

MODELOWANIE PROMIENIOWANIA SŁONECZNEGO NA PŁASZCZYZNY POCHYLONE

Dominik WŁODARCZYK*, Henryk NOWAK**

* Politechnika Wroclawska, Zaklad Fizyki Budowli i Komputerowych Metod Projektowania, Instytut Budownictwa, Pl. Grunwaldzki 11, 50-377 Wroclaw, e-mail: dominik.wlodarczyk@pwr.wroc.pl

** Politechnika Wroclawska, Zaklad Fizyki Budowli i Komputerowych Metod Projektowania, Instytut Budownictwa, Pl. Grunwaldzki 11, 50-377 Wroclaw, e-mail: henryk.nowak@pwr.wroc.pl

Streszczenie: Poprawne modelowanie wartości natężenia promieniowania słonecznego na płaszczyzny pochylone jest jednym z kluczowych elementów projektowania urządzeń i rozwiązań architektonicznych energetyki słonecznej. W artykule przedstawiono najczęściej wykorzystywane modele obliczeniowe bazujące na danych promieniowania słonecznego na płaszczyźnie horyzontalną, tzn. modele: izotropowy [6] oraz anizotropowe: Hay'a [2], Reindla [11] i Pereza [9]. Wartości generowane przez w/w modele porównano z bazą danych natężenia promieniowania słonecznego na płaszczyzny pochylone pomierzoną w Laboratorium Fotowoltaicznym SolarLAB Politechniki Wrocławskiej. Do obliczeń wykorzystano standardową wartość albedo równą 0,20 oraz średnie miesięczne dane albedo dla terytorium Polski [10]. Wykazano, że modele anizotropowe generują znacznie dokładniejsze wyniki od modelu izotropowego.

Słowa kluczowe: promieniowanie słoneczne na płaszczyzny pochylone, modele teoretyczne, pomiar danych aktywności, weryfikacja statystyczna modeli.

1. WSTĘP

Energia promieniowania słonecznego jest jednym z najważniejszych źródeł tzw. energii odnawialnej. Wykorzystywać ją można w sposób aktywny, np. do podgrzewania ciepłej wody użytkowej w kolektorach słonecznych lub do wytwarzania energii elektrycznej w ogniwach fotowoltaicznych. Na pasywnym wykorzystaniu energii promieniowania słonecznego bazuje tzw. budownictwo pasywne, wg zasad którego poprzez odpowiednie dobranie elementów budynku i ich wymiarów można uzyskać żadaną wartość zysków słonecznych budynku w skali całego roku, jak i poszczególnych jego okresów. Można np. uzyskać duże zyski słoneczne zimą wspomagając instalację grzewczą oraz niskie zyski słoneczne w okresie letnim zmniejszając pobór energii elektrycznej przez urządzenia klimatyzacyjne.

Niestety, pomiary natężenia całkowitego promieniowania słonecznego na płaszczyzny pochylone są w naszym kraju rzadkością. Standardem w stacjach pomiarowych są pomiary natężenia całkowitego promieniowania słonecznego na płaszczyzny horyzontalne. W niektórych lokalizacjach mierzone jest także natężenie promieniowania rozproszonego na płaszczyznę horyzontalną. W przypadku braku danych promieniowania rozproszonego można skorzystać z modeli teoretycznych generujących wartość natężenia rozproszonego na płaszczyzny horyzontalne na podstawie tzw. współczynnika jasności atmosfery k_T . Test tego rodzaju modeli dla polskich warunków klimatycznych autorzy opublikowali w pracy [12].

Modele teoretyczne natężenia promieniowania słonecznego na płaszczyzny pochylone wykorzystują znajomość wartości promieniowania słonecznego na płaszczyzny horyzontalne. Można dzięki nim obliczyć zyski słoneczne płaszczyzny o dowolnym pochyleniu i azymucie, co jest niezwykle istotne w projektowaniu zarówno aktywnych jak i pasywnych systemów energetycznych.

W artykule przedstawiono analizę statystyczną czterech modeli promieniowania słonecznego na płaszczyzny pochylone: izotropowego [6], Hay'a [2], Reindla [11] oraz Pereza [9]. Wartości teoretyczne porównano z bazą danych aktywności z okresu 2002 – 2006 pomierzonej we Wrocławiu.

2. ANALIZOWANE MODELE TEORETYCZNE

Całkowite promieniowanie słoneczne I_β na płaszczyznę nachyloną pod kątem β do poziomu można wyrazić za pomocą równania [3]:

$$I_\beta = I_{b,\beta} + I_{d,\beta} + I_{r,\beta} \quad (1)$$

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].

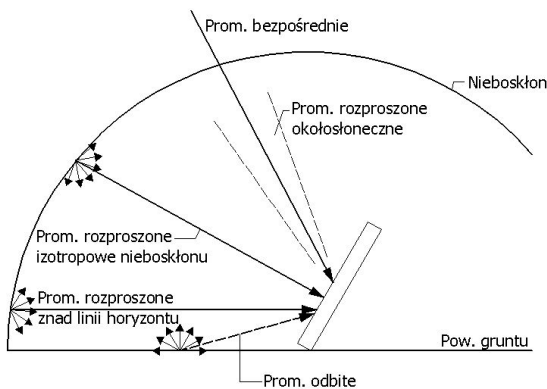
Natężenie promieniowania bezpośredniego na płaszczyznę nachyloną można opisać wzorem:

$$I_{b,\beta} = I_b \cdot r_b \quad (2)$$

gdzie: I_b – natężenie promieniowania bezpośredniego na płaszczyznę horyzontalną [W/m^2], r_b – wskaźnik geometryczny wyrażający stosunek wartości natężenia promieniowania bezpośredniego na płaszczyznę pochyłą do analogicznej wartości na płaszczyznę horyzontalną [-] obliczany wg wzoru [1]:

$$r_b = \frac{\cos \theta}{\cos \theta_z} \quad (3)$$

w którym: θ_z – kąt zenitalny Słońca, θ – kąt padania promieniowania słonecznego na analizowaną płaszczyznę.



Rys.1. Promieniowanie słoneczne na płaszczyznę pochyłą z wykorzystaniem założenia anizotropowego promieniowania rozproszonego nieboskłonu [1].

Fig.1. Solar radiation on a tilted surface with anisotropic diffuse solar radiation assumption [1].

Drugi człon równania (1) stanowi natężenie promieniowania rozproszonego na płaszczyznę nachyloną. Promieniowanie rozproszone jest bardzo trudne do modelowania matematycznego, stąd istnieje wiele rozbieżności wśród badaczy dotyczących sposobu opisanego tego promieniowania na płaszczyznę pochyłą. 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 obszary o podwyższonym natężeniu: obszar okołosłoneczny i ob-

szar przy linii horyzontu. Ideę promieniowania słonecznego na płaszczyznę pochyłą z wykorzystaniem założenia anizotropowego promieniowania rozproszonego nieboskłonu przedstawiono na Rys.1.

Model izotropowy, zwany także modelem Liu i Jordana, opublikowany został w 1962 roku [6]. Zakładał jednakowy rozkład natężenia promieniowania rozproszonego na całym nieboskłonie, a ilość promieniowania rozproszonego padającego na płaszczyznę nachyloną uzależniał jedynie od kąta jej nachylenia β :

$$I_{d,\beta} = \frac{1}{2} I_d (1 + \cos \beta) \quad (4)$$

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 porównaniach z rzeczywistymi danymi meteorologicznymi. Wg pracy [7] model izotropowy uzyskuje dobre rezultaty jedynie przy całkowicie zachmurzonym niebie. Różnorodność zachmurzenia nieboskłonu skutkuje dużymi błędami generowanymi przez model Liu i Jordana. Wg prac [5] i [11] model generuje znacznie niższe wartości od modeli anizotropowych.

Kolejnym modelem anizotropowym jest model Hay'a i Davisa [2] (zwany popularnie modelem Hay'a) zakładający, że promieniowanie rozproszone nieboskłonu pochodzi z dwóch źródeł: tarczy Słonecznej i reszty nieboskłonu z izotropowym promieniowaniem rozproszonym. Oba komponenty opisuje tzw. wskaźnik anizotropowości F_{Hay} :

$$F_{Hay} = \frac{I_b}{I_0} = \frac{I - I_d}{I_0} \quad (5)$$

Promieniowanie rozproszone na płaszczyznę pochyłą wg. Hay'a ma postać:

$$I_{d,\beta} = I_d \left\{ F \cdot \left(\frac{\cos \theta}{\cos \theta_z} \right) + \left[\frac{(1 + \cos \beta)}{2} \right] \cdot [1 - F] \right\} \quad (6)$$

Po podstawieniu funkcji (5) otrzymujemy ostateczną postać modelu anizotropowego promieniowania rozproszonego Hay'a:

$$I_{d,\beta} = I_d \cdot F \cdot \left(\frac{\cos \theta}{\cos \theta_z} \right) + I_d \cdot \left[\frac{(1 + \cos \beta)}{2} \right] \cdot [1 - F] \quad (7)$$

Reindl i inni [11] publikując swój model dodali człon określający promieniowanie rozproszone z obszaru przy linii horyzontu. Stwierdzili, że natężenie promieniowania rozproszonego z tego obszaru maleje wraz ze wzrostem zachmurzenia nieboskłonu i w związku z tym wprowadzili funkcję modulującą f do omawianego członu:

$$f = \sqrt{\frac{I_b}{I}} \quad (8)$$

Równanie modelu Reindla promieniowania rozproszonego na płaszczyznę pochyloną przedstawia się następująco:

$$I_{d,\beta} = I_d \cdot (1 - F_{Hay}) \cdot \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) \cdot \left(1 + f \cdot \sin^3 \left(\frac{\beta}{2} \right) \right) + I_d \cdot F_{Hay} \cdot r_b \quad (9)$$

Schemat działania funkcji modulującej natężenie promieniowania rozproszonego obszaru przy linii horyzontu jest stosunkowo prosty. Kiedy niebo jest w pełni zachmurzone natężenie promieniowania bezpośredniego I_b jest bliskie zeru, a co za tym idzie funkcja f także przyjmuje wartość zerową. W tym momencie model zakłada, że w obszarze przy linii horyzontu promieniowanie rozproszone jest izotropowe.

Model Pereza [9] jest jednym z najczęściej wykorzystywanych modeli anizotropowych z uwagi na osiągane wyniki, które praktycznie w wielu miejscach na świecie, plasują go w czołówce najbardziej dokładnych modeli [8]. Model ten zakłada 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:

$$I_{d,\beta} = I_d \left[(1 - F_1) \frac{(1 + \cos \beta)}{2} + F_1 \frac{a}{b} + F_2 \sin \beta \right] \quad (10)$$

gdzie F_1 i F_2 są wskaźnikami jasności nieboskłonu dla odpowiednio: obszaru okołosłonecznego i nad linią horyzontu. Z kolei a i b są współczynnikami biorącymi pod uwagę kąt padania promieniowania rozproszonego z tarczy okołosłonecznej na płaszczyzny nachylone i horyzontalne. Zakłada się, że promieniowanie z tarczy okołosłonecznej jest punktowym źródłem światła:

$$a = \max[0, \cos \theta] \quad (11)$$

$$b = \max[\cos 85^\circ, \cos \theta_z] \quad (12)$$

Współczynniki jasności nieboskłonu F_1 i F_2 są funkcjami trzech parametrów, które opisują stan nieboskłonu: kąt zenitalny θ_z , czystość atmosfery ε i jasność Δ . ε jest funkcją natężenia promieniowania rozproszonego I_d i promieniowania bezpośredniego normalnego do powierzchni $I_{b,n}$:

$$\varepsilon = \frac{\frac{I_d + I_{b,n}}{I_d} + 5,535 \cdot 10^{-6} \theta_z^3}{1 + 5,535 \cdot 10^{-6} \theta_z^3} \quad (13)$$

gdzie θ_z wyrażone jest w stopniach.

Jasność nieboskłonu Δ obliczana jest wg wzoru:

$$\Delta = m \frac{I_d}{I_{0,n}} \quad (14)$$

$I_{0,n}$ jest promieniowaniem okołozemskim normalnym do płaszczyzny, a m drogą optyczną promieni słonecznych obliczaną wg wzoru:

$$m = \frac{1}{\cos \theta_z} \quad (15)$$

Współczynniki jasności nieboskłonu F_1 i F_2 są otrzymywane z wykorzystaniem następujących równań:

$$F_1 = \max \left[0, \left(F_{11} + F_{12} \Delta + \frac{\pi \theta_z}{180} F_{13} \right) \right] \quad (16)$$

$$F_2 = F_{21} + F_{22} \Delta + \frac{\pi \theta_z}{180} F_{23} \quad (17)$$

Zestaw współczynników F_{ii} dla odpowiednich przedziałów ε znajduje się w pracy [9].

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:

$$I_{r,\beta} = \frac{1}{2} \rho I (1 - \cos \beta) \quad (18)$$

Jako wartość ρ (oznaczające albedo gruntu) można zastosować wartość 0,20 – zaproponowaną przez [6] lub posłużyć się wartościami albedo dla lokalizacji pomiarowej. W artykule zdecydowano się na użycie obu wartości, tj. wartości standardowej 0,20 oraz średnich miesięcznych wartości albedo dla polskich warunków klimatycznych zaproponowanych w pracy [10].

3. POMIAR DANYCH AKTYNOMETRYCZNYCH

Analizę statystyczną modeli teoretycznych przeprowadzono na danych pomiarowych promieniowania słonecznego mierzonych w okresie od grudnia 2002 do października 2006, na stanowisku pomiarowym (Rys.2.) w Laboratorium Fotowoltaicznym SolarLAB, działającym przy Wydziale Elektroniki Mikrosystemów i Fotoniki Politechniki Wrocławskiej. Promieniowanie całkowite na płaszczyznę horyzontalną mierzone było za pomocą pyranometru CM21 Kipp&Zonen. Promieniowanie rozproszone na płaszczyznę horyzontalną mierzone było za pomocą pyranometru CM21 Kipp&Zonen wyposażonego w pierścień dyfuzyjny tego samego producenta. Promieniowanie całkowite na płaszczyznę pochyloną mierzone było za pomocą pyranometru CM21 Kipp&Zonen wyposażonego w komorę wentylacyjną CMV. Pyranometr do pomiaru natężenia całkowitego promieniowania słonecznego na płaszczyznę pochyloną został zamontowany w płaszczyźnie modułów fotowoltaicznych. Z uwagi na maksymalizację ilości energii słonecznej docierającej do modułów fotowoltaicznych kąt nachylenia płaszczyzny modułów PV był zmienny: w okresie letnim wynosił on 35° , w okresie zimowym 50° .



Rys. 2. Stanowisko pomiarowe danych aktywnometrycznych w Laboratorium Fotowoltaicznym SolarLAB we Wrocławiu.

Fig. 2. Solar radiation data collecting system at Photovoltaic Laboratory SolarLAB in Wrocław.

Pomiar danych aktywnometrycznych 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.

4. PROCEDURA KONTROLI JAKOŚCI DANYCH POMIAROWYCH

Dane do analiz porównawczych modeli promieniowania słonecznego na płaszczyznę horyzontalną powinny zostać sprawdzone 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) [4]:

$$0 \leq I_d \leq 1,1I \quad (19)$$

$$0 \leq I \leq 1,2I_0 \quad (20)$$

$$0 \leq I_d \leq 0,8I_0 \quad (21)$$

$$0 \leq I_b \leq I_0 \quad (22)$$

gdzie:

I – natężenie całkowitego promieniowania słonecznego na płaszczyznę horyzontalną [W/m^2],

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

I_b – natężenie promieniowania bezpośredniego na płaszczyznę horyzontalną [W/m^2],

I_0 – natężenie 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 którekolwiek 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), $\text{MBE}[\%]$ – względny błąd średni, $\text{RMSE}[\%]$ – względny pierwiastek błędu średniego kwadratowego oraz CC – współczynnik korelacji.

W pierwszej kolejności zbadano wymienione modele z wykorzystaniem klasycznego modelu albedo, zakładającego, że średni roczny udział promieniowania odbitego w stosunku do padającego wynosi 20%. Następnie zbadano wpływ średnich wartości albedo dla polskich warunków klimatycznych.

Tabela 1. Wskaźniki statystyczne analizowanych modeli przy wykorzystaniu standardowego modelu albedo 0,20.
Table 1. Statistical coefficients of analyzed models with standard albedo model 0,20.

Model	Kąt pochylenia	Wskaźniki statystyczne badanych modeli				
		MBE [Wh/m ²]	RMSE [Wh/m ²]	MBE[%] [%]	RMSE[%] [%]	CC [-]
Izotropowy [6]	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
Hay [2]	35	9,08	122,92	2,57	34,76	0,9071
	50	11,18	114,37	2,89	29,58	0,9135
	całość	9,99	119,28	2,71	32,41	0,9100
Reindl [11]	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 [9]	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

Tabela 2. Wskaźniki statystyczne analizowanych modeli przy wykorzystaniu średnich wartości miesięcznych albedo dla polskich warunków klimatycznych.

Table 2. Statistical coefficients of analyzed models with monthly mean albedo values for Polish climate conditions.

Model	Kąt pochylenia	Wskaźniki statystyczne badanych modeli				
		MBE [Wh/m ²]	RMSE [Wh/m ²]	MBE[%] [%]	RMSE[%] [%]	CC [-]
Izotropowy [6]	35	-8,03	121,22	-2,27	34,28	0,9068
	50	-19,36	116,90	-5,01	30,23	0,9086
	całość	-12,96	119,36	-3,52	32,43	0,9075
Hay [2]	35	9,43	123,03	2,67	34,79	0,9069
	50	12,13	115,22	3,14	29,80	0,9124
	całość	10,61	119,69	2,88	32,52	0,9095
Reindl [11]	35	4,32	123,28	1,22	34,86	0,9061
	50	-1,17	121,56	-0,30	31,44	0,9018
	całość	1,93	122,54	0,53	33,30	0,9045
Perez [9]	35	10,28	119,12	2,91	33,68	0,9128
	50	3,86	115,30	1,00	29,82	0,9114
	całość	7,49	117,47	2,03	31,92	0,9124

W przypadku standardowego modelu albedo 0,20 (Tabela 1.) dla pochylenia płaszczyzny pomiarowej 35° najniższy błąd średni uzyskał model Reindla. Dla pochylenia 50° modelem 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, zaś w przypadku kąta pochylenia 50° zarówno model

Pereza, jak i Hay'a uzyskały zbliżone wartości. Dla bazy danej uwzględniającej oba kąty pochylenia najbardziej dokładny okazał się model Pereza. Modelem o najwyższym współczynniku korelacji dla wszystkich przypadków okazał się model Pereza. Jedynie dla kąta pochylenia 50° zbliżone wartości uzyskał model Hay'a. W Tabeli 2. przedstawiono wartości wskaźników statystycznych modeli teoretycznych z wykorzystaniem średnich miesięcznych wartości albedo dla polskich warunków

ków klimatycznych [10]. Porównując dane w Tabelach 1 i 2 można zauważyć, że zmiana modelu albedo praktycznie nie wnosi żadnych poważniejszych zmian. Różnice w uzyskiwanych wynikach nie przekraczają 1 Wh/m^2 co nie wpływa na kolejność najdokładniejszych modeli. Jest to związane z faktem stosunkowo niskiej wartości promieniowania odbitego padającego na powierzchnie pochyloną w porównaniu z analogicznymi wartościami promieniowania bezpośredniego i rozproszonego.

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.

Do analizy wykorzystano klasyczny model izotropowy [6], oraz modele anizotropowe o różnym stopniu skomplikowania: Hay'a [2], Reindla [11] oraz Pereza [9]. W procesie modelowania promieniowania odbitego od powierzchni gruntu (który to proces jest identyczny dla wszystkich analizowanych modeli) zastosowano dwa modele albedo: klasyczny zakładający stałą wartość 0,20 w skali całego roku oraz średnie miesięczne wartości albedo dla polskich warunków klimatycznych [10].

Najbardziej korzystne wartości wskaźników statystycznych uzyskały modele Reindla i Pereza. Pierwszy z modeli charakteryzuje się niskimi wartościami błędów średniego, podczas gdy drugi okazał się najlepszy w przypadku pierwiastka błędów średniego kwadratowego i współczynnika korelacji. Zdecydowanie najgorsze wartości wskaźników statystycznych generuje model izotropowy. W związku z tym zasadne staje się modelowanie promieniowania rozproszonego nieboskłonu w sposób anizotropowy.

Wyniki prezentowanej pracy jednoznacznie wskazują, że stosowanie klasycznego modelu albedo zakładającego średnią roczną wartość 0,20 jest wystarczające. Stosowanie wartości albedo charakterystycznych dla miejsca pomiaru tylko w niewielkim wymiarze wpływa na zmianę wartości generowanych przez modele teoretyczne.

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

MODELLING OF SOLAR RADIATION ON TILTED SURFACES

Summary: A proper modelling of solar radiation on tilted surfaces is one of the most important elements of design of solar energy devices and architectural solutions. In article the most common used theoretical models of solar radiation on tilted

surfaces are presented: isotropic [6] and anisotropic models: Hay [2], Reindl [11] and Perez [9]. Theoretical data from these models were compared with solar radiation on tilted surfaces database measured at Photovoltaic Laboratory SolarLAB in Wrocław. A standard value of albedo 0,20 and monthly mean albedo data for Poland [10] were used in calculations. Results of performed analysis show that data generated by anisotropic models is much more accurate than data from isotropic model.

Literatura

- [1] Duffie J., Beckman W., *Solar engineering of thermal processes*, 2nd edition, John Wiley&Sons, 1991
- [2] Hay J., Davies J., *Calculation of the solar radiation incident on a inclined surface*, Proceedings First Canadian Solar Radiation Data Workshop, 1980, pp.59-72
- [3] Iqbal M., *An introduction to solar radiation*, Academic Press, Canada, 1983
- [4] Keindrick D., *Guide to recommended practice of daylight measurement*, International Commission on Illumination (CIE), Report No. CIE-108, Wien, Austria, 1994
- [5] Kossecka E., Chochowski A., Czekański D., *Analysis of estimated and measured solar radiation on a tilted surface*, Archives of Civil Engineering, 49 (2003), pp.531-544
- [6] Liu B., Jordan R., *Daily insolation on surfaces tilted towards the equator*, Trans. ASHRAE, 1962, pp.526-541
- [7] Muneer T., *Solar Radiation and Daylight Models*, 2nd edition, Elsevier Butterworth-Heinemann, 2004
- [8] Notton G., Cristofari C., Poggi P., *Performance evaluation of various hourly slope irradiation models using Mediterranean experimental data of Ajaccio*, Energy Conversion and Management, 47 (2006), pp.147-173
- [9] 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
- [10] Podogrodzki J. (red.), *Opracowanie porównawczego sezonu grzewczego do oceny zapotrzebowania ciepła budynków, cz.II: Opracowanie charakterystyk aktywności*, Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, Warszawa, 1990
- [11] Reindl D., Beckman W., Duffie J., *Evaluation of hourly tilted surface radiation models*, Solar Energy, 45 (1990), pp.9-17
- [12] Włodarczyk D., Nowak H., *Obliczanie udziału promieniowania rozproszonego w całkowitym promieniowaniu słonecznym na płaszczyznę horyzontalną dla godzinowych danych aktywności Wrocławia, Ist International Conference on Solar Energy and Eco-buildings: „Renewable Energy. Innovative Ideas and Technologies for Buildings”*, Solina, 2006, pp. 549-556