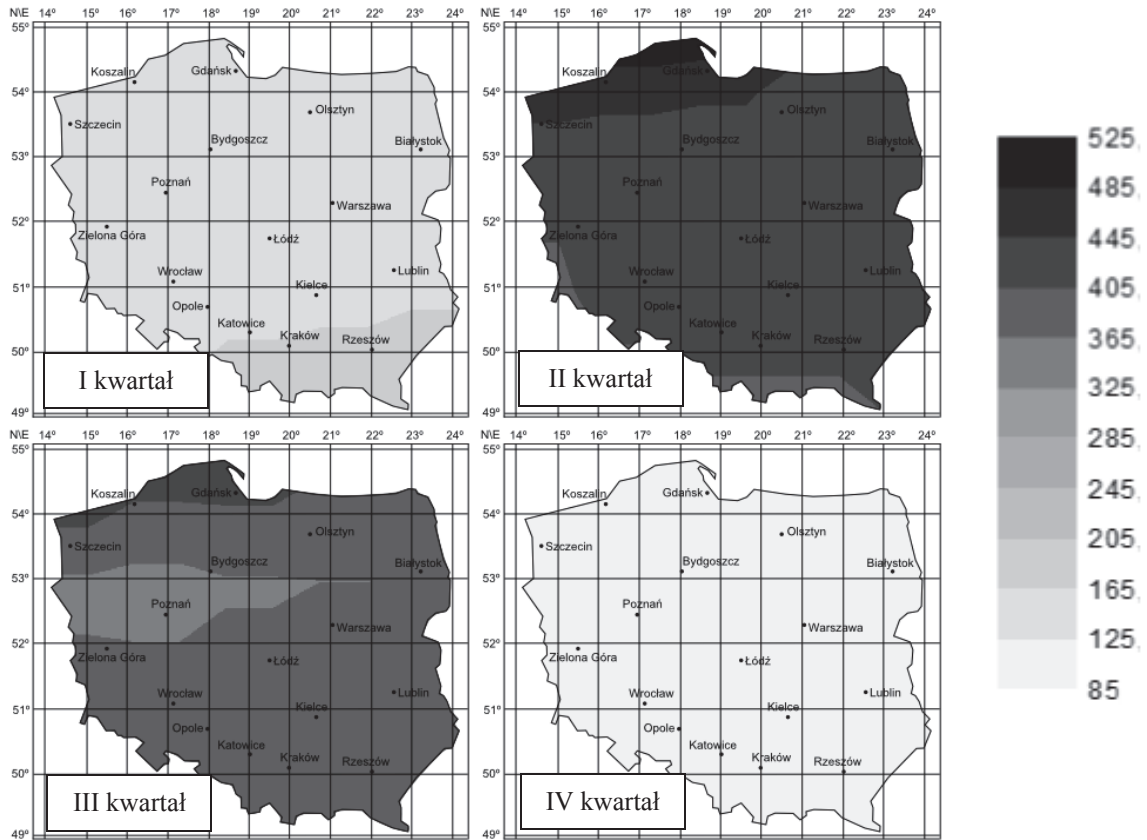
Rys. 4. Roczne nasłonecznienie dla terenu Polski na powierzchnię horyzontalną (kWh/m²/rok)



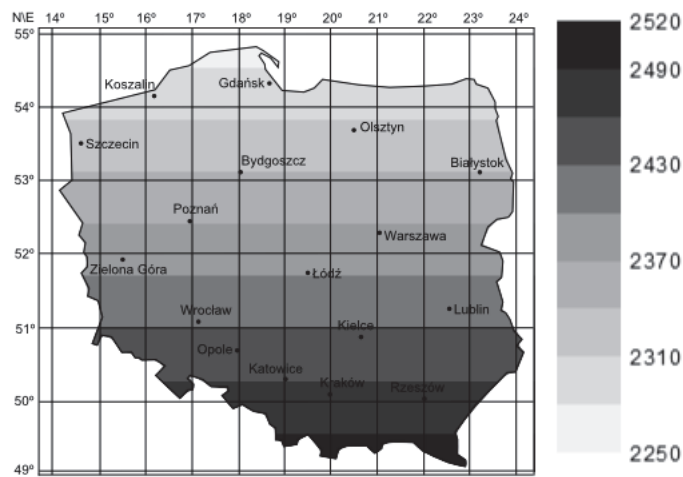
Rys. 5. Średnia kwartalna wartości składowej dyfuzyjnej do całkowitej energii promieniowania słonecznego dla terenu Polski (1.0 = 100%)



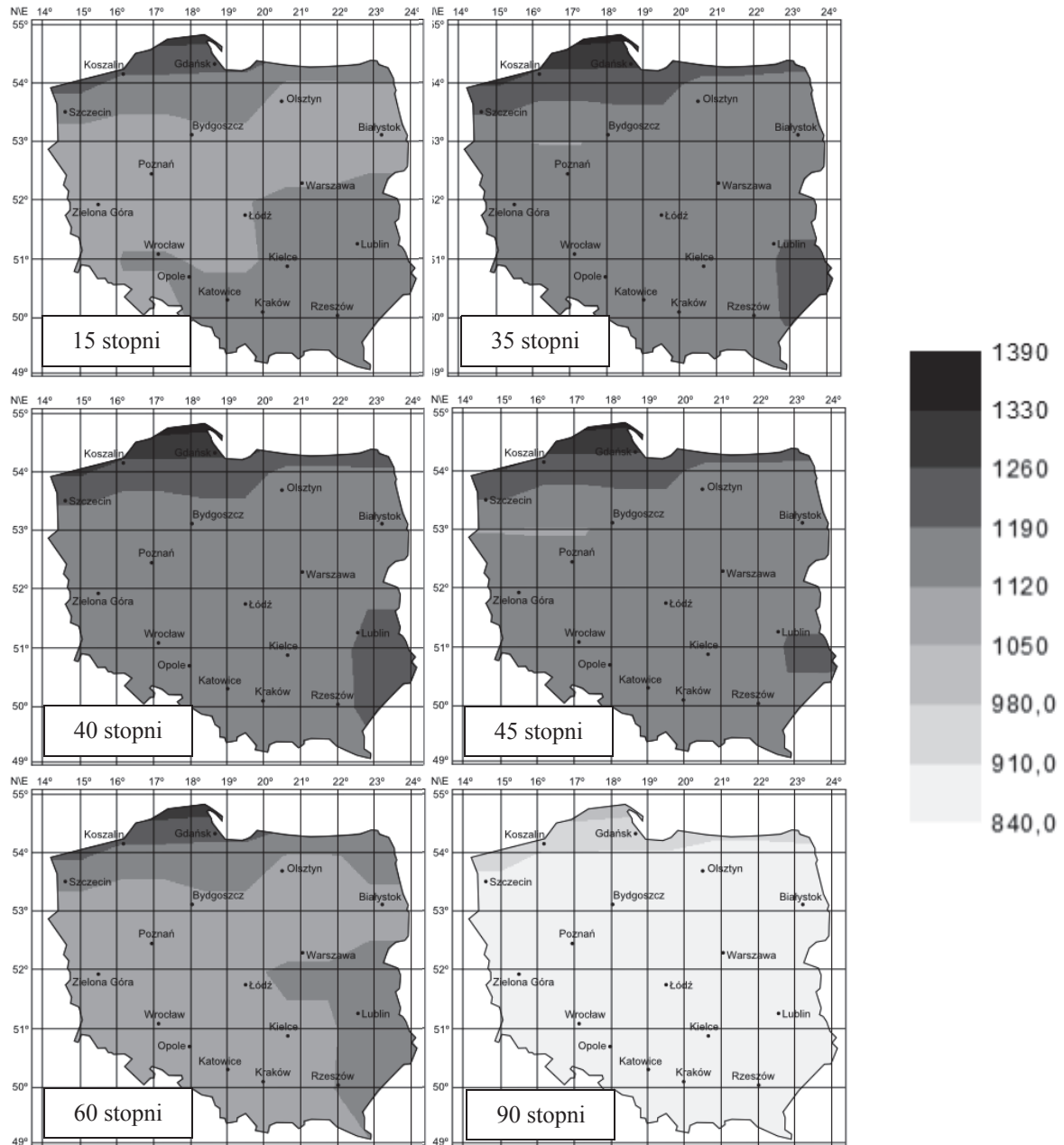
Rys. 6. Średni kwartalny wskaźnik przejrzystości powietrza dla terenu Polski (1.0 = 100% przejrzystości powietrza)



Rys. 7. Kwartalne nasłonecznienie dla terenu Polski na powierzchnię horizontalną ( $\text{kWh}/\text{m}^2/\text{kwartał}$ )



Rys. 8. Roczne nasłonecznienie dla terenu Polski dla wskaźnika przejrzystości 1.0 (nasłonecznienie na zewnętrzną warstwę atmosfery) ( $\text{kWh}/\text{m}^2/\text{rok}$ )



Rys. 9. Roczne nasłonecznienie dla terenu Polski płaszczyznę nachyloną o wybrany kąt względem ziemi (kWh/m<sup>2</sup>/rok)

**PODSUMOWANIE**

Wykorzystanie bazy danych „Surface meteorology and Solar Energy (SSE)” NASA może być pomocne przy projektowaniu i ocenie efektywności konwerterów energii słonecznej. Długookresowe dane, uzyskane z jednego źródła, przy zastosowaniu tej samej metodologii rejestracji stanowią wiarygodne źródło do stworzenia topologii nasłonecznienia na wybranej szerokości geograficznej. Uwidocznienie tych danych w różnych sekwencjach czasowych pozwala optymalizować projekt inwestycji energetyki słonecznej.

**SPIS SYMBOLI**

- α<sub>n</sub> kąt wysokości słońca w południe rad
- β kąt nachylenia powierzchni względem Ziemi deg
- δ deklinacja
- G<sub>sc</sub> stała słoneczna W/m<sup>2</sup>
- $\bar{H}$  średnie miesięczne nasłonecznienie na powierzchnię horyzontalną na powierzchni Ziemi
- $\bar{H}_0$  średnie miesięczne nasłonecznienie na powierzchnię horyzontalną poza granicą atmosfery

n	kolejny dzień roku	
$r_d$	współczynnik korekcyjny Collares-Pereira i Rabla, dla poszczególnej godziny dnia	Duffie, J.A., Beckman, W.A., 1991, <i>Solar Engineering of Thermal Processes</i> , 3rd Edition, John Wiley&Sons
$r_d$	współczynnik korekcyjny Liu i Jordana, dla poszczególnej godziny dnia	Jastrzębska G., 2009, <i>Odnawialne Źródła Energii I Pojazdy Ekologiczne</i> , WNT, Warszawa
$\rho$	współczynnik albedo	Surface meteorology and Solar Energy (SSE) Release 6.0 Methodology Version 3.1.1 January 10, 2013
$\varphi$	szerokość geograficzna	
$\omega$	godzinowy kąt słoneczny	
$\omega_s$	godzinowy kąt zachodu słońca	rad Wacławek M., Rodziewicz T., 2011, <i>Ogniwa Słoneczne - Wpływ Środowiska Naturalnego na ich Pracę</i> , WNT, Warszawa

**LITERATURA CYTOWANA**

*Clean Energy Project Analysis, RETScreen® Engineering & Cases Textbook*, Third Edition, 2005, Kanada

<http://eosweb.larc.nasa.gov/sse/>