ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 2007
Seria: BUDOWNICTWO z. 112 Nr kol. 1763

Dominik WŁODARCZYK*
Politechnika Wrocławska

ANALIZA STATYSTYCZNA MODELI PROMIENIOWANIA SŁONECZNEGO NA PŁASZCZYZNY POCHYLONE WZGLĘDEM DANYCH AKTYNOMETRYCZNYCH POMIERZONYCH WE WROCŁAWIU

Streszczenie. W artykule przeanalizowano modele całkowitego promieniowania słonecznego na płaszczyzny pochylone. Dane teoretyczne porównano, z danymi pomierzonymi w latach 2002 – 2006 we Wrocławiu. W artykule przeprowadzono standardową dla modeli promieniowania słonecznego, procedurę analizy statystycznej, za pomocą której wskazano najdokładniejsze modele dla polskich warunków klimatycznych.

STATISTICAL ANALYSIS OF SOLAR RADIATION MODELS ON TILTED SURFACES WITH COMPARISON TO DATA MEASURED IN WROCLAW

Summary. In this article models of solar radiation on inclined surface are presented. Theoretical data is compared with measured values from Wrocław (measurement period 2002-2006). Standard statistical analysis was performed in order to choose the most accurate model in Polish climate conditions.

1. Wstęp

Modele teoretyczne natężenia promieniowania słonecznego na płaszczyzny pochylone pozwalają obliczyć zyski słoneczne płaszczyzny o dowolnym pochyleniu i azymucie, co jest niezwykle istotne w projektowaniu zarówno aktywnych, jak i pasywnych systemów energetycznych. Wykorzystują one znajomość wartości promieniowania słonecznego na płaszczyzny horyzontalne, z rozbiciem na części bezpośrednią i rozproszoną. W przypadku dostępności jedynie danych promieniowania całkowitego można skorzystać z modeli

* Opiekun naukowy: Dr hab. inż. Henryk Nowak, prof. Politechniki Wrocławskiej.

empirycznych, generujących wartość natężenia rozproszonego, na płaszczyzny horyzontalne na podstawie tzw. współczynnika jasności atmosfery k_T. Test tego rodzaju modeli, dla polskich warunków klimatycznych, autor opublikował w pracy [10].

W artykule przedstawiono analizę statystyczną czterech najczęściej stosowanych modeli promieniowania słonecznego na płaszczyzny pochylone: izotropowego [5], Tempsa i Coulsona [9], Reindla [8] oraz Pereza [7]. Wartości teoretyczne porównano z bazą danych aktynometrycznych z okresu 2002 – 2006, pomierzone we Wrocławiu.

2. Analizowane modele teoretyczne

Całkowite promieniowanie słoneczne I_β na płaszczyznę nachyloną pod kątem β do poziomu można wyrazić za pomocą równania [2]:

$$I_\beta = I_{b,\beta} + I_{d,\beta} + I_{r,\beta}, \tag{1}$$

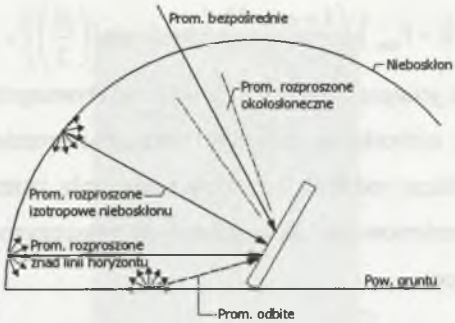
gdzie: $I_{b,\beta}$ – natężenie promieniowania bezpośredniego na płaszczyznę nachyloną [W/m^2],
$I_{d,\beta}$ – natężenie promieniowania rozproszonego na płaszczyznę nachyloną [W/m^2],
$I_{r,\beta}$ – natężenie promieniowania odbitego na płaszczyznę nachyloną [W/m^2].

Natężenie promieniowania bezpośredniego na płaszczyznę nachyloną można opisać wzorem:

$$I_{b,\beta} = I_b \cdot r_b, \tag{2}$$

gdzie: I_b – natężenie promieniowania bezpośredniego na płaszczyznę horyzontalną [W/m^2], r_b – wskaźnik geometryczny wyrażający stosunek wartości natężenia promieniowania bezpośredniego na płaszczyznę pochyloną do analogicznej wartości na płaszczyznę horyzontalną [-].

Drugi człon równania (1) stanowi natężenie promieniowania rozproszonego na płaszczyznę nachyloną. Promieniowanie rozproszone jest bardzo trudne do modelowania matematycznego, stąd wśród badaczy istnieje wiele rozbieżności dotyczących sposobu opisania tego promieniowania na płaszczyznę pochyloną. Ogólnie wyróżnić można modele izotropowe i anizotropowe. Różnica pomiędzy nimi polega na podziale nieboskłonu na obszary o normalnej i podwyższonej wartości natężenia promieniowania rozproszonego. Modelowanie izotropowe zakłada jednakową wartość natężenia promieniowania rozproszonego z całego obszaru nieboskłonu. Z kolei w przypadku modelowania anizotropowego modeluje się dodatkowo obszary o podwyższonym natężeniu: obszar okołosłoneczny i obszar przy linii horyzontu (rys. 1).



Rys. 1. Promieniowanie słoneczne na płaszczyznę pochyloną z wykorzystaniem założenia anizotropowego promieniowania rozproszonego nieboskłonu [1]
Fig. 1. Solar radiation on a tilted surface with anisotropic diffuse solar radiation assumption [1]

Model izotropowy, zwany także modelem Liu i Jordana, opublikowany został w 1962 roku [5]. Zakładał jednakowy rozkład natężenia promieniowania rozproszonego na całym nieboskłonie, a ilość promieniowania rozproszonego, padającego na płaszczyznę nachyloną, uzależniał jedynie od kąta jej nachylenia β:

$$I_{d,\beta} = \frac{1}{2} I_d (1 + \cos\beta), \tag{3}$$

gdzie I_d – natężenie promieniowania rozproszonego na płaszczyznę horyzontalną [W/m^2].

Model Liu i Jordana jest często stosowany w obliczeniach inżynierskich ze względu na swoją prostotę, jednak zbyt uproszczone potraktowanie rozkładu natężenia promieniowania rozproszonego na nieboskłonie skutkuje częstokroć słabymi wynikami w porównaniu z rzeczywistymi danymi meteorologicznymi. Wedug pracy [6] model izotropowy uzyskuje dobre rezultaty jedynie przy całkowicie zachmurzonym niebie. Różnorodność zachmurzenia nieboskłonu skutkuje dużymi błędami generowanymi przez model Liu i Jordana. Wedug prac [4] i [8] model generuje znacznie niższe wartości od modeli anizotropowych.

Temps i Coulson [9] zmodyfikowali model izotropowy wprowadzając dwa człony określające promieniowanie rozproszone, pochodzące z okolic tarczy Słonecznej i promieniowanie nieboskłonu z obszaru tuż nad horyzontem:

$$I_{d,\beta} = \frac{1}{2} I_d (1 + \cos\beta)\left[1 + \cos^2\theta \cdot \left(\sin^3\theta_z\right)\right]\left[1 + \sin^3\left(\frac{\beta}{2}\right)\right] \tag{4}$$

Reindl i inni [8] publikując swój model również uwzględnili w nim obszary o podwyższonym natężeniu promieniowania rozproszonego: tarczy słonecznej oraz pasa nad linią horyzontu. Model ten wykorzystuje wskaźnik anizotropowości F_{Hay} oraz funkcję modulującą stopień zachmurzenia nieboskłonu f:

$$I_{d,\beta} = I_d \cdot (1 - F_{Hay}) \cdot \left(\frac{1+\cos\beta}{2}\right) \cdot \left(1 + f \cdot \sin^3\left(\frac{\beta}{2}\right)\right) + I_d \cdot F_{Hay} \cdot r_b \tag{5}$$

Model Pereza [7] jest jednym z najczęściej wykorzystywanych modeli anizotropowych. Zakłada on trzy regiony nieboskłonu o różnym natężeniu promieniowania rozproszonego: obszar okołosłoneczny, obszar nad linią horyzontu i pozostałą, izotropową część nieboskłonu. Równanie natężenia promieniowania słonecznego na płaszczyznę pochyloną, wg Pereza, przedstawia się następująco:

$$I_{d,\beta} = I_d \left[(1 - F_1)\frac{(1+\cos\beta)}{2} + F_1 \frac{a}{b} + F_2 \sin\beta \right], \tag{6}$$

gdzie: F_1 i F_2 są wskaźnikami jasności nieboskłonu, odpowiednio dla: obszaru okołosłonecznego i nad linią horyzontu. Z kolei a i b są współczynnikami biorącymi pod uwagę kąt padania promieniowania rozproszonego z tarczy okołosłonecznej na płaszczyznach nachylone i horyzontalne.

Ostatni człon równania (1) stanowi promieniowanie odbite na płaszczyznę pochyloną $I_{r,\beta}$. Wartość promieniowania $I_{r,\beta}$ dla założenia, że promienie odbite uważane są za rozproszone, a współczynniki odbicia promieni bezpośrednich i rozproszonych identyczne, jest obliczana wg wzoru:

$$I_{r,b} = \frac{1}{2}\rho I(1 - \cos\beta), \tag{7}$$

gdzie ρ oznacza albedo gruntu.

3. Pomiar danych aktynometrycznych

Analizę statystyczną modeli teoretycznych przeprowadzono na danych pomiarowych promieniowania słonecznego, mierzonych w okresie od grudnia 2002 do października 2006 roku, na stanowisku pomiarowym (rys. 2), w Laboratorium Fotowoltaicznym SolarLAB, działającym przy Wydziale Elektroniki Mikrosystemów i Fotoniki Politechniki Wrocławskiej. Za pomocą sprzętu pomiarowego firmy Kipp&Zonen mierzono: promieniowania całkowite i rozproszone na płaszczyznę horyzontalną oraz promieniowanie całkowite na płaszczyznę pochyloną. Z uwagi na maksymalizację ilości energii słonecznej, docierającej do modułów fotowoltaicznych kąt nachylenia płaszczyzny pomiarowej był zmienny: w okresie letnim wynosił on 35°, w okresie zimowym 50°.

Pomiar danych aktynometrycznych odbywał się co 90 sekund. W następnej kolejności dane te były uśredniane do okresów godzinnych, w związku z aktualnym trendem w analizach statystycznych modeli promieniowania słonecznego na świecie.

Rys. 2. Stanowisko pomiarowe danych aktynometrycznych w Laboratorium Fotowoltaicznym SolarLAB we Wrocławiu
Fig. 2. Solar radiation data collecting system at Photovoltaic Laboratory SolarLAB in Wrocław

4. Procedura kontroli jakości danych pomiarowych

Dane do analiz porównawczych modeli promieniowania słonecznego na płaszczyznę horyzontalną powinny zostać sprawdzone pod względem występowania danych błędnych, związanych np. z awariami systemu pomiarowego, przeszkód terenowych itd. W tym celu wykorzystuje się równania eliminujące z bazy danych te elementy, które nie spełniają ustalonego poziomu jakości. Dla danych promieniowania słonecznego na płaszczyznę horyzontalną stosuje się warunki jakości danych przez CIE (Commission Internationale de l'Eclairage) [3]:

$$0 \le I_d \le 1{,}1I \tag{8}$$

$$0 \le I \le 1{,}2I_0 \tag{9}$$

$$0 \le I_d \le 0{,}8I_0 \tag{10}$$

$$0 \le I_b \le I_0, \tag{11}$$

gdzie: I – natężenie całkowitego promieniowania słonecznego na płaszczyznę horyzontalną [W/m^2], I_d [W/m^2], I_b [W/m^2], I_0 – natężenie całkowitego promieniowania słonecznego na płaszczyznę horyzontalną, na granicy atmosfery [W/m^2].

Ostatecznie utworzona baza danych pomiarowych, po wyeliminowaniu danych błędnych (w tym tych, co do których zachodziło podejrzenie tzw. zawieszenia się któregokolwiek z czujników – te same wartości pomiarowe w ciągu kolejnych godzin), liczyła 9681 godzin pomiarowych.

5. Porównanie wartości teoretycznych i pomiarowych

Do analizy statystycznej wykorzystano następujące wskaźniki statystyczne: MBE – błąd średni (Mean Bias Error), RMSE – pierwiastek błędu średniego kwadratowego (Root Mean Square Error), MBE [%] – względny błąd średni, RMSE [%] – względny pierwiastek błędu średniego kwadratowego oraz CC – współczynnik korelacji.

Tablica 1

Wskaźniki statystyczne analizowanych modeli przy wykorzystaniu modelu albedo 0,20

Model	Kąt pochylenia	Wskaźniki statystyczne badanych modeli				
		MBE [Wh/m^2]	RMSE [Wh/m^2]	MBE[%] [%]	RMSE[%] [%]	CC [-]
Izotropowy [5]	35	-8,39	121,17	-2,37	34,26	0,9069
	50	-20,31	116,33	-5,25	30,09	0,9098
	całość	-13,57	119,09	-3,69	32,36	0,9080
Temps i Coulson [9]	35	28,88	122,49	8,17	34,64	0,9128
	50	24,44	113,07	6,32	29,24	0,9184
	całość	26,95	118,49	7,32	32,20	0,9118
Reindl [8]	35	3,97	123,14	1,12	34,82	0,9063
	50	-2,12	120,65	-0,55	31,20	0,9031
	całość	1,32	122,06	0,36	33,17	0,9052
Perez [7]	35	9,92	118,95	2,81	33,63	0,9130
	50	2,91	114,31	0,75	29,56	0,9127
	całość	6,87	116,95	1,87	31,78	0,9130

Dla pochylenia płaszczyzny pomiarowej 35° najniższy błąd średni uzyskał model Reindla (tabela 1). Dla pochylenia 50° modele Reindla i Pereza uzyskały zbliżone wartości. Modelem generującym najniższy błąd średni, dla bazy danej obejmującej oba kąty pochylenia okazał się model Reindla. Analizując pierwiastek błędu średniego kwadratowego dla kąta 35° najniższe wartości generuje model Pereza, w przypadku kąta pochylenia 50° – model Tempsa i Coulsona uzyskał najbardziej korzystne wartości, nieznacznie poprzedzając model Pereza. Dla bazy danej uwzględniającej oba kąty pochylenia najdokładniejszy okazał się model Pereza. Modelem o najwyższym współczynniku korelacji dla kąta pochylenia 35° okazał się model Pereza. Dla kąta pochylenia 50° najlepsze wartości uzyskał model Tempsa i Coulsona. Dla bazy danej uwzględniającej oba kąty pochylenia najlepszy współczynnik korelacji wygenerował model Pereza.

6. Podsumowanie

W artykule przedstawiono statystyczne porównanie wartości generowanych przez modele teoretyczne promieniowania słonecznego na płaszczyznę horyzontalną z wartościami pomiarowymi, pomierzonymi w Laboratorium Fotowoltaicznym SolarLAB we Wrocławiu, w okresie od grudnia 2002 do października 2006 roku. Modele te znajdują zastosowanie w projektowaniu słonecznych systemów energetycznych, np. kolektorów słonecznych.

Do analizy wykorzystano klasyczny model izotropowy [5] oraz modele anizotropowe o różnym stopniu skomplikowania: Tempsa i Coulsona [9], Reindla [8] oraz Pereza [7]. Najbardziej korzystne wartości wskaźników statystycznych uzyskały modele Reindla i Pereza. Pierwszy z modeli charakteryzuje się niskimi wartościami błędu średniego, podczas gdy drugi okazał się najlepszy w przypadku pierwiastka błędu średniego kwadratowego i współczynnika korelacji. Modele izotropowy oraz anizotropowy Tempsa i Coulsona uzyskały zdecydowanie gorsze wartości wskaźników statystycznych. W związku z tym można wysunąć następujący wniosek. Zasadne staje się modelowanie promieniowania rozproszonego nieboskłonu w polskich warunkach klimatycznych, sposób anizotropowy. Należy jednak pamiętać, że nie wszystkie modele anizotropowe mogą znaleźć zastosowanie w obliczeniach promieniowania słonecznego na płaszczyzny pochylone w Polsce. Jako przykład można wymienić model Tempsa, który uzyskał gorsze wyniki od modelu izotropowego w zakresie błędu średniego.

W związku z tym do stosowania w obliczeniach energetyki słonecznej, dla polskich warunków aktynometrycznych rekomenduje się modele Reindla [8] oraz Pereza [7].

LITERATURA

1. Duffie J., Beckman W.: Solar engineering of thermal processes, 2nd edition, John Wiley&Sons 1991.
2. Iqbal M.: An introduction to solar radiation, Academic Press, Canada 1983.
3. Keindrick D.: Guide to recommended practice of daylight measurement, International Commisssion on Illumination (CIE), Report, No. CIE-108, Wien, Austria 1994.
4. Kossecka E., Chochowski A., Czekalski D.: Analysis of estimated and measured solar radiation on a tilted surface, Archives of Civil Engineering, 49 (2003), pp. 531-544.

5. Liu B., Jordan R.: Daily insolation on surfaces tilted towards the equator, Trans. ASHRAE 1962, pp. 526-541.
6. Muneer T.: Solar Radiation and Daylight Models, 2nd edition, Elsevier Butterworth-Heinemann 2004.
7. Perez R., Stewart R., Arbogast C., Seals E., Scott J.: An anisotropic hourly diffuse radiation model for sloping surfaces: description, performance validation, site dependency evaluation, Solar Energy, 36 (1986), pp. 481-497.
8. Reindl D., Beckman W., Duffie J.: Evaluation of hourly tilted surface radiation models, Solar Energy, 45 (1990), pp. 9-17.
9. Temps R., Coulson K.: Solar radiation incident upon slopes of different orientations, Solar Energy, 19 (1977), pp. 179-184.
10. Włodarczyk D., Nowak H.: Obliczanie udziału promieniowania rozproszonego w całkowitym promieniowaniu słonecznym na płaszczyznę horyzontalną dla godzinowych danych aktynometrycznych Wrocławia, Ist International Conference on Solar Energy and Eco-buildings: „Renewable Energy. Innovative Ideas and Technologies".

Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2006-2009 jako projekt badawczy N506 042 31/2292.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Andrzej Wawrzynek