

Artur BUGAŁA*
Grażyna FRYDRYCHOWICZ-JASTRZĘBSKA*

ZASTOSOWANIE MODELU HARGREAVESA – SAMANI DO ESTYMACJI NASŁONECZNIENIA W FOTOWOLTAICE DLA POLSKICH WARUNKÓW KLIMATYCZNYCH

Występujące w literaturze izotropowe, anizotropowe czy pseudoizotropowe modele matematyczne umożliwiają wyznaczenie gęstości mocy promieniowania słonecznego na podstawie różnych, często mało szczegółowych lub niepełnych ciągów pomiarowych. Złożona aparatura pomiarowa oraz brak możliwości przeprowadzania badań w dowolnym miejscu na Ziemi wymusza konieczność estymacji tej wielkości, a dokładność uzyskiwanych wyników określa zasadność ich stosowania w różnych szerokościach geograficznych. Celem pracy jest analiza skuteczności modelu Hargreaves – Samani w szacowaniu globalnego promieniowania słonecznego dla lokalnych warunków klimatycznych (Poznań, 52°25' N, 16°56' E). Parametrami wejściowymi w modelu są wartości maksymalnej i minimalnej dobowej temperatury powietrza uzyskane ze stacji meteorologicznej zlokalizowanej na terenie miasta Poznań. Zastosowany model opisano wartością błędu RMS i MBE na poziomie 12,54 % i – 7,85 %, co wskazuje na możliwość jego stosowania dla wybranych okresów roku.

SŁOWA KLUCZOWE: Hargreaves – Samani, irradancja, model matematyczny, ogniwo fotowoltaiczne

1. WPROWADZENIE

Podstawą wielu analiz energetycznych w budownictwie, technice ciepłej, a także w fotowoltaice jest znajomość wiarygodnych wyników długookresowych pomiarów gęstości mocy promieniowania słonecznego lub statystycznych danych klimatycznych ujętych w tak zwany typowy rok meteorologiczny [8]. Potencjał promieniowania słonecznego oraz możliwość jego konwersji w energię elektryczną zależy bowiem od takich czynników jak lokalizacja geograficzna (głównie kąt szerokości geograficznej φ), pora roku (kąt deklinacji słonecznej δ i kąt godzinowy ω), stopień zachmurzenia nieba, długość dnia, usłonecznienie czy temperatura powietrza. Pewne z tych wielkości wynikają z innych.

W celu dokładnego wyznaczenia wartości czasowego nasłonecznienia na płaszczyźnie dowolnie zorientowanego kątowno odbiornika energii słonecznej

* Politechnika Poznańska.

wymagana jest znajomość rozkładu globalnego promieniowania słonecznego na składową bezpośrednią, dyfuzyjną i odbitą. Konieczność dysponowania drogą aparaturą pomiarową obejmującą między innymi aktynometrię (pomiar promieniowania bezpośredniego na powierzchni zorientowanej prostopadle do kierunku padania promieni słonecznych) i piranometrię (pomiar promieniowania całkowitego) w celu opisu rozkładu promieniowania słonecznego sprawia, że aplikacja wybranych modeli matematycznych może być mocno ograniczona.

Obok modeli matematycznych, które umożliwiają wyznaczenie gęstości mocy promieniowania słonecznego na płaszczyźnie poziomej i zorientowanej pod dowolnym kątem pochylenia β i azymutu γ jak izotropowe (Liu – Jordana, Badescu, Tiana) i anizotropowe (Hay'a, Steven & Unswortha, Koronakisa) [5, 6, 9, 12] można wskazać te, które nie wymagają wielu złożonych danych wejściowych. Przykładem modelu matematycznego opisu irradancji na płaszczyźnie poziomej jest model Hargreavesa – Samani, w którym jako parametry wejściowe wykorzystuje się wartości minimalnej i maksymalnej temperatury powietrza [3, 4, 11].

2. MODEL HARGREAVESA – SAMANI

Model Hargreavesa – Samani opisuje procedurę obliczeniową prowadzącą do wyznaczenia globalnego promieniowania słonecznego na płaszczyźnie poziomej na podstawie znajomości maksymalnej T_{\max} i minimalnej T_{\min} temperatury powietrza zgodnie z zależnością [3]:

$$\frac{H}{H_o} = a_1 \Delta T^{0,5} \quad (1)$$

gdzie: a_1 – empiryczny współczynnik zależny od lokalizacji geograficznej, ΔT – różnica pomiędzy maksymalną i minimalną dzienną temperaturą powietrza, H_o – pozaatmosferyczne średnie dobowe nasłonecznienie wyznaczone z miesięcznego okresu pomiarowego.

Wartość pozaatmosferycznego promieniowania słonecznego [$\text{MJ}/\text{m}^2/\text{dzień}$] może zostać opisana na podstawie zależności [3]:

$$H_o = \frac{24 \cdot 60}{\pi} \cdot G_{sc} \cdot d_r [\omega_s \cdot \sin \varphi \cdot \sin \delta + \cos \varphi \cdot \cos \delta \cdot \sin \omega_s] \quad (2)$$

gdzie: G_{sc} – stała słoneczna $0,0820$ [$\text{MJ}/\text{m}^2/\text{min}$].

Odwrotność względnej odległości Ziemia – Słońce została opisana zależnością [4]:

$$d_r = 1 + 0,033 \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{365} \cdot J\right) \quad (3)$$

Wartość deklinacji słonecznej [rad] i kąta godzinowego [rad] może zostać wyznaczona na podstawie [4]:

$$\delta = 0,409 \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{365} \cdot J - 1,39\right) \quad (4)$$

$$\omega_S = \arccos[-\tan \varphi \cdot \tan \delta] \quad (5)$$

Gęstość mocy promieniowania słonecznego na płaszczyźnie pomiarowej zlokalizowanej na powierzchni Ziemi opisano za pomocą zależności [7]:

$$H = a_1(\sqrt{T_{MAX} - T_{MIN}})H_o \quad (6)$$

Dla miejsc zlokalizowanych w głębi łądu oraz w bezpośrednim otoczeniu znacznych mas wody zależność (6) zostaje zmodyfikowana odpowiednio do postaci (7) i (8):

$$H = 0,161(\sqrt{T_{MAX} - T_{MIN}})H_o \quad (7)$$

$$H = 0,19(\sqrt{T_{MAX} - T_{MIN}})H_o \quad (8)$$

Wpływ względnej wilgotności powietrza na wartość gęstości mocy promieniowania uwzględniono w liniowy sposób w różnicy występujących temperatur.

3. MATERIAŁY I METODY

Poznań znajduje się w środkowo – zachodniej Polsce, w środkowej części województwa wielkopolskiego, o współrzędnych geograficznych 52°24' N i 16°55' E. Miasto położone jest na obszarze trzech mezoregionów fizjograficznych w dolinie rzeki Warty, a także w dolinach mniejszych cieków wodnych (posiada kilka większych jezior oraz kilkadziesiąt mniejszych zbiorników wodnych, zarówno pochodzenia naturalnego, jak i utworzonych sztucznie). Strefa klimatu umiarkowanego rozciąga się w obszarze przejściowym od klimatu morskiego do klimatu kontynentalnego (przewaga wpływów atlantyckich nad masami powietrza kontynentalnego). Średnia roczna suma opadów wynosi około 510 mm z największą ich ilością w lipcu. Średnia roczna temperatura wynosi 8,5 °C a najcieplejszym miesiącem jest lipiec z wartością 18,2 °C (na podstawie statystycznych danych klimatycznych z okresu 20 lat [8]).

Jako dane wejściowe do analizy porównawczej miesięcznego nasłonecznienia, wyznaczonego z wykorzystaniem modelu Hargreavesa – Samani oraz z obliczeń na podstawie pomiarów własnych irradiancji, wykorzystano dane pochodzące ze stacji meteorologicznej zlokalizowanej na terenie ogrodu botanicznego Uniwersytetu im. Adama Mickiewicza w Poznaniu, które zestawiono w tabeli 1.

Analizę statystyczną z wykorzystaniem średniokwadratowego błędu RMS, średniego błędu MBE oraz współczynnika korelacji Pearsona przeprowadzono przy uwzględnieniu zależności [1]:

Tabela 1. Wartości maksymalnej i minimalnej temperatury powietrza dla analizowanego okresu

Dzień miesiąca	Marzec 2015			Wrzesień 2015		
	T _{max} [°C]	T _{min} [°C]	Nasłonecznienie [Wh/m ²]	T _{max} [°C]	T _{min} [°C]	Nasłonecznienie [Wh/m ²]
1	8	0	3156,54	34	19	790,8
2	7	1	2059,11	20	14	897,2
3	7	1	2109,71	22	12	7934,4
4	6	2	2932,4	20	13	8645,8
5	6	-2	1415,44	19	12	8796,4
6	6	-3	2494,44	14	11	8655,9
7	11	4	3781,99	17	10	7358
8	15	7	4837,03	15	8	5257,2
9	14	3	3557,88	18	7	5194
10	14	1	4768,49	18	8	2046,4
11	7	3	986,13	21	12	2655,6
12	7	3	1989,94	21	13	4607,6
13	6	3	1468,15	24	11	4878,6
14	6	2	500,44	24	15	5148,8
15	10	4	1514,92	20	14	6423
16	13	5	2925,05	25	13	6774,5
17	15	4	7073,03	30	15	7467,9
18	12	2	7347,98	20	12	6774,5
19	11	-1	6591,39	22	10	606,2
20	11	-2	5182,63	17	9	6060,4
21	11	1	5010,44	15	9	2289,8
22	3	-2	7733,52	19	8	2901,4
23	10	-1	7096,8	19	12	3907,8
24	14	1	7096,8	20	10	4692,1
25	17	2	7733,52	20	8	1842
26	17	3	986,13	16	9	705,6
27	9	6	4768,49	17	7	7526,9
28	9	3	1514,92	17	6	7387,6
29	11	3	1500,92	16	7	5437
30	9	5	986,13	15	5	565,2
31	8	1	1514,92			

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (C_i - M_i)^2}{n}} \quad (9)$$

$$\%RMSE = \frac{RMSE}{\bar{M}} 100 \quad (10)$$

$$MBE = \frac{\sum (C_i - M_i)}{n} \quad (11)$$

$$\%MBE = \frac{MBE}{\bar{M}} 100 \quad (12)$$

gdzie: M – wartość zmierzona nasłonecznienia na płaszczyźnie poziomej, C – wartość nasłonecznienia obliczona na podstawie modelu.

Współczynnik korelacji wartości zmierzonych M_i i wyznaczonych modelowo C_i można określić na podstawie zależności [10]:

$$k = \frac{\sum_{i=1}^N (C_i - \bar{C})(M_i - \bar{M})}{\sqrt{[\sum_{i=1}^N (C_i - \bar{C})^2][\sum_{i=1}^N (M_i - \bar{M})^2]}} \quad (13)$$

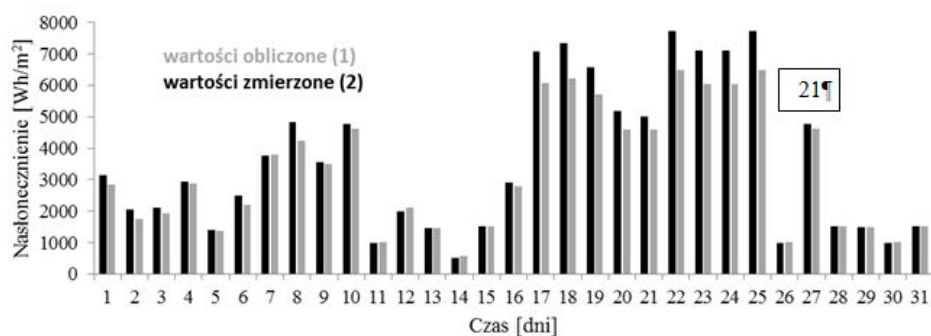
Irradiancja na płaszczyźnie poziomej została zmierzona za pomocą krzemowego czujnika mikroprocesorowego LB – 900, stanowiącego element stanowiska badawczego przedstawionego na rysunku 1. Na podstawie uzyskanych wartości, dla przyjętego kroku pomiarowego, obliczono wartość dobowego nasłonecznienia, rozumianego jako suma natężenia promieniowania słonecznego na jednostkowej powierzchni i w przyjętym okresie czasu. Wartość tej wielkości porównano następnie z wartością obliczoną na podstawie modelu Hargreavesa – Samani.



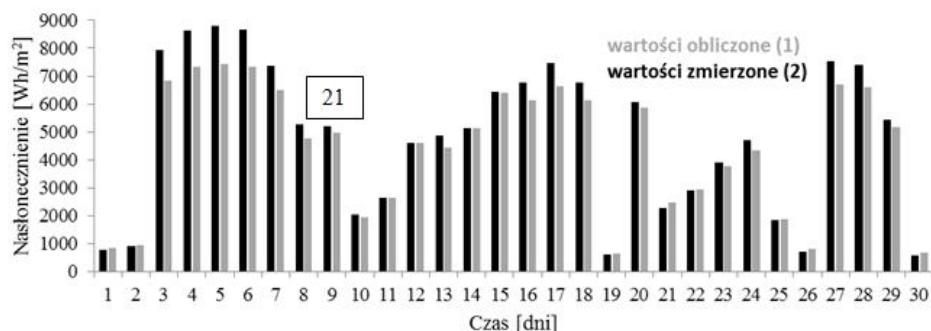
Rys. 1. Widok przygotowanego stanowiska badawczego wyposażonego w krzemowy czujnik gęstości mocy promieniowania słonecznego

4. WYNIKI POMIARÓW I OBLICZEŃ

Na rysunku 2 i 3 zestawiono wyniki wyznaczonego miesięcznego nasłonecznienia dla płaszczyzny horyzontalnej, które następnie porównano z wartościami tej wielkości obliczonymi z wykorzystaniem modelu Hargreavesa – Samani, opisanego za pomocą zależności (7).



Rys. 2. Porównanie wartości dobowego nasłonecznienia dla miesiąca marca 2015 roku na podstawie pomiarów i wyników z modelu Hargreavesa – Samani



Rys. 3. Porównanie wartości dobowego nasłonecznienia dla miesiąca września 2015 roku na podstawie pomiarów i wyników z modelu Hargreavesa – Sama

5. PODSUMOWANIE

Celem pracy było określenie dokładności modelu temperaturowego Hargreavesa – Samani, stosowanego do estymacji czasowego nasłonecznienia na płaszczyźnie poziomej, dla lokalnych warunków klimatycznych miasta Poznań. Zależą analizowanego modelu jest ograniczenie w algorytmie obliczeniowym do danych wyłącznie dotyczących maksymalnej i minimalnej temperatury powietrza oraz wartości pozaatmosferycznego nasłonecznienia, przy wyznaczaniu dobowego nasłonecznienia na płaszczyźnie poziomej zlokalizowanej na po-

wierzchni Ziemi, bez uwzględniania korelacji pomiędzy tą wartością i innymi zmiennymi jak nasłonecznienie, zachmurzenie nieba, długość dnia, wielkość opadu czy prędkość wiatru.

Wyznaczone wartości współczynnika korelacji liniowej Pearsona (przekraczające 0,90) wskazują na silną zależność funkcyjną pomiędzy wartością zmierzoną nasłonecznienia i wyznaczoną na podstawie modelu matematycznego dla wybranych miesięcy roku (marzec i wrzesień 2015 roku) i wynoszą odpowiednio 0,982 i 0,985. Należy zaznaczyć, że dalsza analiza powinna zostać uzupełniona o sprawdzenie istotności statystycznej uzyskanych wyników z wykorzystaniem testów „t” lub „z” (w zależności od liczebności próby) lub dostępnych diagramów korelacji.

Wartość błędu MBE może wskazywać czy nastąpiło przeszacowanie lub niedoszacowanie wartości nasłonecznienia, wyznaczonego na podstawie modelu matematycznego w stosunku do wartości zmierzonej. Na podstawie analizy błędów RMSE% i MBE%, wynoszących dla miesiąca marca i września 2015 roku odpowiednio 15,25 % i – 9,32 % oraz 12,54 % i – 7,85 % stwierdza się, że w znacznej większości przypadków zastosowanie modelu H – S prowadzi do niewielkiego niedoszacowania wartości czasowego nasłonecznienia.

Na podstawie analizy błędu RMSE% stwierdzono, że analizowany model charakteryzuje się nieznacznie większym błędem dla miesiąca zimowo – wiosennego, gdy należałoby uwzględnić większy wpływ promieniowania dyfuzyjnego w całkowitym promieniowaniu słonecznym [2].

Mimo dobrej zgodności wyników pomiarów i obliczeń końcową ocenę dokładności modelu Hargreavesa – Samani należy przeprowadzić na podstawie wieloletnich danych pozyskanych z pomiarów.

LITERATURA

- [1] Augustine C., Nnabuchi M.: Empirical models for the correlation of global solar radiation with meteorological data for Enugu, Nigeria, *The Pacific Journal of Science and Technology*, 1, 2009, 693 – 700.
- [2] Frydrychowicz – Jastrzębska G., Bugała A.: Modeling the Distribution of Solar Radiation on a Two–Axis Tracking Plane for Photovoltaic Conversion, *Energies*, Vol. 8, Issue 2, 2015, 1025 – 1041.
- [3] Hargreaves G.H., Samani Z.A.: Estimating potential evapotranspiration, *Journal of the Irrigation & Drainage Division*, Vol. 108, No. 3, 1982, 225 – 230.
- [4] Huashan L., Fei C., Xianlong W., Weibin M.: A Temperature – Based Model for Estimating Monthly Average Daily Global Solar Radiation in China, *The Scientific World Journal*, 2014, 1 – 9.
- [5] Jakhrani A., Samo S., Rigit A., Kamboh S.: Selection of models for calculation of incident solar radiation on tilted surfaces, *World Appl. Sci. J.*, 2013, 22, 1334 – 1343.

- [6] Kamali G., Moradi I., Khalili A.: Estimating solar radiation on tilted surfaces with various orientations: A study case in Karai (Iran), *Theor. Appl. Climatol.*, 2006, 84, 235 – 241.
- [7] Lima J., Antonino A., Souza E., Hammecker C., Montenegro S., Lira C.: Calibration of Hargreaves – Samani Equation for Estimating Reference Evapotranspiration in Sub – Humid Region of Brazil, *Journal of Water Resource and Protection*, 5, 2013, 1 – 5.
- [8] Ministerstwo Infrastruktury i Rozwoju <https://cms.transport.gov.pl> (dostęp on – line 20 kwietnia 2014).
- [9] Noorian A., Moradi I., Kamali G.: Evaluation of 12 models to estimate hourly diffuse irradiation on inclined surfaces, *Renew. Energy*, 2008, 33, 1406 – 1412.
- [10] Notton G., Paggi P., Cristofari C.: Predicting hourly solar irradiations on inclined surfaces based on the horizontal measurements: Performances of the association of well – known mathematical models, *Energy Conversion and Management*, 47, 2006, 1816 – 1829.
- [11] Ugwu A., Ugwuanyi J.: Performance assessment of Hargreaves model in estimating solar radiation in Abuja using minimum climatological data, *International Journal of the Physical Sciences*, Vol. 6(31), 2011, 7285 – 7290.
- [12] Włodarczyk D., Nowak H.: Statistical analysis of solar radiation models onto inclined planes for climatic conditions of Lower Silesia in Poland, *Arch. Civil. Mech. Eng.*, 2, 2009, 127 – 144.

**PERFORMANCE ASSESSMENT OF HARGREAVES – SAMANI MODEL
IN ESTIMATING INSOLATION IN PHOTOVOLTAICS
IN POLISH CLIMATIC CONDITIONS**

Occurring in the literature isotropic, anisotropic or pseudoisotropic mathematical models allow to determine the power density of solar radiation basing on the different, often not very detailed or even incomplete measurement sequences. Complex measurement stand and difficulties in conducting experiments at any latitude make it necessary to estimate that value and the accuracy of the results determines the validity of their application in different geographical locations. The aim of the study is to analyze the effectiveness of the Hargreaves – Samani model in estimating global solar radiation for the local climatic conditions (Poznań, 52°25' N, 16°56' E). The input data in the model are the maximum and minimum daily air temperature obtained from the meteorological station located in the city of Poznań. The analyzed model describes the value of the RMS and MBE error at the level of 12,54 % and – 7,85 % which indicates the possibility of its use for selected periods of the year.

(Received: 13. 02. 2017, revised: 27. 02. 2017)