

Bartosz CHWIEDUK¹

PORÓWNANIE MODELI PROMIENIOWANIA SŁONECZNEGO

W artykule porównano wyniki obliczeń napromieniowania słonecznego na powierzchnię skierowaną w różnych kierunkach oraz pochylonych pod różnym kątem. Do obliczeń wykorzystano dane meteorologiczne zaczerpnięte z kilku stacji pogodowych zlokalizowanych w Warszawie, Suwałkach, Gdańsku i Kołobrzegu. Dane napromieniowania na powierzchnię poziomą zostały zaczerpnięte ze strony internetowej www.meteonorm.com. W pierwszej kolejności przedstawiono porównywane modele promieniowania słonecznego. Wskazano jakiego rodzaju promieniowanie słoneczne jest uwzględniane w poszczególnych modelach. W następnym kroku porównano wartości napromieniowania dla powierzchni skierowanej na południe i pochylonej pod kątem 45° względem horyzontu w czterech uwzględnionych miejscowościach. Wskazano różnice w wynikach obliczeń przeprowadzonych obydwoma modelami i opisano z czego one wynikają. Kolejnym etapem analizy było wyznaczenie odpowiednich usytuowań powierzchni maksymalizując zyski energetyczne w przeciągu całego roku, w okresie letnim oraz zimowym. Na koniec porównano napromieniowanie na powierzchni pochylone pod kątem 45° zorientowane w cztery strony świata i wyciągnięto odpowiednie wnioski. Wskazano jakie orientacje i pochylenie powierzchni czołowych odbiorników energii promieniowania słonecznego są najbardziej zalecane ze względu na uzyskiwanie największych zysków energetycznych od promieniowania słonecznego.

Słowa kluczowe: promieniowanie słoneczne, modele promieniowania słonecznego dyfuzyjnego, napromieniowanie różnie usytuowanych powierzchni w Polsce

1. Wstęp

W nowoczesnym budownictwie jednorodzinym duży wpływ na usytuowanie oraz orientację budynku ma dostępność promieniowania słonecznego. W przypadku dobrze zaplanowanego i przemyślanego rozmieszczenia pomieszczeń oraz przegród przeszklonych znacząco można zwiększyć zyski energetyczne od promieniowania słonecznego, a także skrócić czas trwania okresu ogrzewczego. W przypadku urządzeń korzystających z energii promieniowania słonecznego do wytwarzania energii cieplnej, bądź elektrycznej odpowiednie zorientowanie

¹ Bartosz Chwieduk, Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego, Katedra Podstaw Inżynierii, Zakład Podstaw Nauk Technicznych, ul. Nowoursynowska 164, 02-787 Warszawa; tel. 606325523

oraz pochylenie dachu budynku gwarantuje znaczne zmniejszenie zapotrzebowania na energię do przygotowania ciepłej wody użytkowej lub zmniejszenie poboru energii elektrycznej z sieci elektroenergetycznej. Stosując moduły fotowoltaiczne zintegrowane z dachem budynku zyski czerpać można także ze sprzedaży wyprodukowanej energii z systemu fotowoltaicznego. Istnieją także urządzenia wytwarzające jednocześnie energię ciepłą, jak i elektryczną korzystając z energii promieniowania słonecznego tzw. moduły PVT (photovoltaic thermal).

Dokładne wyznaczenie zysków energetycznych od promieniowania słonecznego gwarantuje opłacalność inwestycji, np. w kolektory słoneczne lub moduły fotowoltaiczne, bądź prawidłowe oszacowanie czasu zwrotu instalacji. W zależności od preferencji i wymagań przyszłych mieszkańców zorientowanie i pochylenie dachu budynku może się wyraźnie różnić.

W artykule przeprowadzono analizę zysków energetycznych od promieniowania słonecznego dla kilku miejscowości w Polsce wykorzystując dane meteorologiczne programu Meteonorm [8]. Stacje meteorologiczne, z których pochodzą dane do obliczeń zlokalizowane są w: Gdańsku, Kołobrzegu, Suwałkach i Warszawie. Analiza porównawcza dotyczy dwóch modeli promieniowania słonecznego najczęściej wykorzystywanych do wyznaczania zysków energetycznych instalacji słonecznych i rozwiązań pasywnych budynku.

2. Model izotropowy promieniowania słonecznego

Pierwszy z modeli to model izotropowy promieniowania słonecznego, drugi jest modelem anizotropowym uwzględniającym więcej składowych promieniowania dyfuzyjnego. Wg modelu izotropowego Liu-Jordana [3] godzinowe całkowite promieniowanie słoneczne padające na dowolnie pochyloną powierzchnię I_c zależy od następujących składowych promieniowania: bezpośredniego I_b , rozproszonego I_d oraz odbitego. Składowa promieniowania odbitego zależna jest od promieniowania całkowitego padającego na powierzchnię poziomą. Aby uzyskać wartość promieniowania słonecznego padającego na powierzchnię dowolnie pochyloną każda z wyżej wymienionych składowych promieniowania słonecznego jest korygowana odpowiednim współczynnikiem. Zależność opisująca wartość godzinową promieniowania słonecznego prezentuje się następująco:

$$I_c(t) = I_b(t)R_b(t) + I_d(t)R_d + (I_b(t) + I_d(t))\rho_r R_r \quad (1)$$

gdzie:

I_b – godzinowe napromieniowanie bezpośrednio powierzchni poziomej [Wh/m^2],

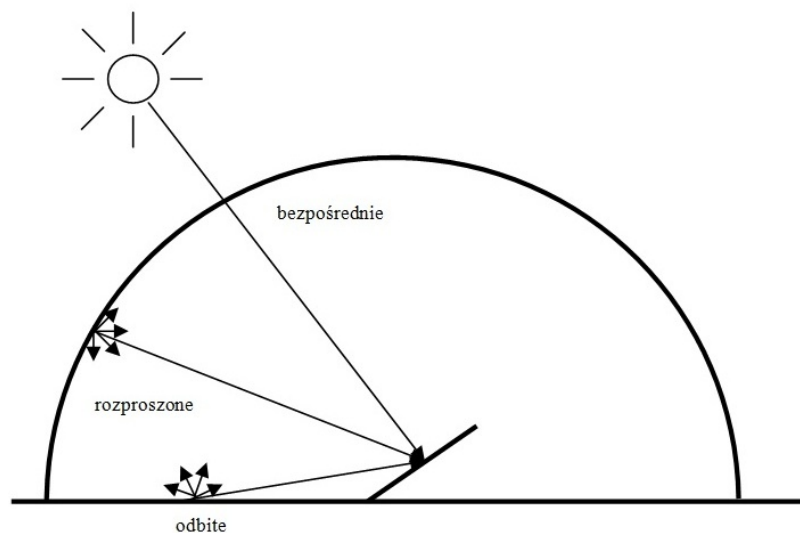
I_d – godzinowe napromieniowanie rozproszone powierzchni poziomej [Wh/m^2],

ρ_r – refleksyjność podłoża,

R_b – współczynnik korekcyjny dla promieniowania bezpośredniego,

R_d – współczynnik korekcyjny dla promieniowania rozproszonego,

R_r – współczynnik korekcyjny dla promieniowania odbitego.



Rys. 1. Składowe promieniowania słonecznego w modelu izotropowym

Fig. 1. Components of solar radiation in an isotropic model

Za pomocą współczynników korekcyjnych wyznaczyć można składowe promieniowania słonecznego padającego na dowolnie usytuowaną powierzchnię. Współczynniki R_d i R_r korygujące odpowiednio promieniowanie rozproszone oraz promieniowanie odbite zależne są jedynie od pochylecia rozpatrywanej powierzchni względem horyzontu [3]. Są one opisane następującymi równaniami:

$$R_d = \frac{1 + \cos\beta}{2} \quad (2)$$

$$R_r = \frac{1 - \cos\beta}{2} \quad (3)$$

W przypadku, gdy mamy do czynienia z powierzchnią poziomą współczynnik R_r równy jest 0, co oznacza, że do danej powierzchni nie dociera promieniowanie odbite od gruntu. Współczynnik korekcyjny promieniowania rozproszonego R_d jest wtedy równy 1. Współczynnik R_b uzależnia bezpośrednio promieniowanie słoneczne na powierzchnię dowolnie pochyloną skierowaną od promieniowania bezpośredniego na powierzchnię poziomą I_b . Współczynnik ten jest funkcją kąta padania promieniowania na daną powierzchnię np. kolektora słonecznego ($\theta_\beta = 0$ - kierunek normalny do płaszczyzny) oraz kąta padania promieniowania na powierzchnię poziomą θ_z .

$$R_b = \frac{\cos\theta_\beta}{\cos\theta_z} \quad (4)$$

gdzie $\cos\theta_\beta$ opisany jest zależnością:

$$\begin{aligned} \cos\theta_\beta = \sin\delta\sin\phi\cos\beta - \sin\delta\cos\phi\sin\beta\cos\gamma + \cos\delta\cos\phi\cos\beta\cos\omega + \\ + \cos\delta\sin\phi\sin\beta\cos\gamma\cos\omega + \cos\delta\sin\beta\sin\gamma\sin\omega \end{aligned} \quad (5)$$

a $\cos\theta_z$ to:

$$\cos\theta_z = \cos\phi\cos\delta\cos\omega + \sin\phi\sin\delta \quad (6)$$

Współczynnik R_b bezpośrednio zależy od:
 δ – deklinacji Słońca [°]

$$\delta = 23,45 \sin\left(360 \frac{284+n}{365}\right) [^\circ] \quad (7)$$

ϕ – szerokości geograficznej [°],
 β – pochylenia odbiornika względem horyzontu [°],
 γ – azymutu odbiornika [°],
 ω – kąta godzinowego [°],

$$\omega = 15(\tau_{s\text{lon}} - 12^{00}) \quad (8)$$

$\tau_{s\text{lon}}$ – czas słoneczny [h] - jest czasem, w którym stacje aktynometryczne dokonują pomiarów promieniowania słonecznego i wysokości Słońca; czas słoneczny wyznacza się z zależności:

$$\tau_{s\text{lon}} = E + \tau_{str} + 4(L_{st} - L_{lok}) \quad (9)$$

$$\begin{aligned} E = 229,2[0,000075 + 0,001868\cos B - 0,032077\sin B - \\ - 0,014615 \cos(2B) - 0,04089 \sin(2B)] \end{aligned} \quad (10)$$

$$B = (n - 1)360/365 [^\circ] \quad (11)$$

E – równanie czasu,
 τ_{str} – czas strefowy [h],
 L_{lok} – lokalny południk [°],
 L_{st} – południk strefowy [°],
 n – kolejny dzień roku.

3. Model anizotropowy promieniowania słonecznego

Model izotropowy promieniowania słonecznego przyjmuje, że promieniowanie rozproszone dociera do powierzchni dowolnie skierowanej w sposób równomierny z całej półsfery niebieskiej. Aby móc dokładniej określać natężenie promieniowania słonecznego i uwzględnić jego częściową kierunkowość rozchodzenia się w atmosferze w latach 90-tych XX wieku stworzony został anizotropowy model promieniowania słonecznego. Model Haya i Daviesa [4] oprócz izotropowego promieniowania rozproszonego uwzględnia także promieniowanie okołosłoneczne ukierunkowane. Do wzoru na całkowite godzinne promieniowanie padające na dowolnie pochyloną powierzchnię I_c wprowadzono indeks anizotropowości promieniowania rozproszonego A_i . Jest to stosunek promieniowania bezpośredniego na powierzchni ziemi i promieniowania na zewnętrznej warstwie atmosfery, zależny od pochodnej stałej słonecznej G_{sc} . Model izotropowy promieniowania słonecznego przyjmuje, że promieniowanie rozproszone dociera do powierzchni dowolnie skierowanej w sposób równomierny z całej półsfery niebieskiej. Aby móc dokładniej określać natężenie promieniowania słonecznego i uwzględnić jego częściową kierunkowość rozchodzenia się w atmosferze w latach 90-tych XX wieku stworzony został anizotropowy model promieniowania słonecznego. Model Haya i Daviesa [4] oprócz izotropowego promieniowania rozproszonego uwzględnia także promieniowanie okołosłoneczne ukierunkowane. Do wzoru na całkowite godzinne promieniowanie padające na dowolnie pochyloną powierzchnię I_c wprowadzono indeks anizotropowości promieniowania rozproszonego A_i . Jest to stosunek promieniowania bezpośredniego na powierzchni ziemi i promieniowania na zewnętrznej warstwie atmosfery, zależny od pochodnej stałej słonecznej G_{sc} .

$$A_i(t) = \frac{I_b(t)}{I_o(t)} = \frac{I_b(t)}{I_{sc}(t) \left(1 + 0,033 \cos \frac{360n(t)}{365}\right) (\sin(\delta(t)) \sin(\phi) + \cos(\delta(t)) \cos(\phi) \cos(\omega(t)))} \quad (12)$$

Indeks A_i równe zero oznacza, że do powierzchni ziemi nie dociera promieniowanie bezpośrednie. W przypadku wysokiego udziału promieniowania bezpośredniego w promieniowaniu rozproszonym przeważa promieniowanie okołosłoneczne ukierunkowane.

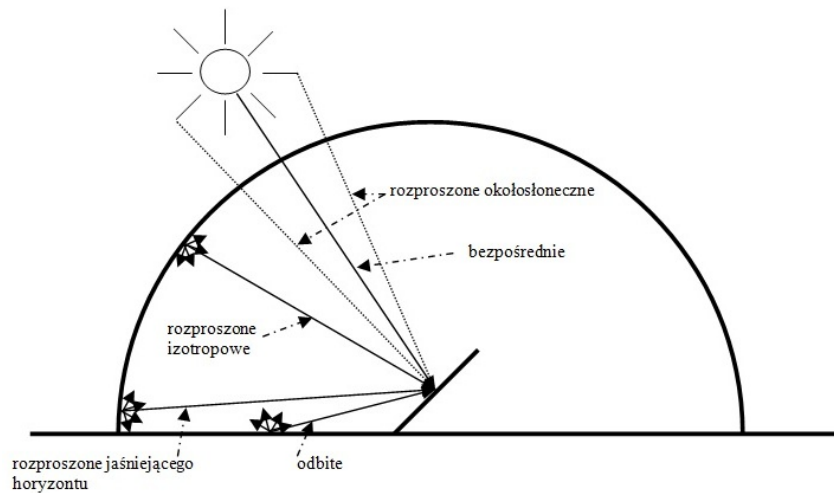
Drugim rodzajem promieniowania rozproszonego, jakie nie uwzględnia model izotropowy Liu-Jordana, jest promieniowanie jaśniejącego horyzontu, które rośnie wraz ze wzrostem pochylenia powierzchni, na którą pada promieniowanie słoneczne [7]. Współczynnik korekcji promieniowania jaśniejącego horyzontu $R_{d,hz}$ wprowadzony został do modelu Haya i Davisa przez Reindla [6].

$$R_{d,hz} = 1 + \sin^3\left(\frac{\beta}{2}\right) \quad (13)$$

Ostatnią z modyfikacji, którą wprowadził do modelu anizotropowego promieniowania słonecznego Klucher na początku lat 90-tych jest wskaźnik stopnia zachmurzenia f zależący od promieniowania bezpośredniego i całkowitego docierającego do powierzchni poziomej[5].

$$f(t) = \sqrt{\frac{I_b(t)}{I_b(t)+I_d(t)}} \quad (14)$$

W przypadku braku promieniowania bezpośredniego do powierzchni ziemi dociera jedynie promieniowanie rozproszone, a wskaźnik f jest równy 0.



Rys. 2. Składowe promieniowania słonecznego w modelu anizotropowym

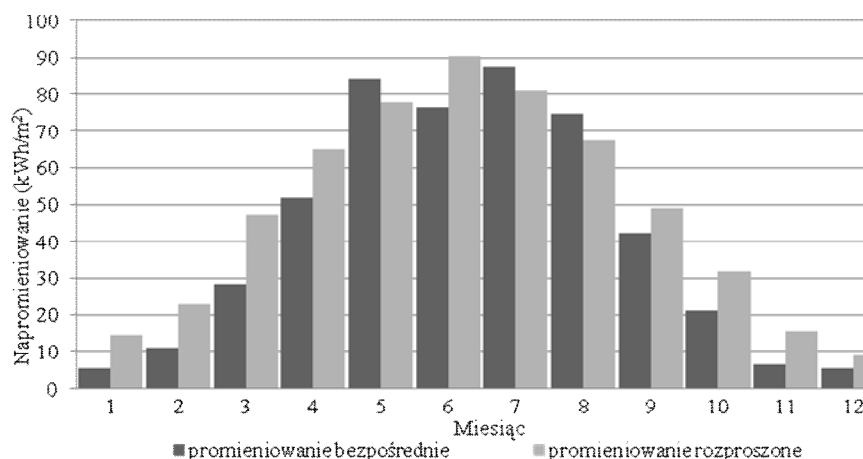
Fig. 2. Components of solar radiation in an anisotropic model

Po wprowadzeniu tych modyfikacji do modelu izotropowego promieniowania słonecznego stworzony został model HDKR (Hay, Davies, Klucher, Reindl) [6] wyrażany następującą zależnością:

$$I_s(t) = (I_b(t) + I_d(t)A_i(t))R_b(t) + I_d(t)(1 - A_i(t))(R_d) \left[1 + f(t) \sin^3 \left(\frac{\beta}{2} \right) \right] + (I_b(t) + I_d(t))\rho_g(R_o) \quad (15)$$

4. Obliczenia dla powierzchni skierowanych na południe i pochylonych pod kątem 45°

Obliczenia napromieniowania słonecznego powierzchni skierowanych na południe i pochylonych pod kątem 45° przeprowadzono z godzinowym krokiem czasowym dla kilku miejscowości na terenie Polski. Dane meteorologiczne napromieniowania całkowitego i rozproszonego pochodzą z bazy programu Meteonorm i odnoszą się do stacji pogodowych znajdujących się w Warszawie, Gdańsku, Kołobrzegu i Suwałkach. Na potrzeby obliczeń w pierwszej kolejności wyznaczono napromieniowanie bezpośrednie na powierzchnię poziomą I_b , które jest różnicą napromieniowania całkowitego i rozproszonego (promieniowanie całkowite i rozproszone jest mierzone przez stacje meteorologiczne i podawane jako dane pomiarowe).

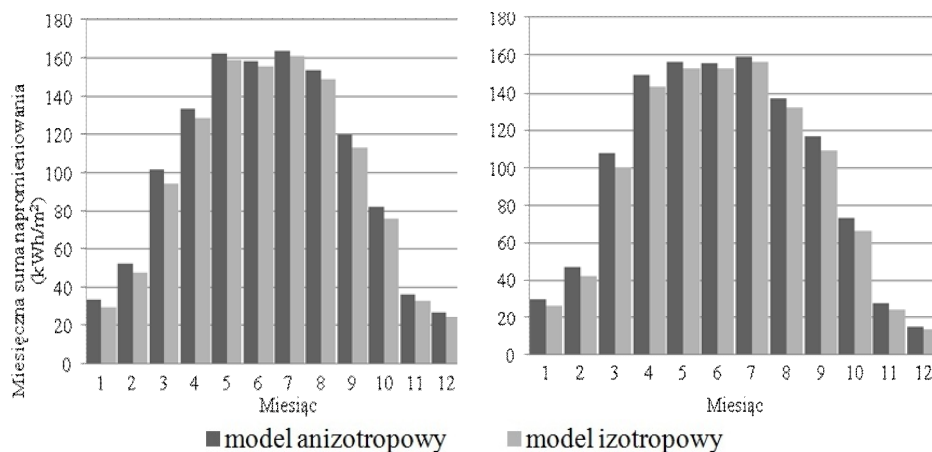


Rys. 3. Miesięczne sumy napromieniowania bezpośredniego i rozproszonego na powierzchnię poziomą dla Warszawy

Fig. 3. Monthly sums of direct and diffused radiation to the horizontal surface for Warsaw

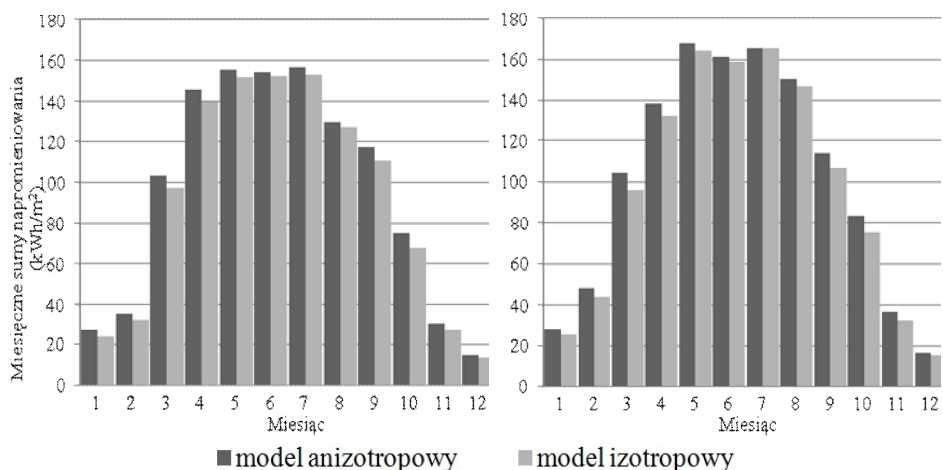
Na podstawie równań zamieszczonych w poprzednich rozdziałach (1) ÷ (15) wyznaczono godzinowe napromieniowanie I_s i I_c w kolejnych godzinach roku dla różnie zorientowanych powierzchni.

W pierwszym kroku porównano zyski energetyczne dla powierzchni pochylonej pod kątem 45° skierowanej na południe. Rysunki 3-6 prezentują miesięczne sumy napromieniowania dla wybranych miejscowości.



Rys. 4-5. Miesięczne sumy napromienienia na powierzchnię skierowaną na południe pochyloną pod kątem 45° dla Warszawy (4) i Suwałki (5)

Fig. 4-5. Monthly sums of the irradiation values for the south facing surface inclined at the 45° for Warsaw (4) and Suwałki (5)



Rys. 6-7. Miesięczne sumy napromienienia na powierzchnię skierowaną na południe pochyloną pod kątem 45° dla Gdańska (6) i Kołobrzegu (7)

Fig. 6-7. Monthly sums of the irradiation values for the south facing surface inclined at the 45° for Gdańsk (6) and Kołobrzeg (7)

Z obliczeń wyraźnie wynika, że sumaryczne miesięczne napromienianie słoneczne powierzchni południowych wyznaczone przy użyciu modelu anizotropowego jest wyższe niż przy użyciu modelu izotropowego [1,2]. W przypadku Warszawy całkowite roczne napromienianie słoneczne na powierzchnię pochyloną pod kątem 45° skierowaną na południe to $1226,7 \text{ kWh/m}^2$ dla modelu

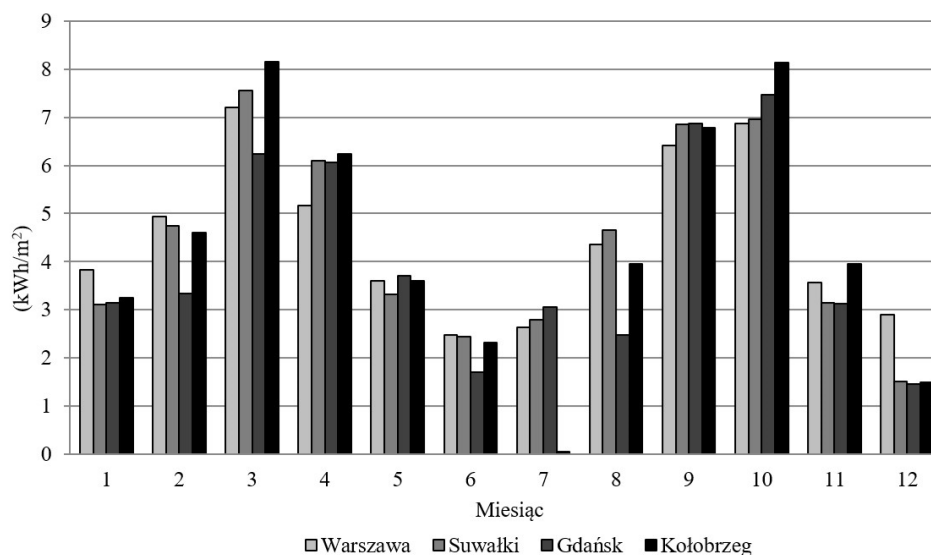
anizotropowego oraz $1172,7 \text{ kWh/m}^2$ dla modelu izotropowego. Różnica w wynikach tych obliczeń odniesiona do modelu izotropowego to 4,6%. Roczne zestawienie wyników obliczeń nie oddaje całości obrazu. W przypadku miesięcy zimowych różnica pomiędzy wynikami jest wyraźniejsza i sięga do 12,8% w styczniu. W miesiącach letnich, gdy napromieniowanie na daną powierzchnię jest wysokie oba modele dają zbliżone wyniki. Wartości uzyskane przy zastosowaniu modelu anizotropowego są od 1,6 do 3% wyższe.

Całkowite roczne napromieniowanie w Suwałkach wynosi $1176,4 \text{ kWh/m}^2$ dla modelu anizotropowego i $1123,2 \text{ kWh/m}^2$ w przypadku użycia do obliczeń modelu izotropowego. W porównaniu do napromieniowania występującego w Warszawie jest ono nieznacznie niższe. Procentowa różnica pomiędzy oboma modelami wynosi 4,7%. Tak, jak przy obliczeniach przeprowadzonych dla danych meteorologicznych ze stacji zlokalizowanej w Warszawie, wyniki obu modeli w miesiącach letnich są zbliżone, jednak w miesiącach zimowych i przejściowych różnica wynosi ponad 10%.

Całkowite roczne napromieniowanie w Gdańsku na powierzchnię skierowaną na południe pochyloną pod kątem 45° jest najmniejsze spośród rozważanych lokalizacji. Wg modelu anizotropowego wynosi ono $1146,8 \text{ kWh/m}^2$, a dla modelu izotropowego $1098,2 \text{ kWh/m}^2$. W tym przypadku oznacza to 4,4% różnicy. Tak, jak i w przypadku Warszawy największa różnica napromieniowania w obydwu modelach występuje w styczniu i wynosi 13%.

Całkowite wartości napromieniowania słonecznego w Kołobrzegu są bardzo zbliżone do wartości obliczonych dla Warszawy i wynoszą $1215,2 \text{ kWh/m}^2$ dla modelu anizotropowego oraz $1162,6 \text{ kWh/m}^2$ dla izotropowego. Tak, jak i we wszystkich poprzednio rozważanych przypadkach, sumaryczna wartość napromieniowania słonecznego dla modelu anizotropowego jest wyższa niż dla modelu izotropowego. Różnica wynosi około 4,5%. Największa różnica w wynikach występuje w listopadzie i jest na poziomie 12%. W miesiącach letnich natomiast wyniki obliczeń są bardzo zbliżone. Ich różnica to około 2%.

Na rysunku 8 przedstawiono bezwzględne różnice w napromieniowaniu na daną powierzchnię dla rozpatrywanych lokalizacji. We wszystkich przypadkach wyższe sumy napromieniowania dawały wyniki obliczeń modelem anizotropowym.



Rys. 8. Bezwzględne różnice napromieniowania w kolejnych miesiącach roku między modelem anizotropowym, a izotropowym

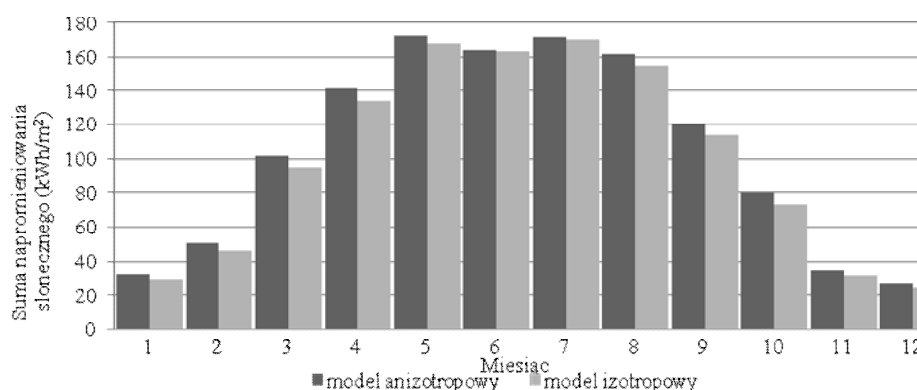
Fig. 8. Absolute irradiation differences between an anisotropic and isotropic model in successive months of the year

Na podstawie zaprezentowanych wyników obliczeń można zauważyć, że najmniejsze różnice procentowe, jak i bezwzględne pomiędzy dwoma rozpatrywanymi modelami występują w miesiącach letnich od maja do sierpnia. Największe bezwzględne różnice można zaobserwować w miesiącach przejściowych. Jeżeli jednak odniesiemy poziom napromieniowania na daną powierzchnię w kolejnych miesiącach do rozważanych modeli to okazuje się, że procentowo wyniki obliczeń najbardziej odbiegają od siebie w miesiącach zimowych. Małe różnice w rezultatach obliczeń dla obydwu modeli uzyskiwane w okresie letnim wynikają z tego, że powierzchnia skierowana na południe i pochylona pod kątem 45° nie przez cały dzień "widzi" bezpośrednio tarczę słoneczną. W godzinach porannych i wieczornych do rozpatrywanej powierzchni dociera jedynie promieniowanie rozproszone. W okresie zimowym natomiast powodem występowania małych różnic w obliczeniach jest mała dostępność promieniowania bezpośredniego. Wpływ promieniowania rozproszonego okołosłonecznego na wyniki obliczeń modelem anizotropowym jest znikomy.

5. Optymalne usytuowanie rozpatrywanej powierzchni odbiornika pod względem jej maksymalnego napromieniowania słonecznego

Dla danych meteorologicznych ze stacji pogodowej zlokalizowanej w Warszawie wyznaczono optymalne usytuowanie powierzchni odbiornika energii promieniowania słonecznego. Wyróżnione zostały trzy przypadki. W pierwszym optymalizacja dotyczy rocznej sumy napromieniowania na powierzchnię dowolnie skierowaną. Drugi i trzeci rodzaj optymalizacji dotyczy okresów letniego oraz zimowego.

Optymalne usytuowanie powierzchni ze względu na roczne zyski energetyczne to dla modelu izotropowego, jak i anizotropowego odpowiada orientacji między kierunkiem południowym, a południowo-zachodnim. Powierzchnia powinna zostać obrócona o 28° od południa w stronę zachodu, w przypadku zastosowania modelu anizotropowego oraz o 19° stosując model izotropowy. Wg modelu izotropowego optymalne pochylenie powierzchni ze względu na sumaryczne roczne napromieniowanie to 34° natomiast, gdy do obliczeń użyjemy modelu anizotropowego optymalne pochylenie to 39° . Różnice te wynikają z uwzględniania przez model izotropowy jedynie promieniowania rozproszonego izotropowego. Na ilość docierającego do powierzchni napromieniowania rozproszonego ma wpływ także promieniowanie rozproszone okołosłoneczne i jaśniejszego horyzontu. Większy kąt pochylenia powierzchni wyznaczony modelem anizotropowym wynika ze względnie dużego współczynnika anizotropowości promieniowania słonecznego A_i . Całkowite zyski od promieniowania słonecznego w przypadku optymalnego ustawienia powierzchni odbiornika to odpowiednio $1202,5 \text{ kWh/m}^2\text{rok}$ dla modelu izotropowego i $1257,5 \text{ kWh/m}^2\text{rok}$ dla anizotropowego. Na rysunku 9 przedstawiono miesięczne napromieniowanie słoneczne na optymalnie zorientowaną powierzchnię dla Warszawy.

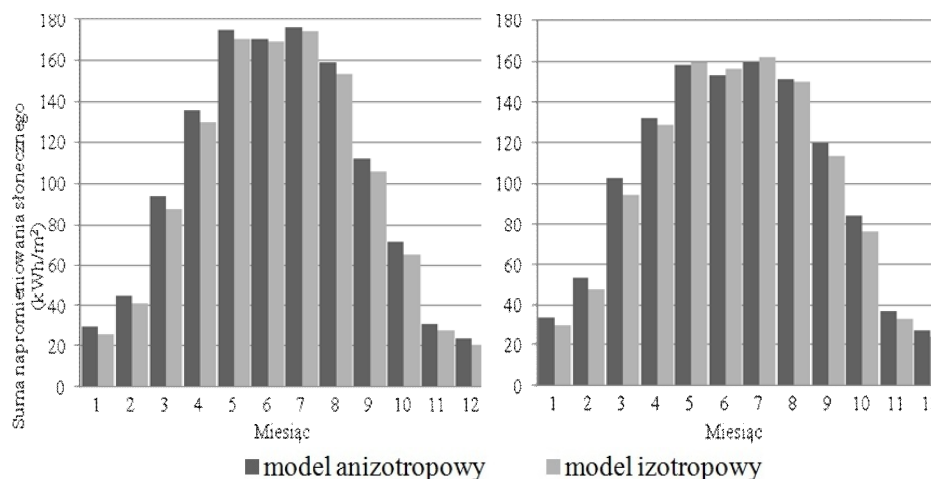


Rys.9. Miesięczne napromieniowanie na powierzchnię optymalnie zorientowaną dla modelu izotropowego i anizotropowego

Fig. 9. Monthly irradiation on the optimally oriented surface for isotropic and anisotropic models

W zależności od potrzeb i oczekiwań projektantów budynku i instalacji słonecznych, a także mieszkańców możliwa jest maksymalizacja zysków energetycznych od promieniowania słonecznego w okresie letnim albo zimowym. Dla okresu letniego optymalne pochylenie płaszczyzny będzie mniejsze ponieważ droga Słońca jest dłuższa niż w pozostałych okresach roku, powierzchnia o małym pochyleniu dłużej będzie "widzieć" Słońce, a Słońce w zenicie znajduje się najwyżej nad horyzontem. Miesiące, w których występują największe sumy napromieniowania to maj, czerwiec i lipiec. Pod kątem tych trzech miesięcy optymalizowano skierowanie i pochylenie powierzchni. Wg obliczeń przeprowadzonych modelem izotropowym powierzchnia odbiornika promieniowania słonecznego powinna zostać odchylona od kierunku południowego o 35° w stronę zachodu. Optymalne pochylenie powierzchni to 18° . Używając do obliczeń modelu anizotropowego promieniowania słonecznego optymalnym rozwiązaniem jest skierowanie rozpatrywanej powierzchni jeszcze bardziej w stronę zachodu. Powierzchnia ta powinna zostać przesunięta od południa w stronę zachodu o 36° . Pochylenie odbiornika względem horyzontu powinno wynosić 22° . Całkowite natężenie promieniowania słonecznego dla 3 rozważanych miesięcy to 521 kWh/m^2 i $513,6 \text{ kWh/m}^2$ w zależności od wybranego modelu. Jest to około 43% całkowitego rocznego napromieniowania. Roczne napromieniowanie jest o około 30 kWh/m^2 niższe niż w przypadku optymalizacji całorocznej i wynosi $1222,6 \text{ kWh/m}^2$ dla modelu anizotropowego oraz $1171,7 \text{ kWh/m}^2$ w przypadku zastosowania modelu izotropowego.

Trzecim optymalizowanym okresem była zima. Z przeprowadzonych obliczeń wynika, że najniższe napromieniowanie występuje w miesiącach: listopad, grudzień i styczeń. Pod kątem tych miesięcy optymalizowano orientację powierzchni. Optymalne zorientowanie powierzchni dla obu modeli jest bardzo zbliżone. Wg obliczeń napromieniowana powierzchnia powinna zostać skierowana na południe, jeżeli korzystamy z modelu anizotropowego. Natomiast dla modelu izotropowego odchylenie powierzchni powinno wynosić 1° w stronę zachodu. Analogicznie do optymalizacji całorocznej, pochylenie odbiornika energii promieniowania słonecznego jest większe dla modelu anizotropowego i wynosi dla rozpatrywanego okresu zimowego 51° . Przy zastosowaniu modelu izotropowego wartość optymalna to 44° . Całoroczne napromieniowanie wynosi wtedy $1176,3 \text{ kWh/m}^2$ dla modelu izotropowego oraz $1212,8 \text{ kWh/m}^2$ dla modelu anizotropowego. Na rysunkach 10 i 11 zaprezentowano sumy miesięczne napromieniowania na powierzchnię dobraną, tak aby energia promieniowania słonecznego była największa odpowiednio dla okresu letniego i zimowego.



Rys. 10-11. Miesięczne napromieniowanie na powierzchnię optymalnie zorientowaną dla modelu izotropowego i anizotropowego (po lewej stronie dla powierzchni optymalizowanej pod kątem maksymalizacji zysków słonecznych w okresie letnim) (po prawej stronie dla powierzchni optymalizowanej pod kątem maksymalizacji zysków słonecznych w okresie zimowym)

Fig. 10-11. Monthly irradiation on the optimally orientated surface for the isotropic and anisotropic model (for maximizing solar gains during the summer season on the left) (for maximizing solar gains during the winter season on the right)

Jak wynika z obliczeń w przypadku optymalizacji całorocznego napromieniowania słonecznego, jak i dla miesięcy letnich, we wszystkich miesiącach napromieniowanie wyznaczone modelem anizotropowym daje wyższe wartości od modelu izotropowego. W miesiącach letnich w ostatnim rozważanym przypadku, gdy zyski słoneczne optymalizowane są dla miesięcy zimowych model izotropowy daje wyższe wyniki niż model anizotropowy. Jest to rezultatem różnicy w pochyleniu optymalizowanej powierzchni. Pochylenie optymalnej powierzchni wyznaczonej modelem anizotropowym jest o kilka stopni większe niż to obliczone modelem izotropowym. Przy większym pochyleniu powierzchnia "widzi" mniej nieboskłonu.

6. Porównanie napromieniowania na powierzchnię pochyloną pod kątem 45° skierowaną na wschód, południe, zachód i północ

W poniższym rozdziale zaprezentowano wyniki obliczeń dla Warszawy dla powierzchni zorientowanej w czterech różnych podstawowych kierunkach: wschodnim, południowym, zachodnim i północnym. W tabelach 1-4 przedstawiono godzinowe napromieniowanie dla wybranych reprezentatywnych dni miesiąca.

I_c – napromieniowanie słoneczne na rozpatrywaną powierzchnię wyznaczone przy użyciu modelu izotropowego promieniowania słonecznego,

I_s – napromieniowanie słoneczne na rozpatrywaną powierzchnię wyznaczone przy użyciu modelu anizotropowego promieniowania słonecznego.

W tabelach wyróżniono komórki, w których jeden z modeli daje wyraźnie wyższe wyniki.

Tab. 1. Godzinowe wartości napromieniowania na powierzchnię pochyloną pod kątem 45° zorientowaną na wschód, południe, zachód i północ 17 stycznia

Tab. 1. Hourly irradiation values on a 45° inclined surface oriented east, south, west and north on January 17

Kierunek Godzina	Wschód		Południe		Zachód		Północ	
	I_c (W/m ²)	I_s (W/m ²)	I_c (W/m ²)	I_s (W/m ²)	I_c (W/m ²)	I_s (W/m ²)	I_c (W/m ²)	I_s (W/m ²)
8	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27
9	15,29	15,29	15,29	15,29	15,29	15,29	15,29	15,29
10	37,03	37,14	37,13	37,26	36,83	36,92	36,83	36,92
11	53,69	53,81	53,87	54,02	53,59	53,70	53,57	53,67
12	60,50	60,62	60,75	60,91	60,53	60,66	60,45	60,56
13	60,18	60,32	60,78	61,04	60,48	60,68	60,18	60,32
14	89,27	63,37	362,87	435,19	326,20	385,35	89,27	63,37
15	64,87	49,18	175,57	219,93	175,57	219,93	64,87	49,18
16	10,22	10,22	10,22	10,22	10,22	10,22	10,22	10,22
Suma (W/m ²)	391,33	350,23	776,75	894,13	738,99	843,02	390,95	349,80

Wyniki przeprowadzonych obliczeń dla dnia 17 stycznia pokazują, że model anizotropowy promieniowania słonecznego daje dla powierzchni skierowanej na wschód nieznacznie wyższe wyniki w godzinach porannych. Model anizotropowy uwzględnia promieniowanie rozproszone okołosłoneczne zależne od ilości promieniowania bezpośredniego docierającego do rozpatrywanej powierzchni. Powierzchnia pochylona pod kątem 45° i skierowana na wschód "widzi" bezpośrednio tarczę słoneczną do około godziny 13. Model izotropowy promieniowania rozproszonego nie uwzględnia kierunkowości promieniowania rozproszonego przez co wyniki obliczeń uzyskane tą metodą dają niższe wartości (do godziny 13). Jak wynika z równania 12, gdy na powierzchnię odbiornika nie pada promieniowanie bezpośrednie współczynnik anizotropowości A_i jest równy 0. W godzinach popołudniowych, natężenie promieniowania bezpośredniego jest bowiem wyższe niż w przedpołudniowych co model anizotropowy uwzględnia w składowej okołosłonecznej, dając wyższe wartości promieniowania dla tych powierzchni, które o tej porze dnia widzą "tarczę słoneczną", czyli południową i zachodnią.

Dla powierzchni skierowanej na południe model anizotropowy daje wyniki wyższe bądź równe tym wyznaczonym modelem izotropowym. Powierzchnia południowa przez cały dzień (od wschodu do zachodu) "widzi" tarczę słoneczną.

W godzinach popołudniowych 14 - 15 wartości wyznaczone za pomocą modelu anizotropowego są wyraźnie wyższe od obliczonych przy wykorzystaniu modelu izotropowego. Różnica w wynikach jest także spowodowana występowaniem promieniowania jaśniejszego horyzontu, które nie jest uwzględnione w modelu izotropowym. W godzinach porannych wpływ tego promieniowania może być niwelowany niższym wskaźnikiem stopnia zachmurzenia.

W przypadku powierzchni skierowanej na zachód wartości napromienienia są nieznacznie niższe od tych wyznaczonych dla powierzchni południowej. Także tutaj widać wyraźnie wpływ promieniowania rozproszonego okołosłonecznego na wyniki obliczeń. W godzinach, gdy na powierzchnię pochyloną pod kątem 45° i skierowaną na zachód pada promieniowanie bezpośrednie, współczynnik anizotropowości jest większy od 0, a model anizotropowy promieniowania słonecznego daje wyższe wyniki.

Do powierzchni północnej nie dociera promieniowanie bezpośrednie. Kierunkowość promieniowania rozproszonego nie ma wpływu na wyniki obliczeń obu modeli. Do godziny 14 wyniki napromienienia otrzymane z obu modeli są praktycznie takie same. W godzinach 14 - 15 napromienienie wyznaczone modelem izotropowym jest wyższe. Jest to spowodowane niskim wskaźnikiem stopnia zachmurzenia uwzględnianym w modelu anizotropowym.

Tab. 2. Godzinowe wartości napromienienia na powierzchnię pochyloną pod kątem 45° zorientowaną na wschód, południe, zachód i północ 15 kwietnia

Tab. 2. Hourly irradiation values on a 45° inclined surface oriented east, south, west and north on April 15

Kierunek Godzina	Wschód		Południe		Zachód		Północ	
	I_c (W/m ²)	I_s (W/m ²)	I_c (W/m ²)	I_s (W/m ²)	I_c (W/m ²)	I_s (W/m ²)	I_c (W/m ²)	I_s (W/m ²)
5	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27
6	61,69	65,13	44,67	45,16	40,09	39,79	45,70	46,37
7	167,51	180,29	130,08	133,59	103,69	100,64	112,08	111,12
8	256,38	272,98	229,50	237,93	178,21	171,04	185,90	181,07
9	305,99	319,40	299,79	311,13	240,82	232,52	245,78	239,12
10	360,69	372,74	375,19	392,27	305,14	297,92	290,64	278,39
11	390,59	397,49	435,13	457,92	363,71	361,02	319,17	300,59
12	406,59	403,04	497,82	528,40	430,54	435,96	339,31	310,60
13	362,72	348,03	476,16	504,88	444,27	460,79	330,83	303,93
14	291,55	272,78	393,40	413,70	397,77	419,74	295,92	278,82
15	262,15	244,80	340,14	355,90	372,56	402,08	272,41	259,41
16	186,54	177,26	227,32	234,80	274,26	301,03	197,38	192,55
17	112,03	108,75	123,24	124,61	155,23	169,85	121,18	121,70
18	47,92	47,00	47,92	47,00	56,62	60,90	55,52	59,14
19	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81
Suma (W/m ²)	3213,44	3210,78	3621,45	3788,37	3364,00	3454,37	2812,92	2683,91

Z wyników zamieszczonych w tabeli 2 wyraźnie widać wpływ kierunkowości promieniowania rozproszonego uwzględnianego w modelu anizotropowym. W dniu 15 kwietnia powierzchnia wschodnia bezpośrednio "widzi" tarczę słoneczną do południa w tych godzinach wartości napromieniowania wyznaczone modelem anizotropowym są wyższe. W ciągu całego dnia wartości obliczone dla obydwu modeli są bardzo zbliżone. Całkowita różnica to mniej niż 0,1%.

Dla powierzchni skierowanej na południe jedynie około godziny 18 godzinowe napromieniowanie jest nieznacznie wyższe dla modelu izotropowego. Jest to czas, w którym powierzchnia przestaje widzieć bezpośrednio tarczę słoneczną. W pozostałych przypadkach wyniki obliczeń dla modelu anizotropowego są wyższe. Różnica w dziennym napromieniowaniu na daną powierzchnię to blisko 5%.

Identycznie jak w przypadku powierzchni wschodniej i południowej na powierzchni zachodniej wyniki modelu anizotropowego są wyższe, gdy do powierzchni dociera promieniowanie bezpośrednie, a także promieniowanie rozproszone okołosłoneczne.

W dniu 15 kwietnia między wschodem, a zachodem Słońca mija około 14 godzin. Słońce wschodzi przed godziną 6, a zachodzi po 18. Do godziny 6 oraz po 18 powierzchnia północna bezpośrednio "widzi" tarczę słoneczną. Dla tych godzin napromieniowanie wyznaczone modelem anizotropowym jest nieznacznie wyższe od tego wyznaczonego modelem izotropowym.

Tab. 3. Godzinowe wartości napromieniowania na powierzchnię pochyloną pod kątem 45° zorientowaną na wschód, południe, zachód i północ 17 lipca

Tab. 3. Hourly irradiation values on a 45° inclined surface oriented east, south, west and north on July 17

Kierunek Godzina	Wschód		Południe		Zachód		Północ	
	I _c (W/m ²)	I _s (W/m ²)	I _c (W/m ²)	I _s (W/m ²)	I _c (W/m ²)	I _s (W/m ²)	I _c (W/m ²)	I _s (W/m ²)
4	0,36	0,36	0,36	0,36	0,36	0,36	0,36	0,36
5	91,58	98,43	34,28	32,88	34,28	32,88	74,22	78,58
6	281,69	308,73	105,84	101,47	78,95	69,79	158,42	163,44
7	434,71	473,33	241,45	241,72	128,06	105,84	230,20	228,25
8	550,49	594,04	400,10	409,35	188,40	149,36	296,89	282,59
9	619,22	657,04	541,94	561,25	267,62	221,25	344,91	317,04
10	666,87	691,44	681,70	709,61	388,30	350,13	373,47	331,96
11	628,11	634,32	744,98	778,35	509,06	487,62	392,19	343,59
12	565,50	550,70	775,66	811,75	617,87	615,75	407,71	354,70
13	474,83	440,10	720,14	754,67	669,34	689,53	424,03	374,97
14	340,48	283,31	689,11	716,23	743,14	783,32	394,51	350,40
15	240,09	168,46	574,55	592,08	739,71	801,27	386,03	353,31
16	192,27	132,65	431,02	434,10	714,53	792,07	357,84	341,70
17	141,53	98,97	253,31	240,30	623,66	708,54	317,40	321,33
18	95,15	69,08	95,15	69,08	437,45	511,08	269,27	293,91
19	60,28	50,46	60,28	50,46	140,98	170,40	140,98	170,40
20	4,71	4,71	4,71	4,71	4,71	4,71	4,71	4,71
Suma (W/m ²)	5387,86	5256,14	6354,57	6508,36	6286,44	6493,88	4573,14	4311,24

Dla miesięcy letnich najwyraźniej widać wpływ uwzględnienia kierunkowości promieniowania rozproszonego. Gdy na daną powierzchnię pada promieniowanie bezpośrednie i współczynnik anizotropowości A_i jest większy od 0 do powierzchni dociera promieniowanie rozproszone okołosłoneczne, a wyniki obliczeń modelem anizotropowym promieniowania rozproszonego są wyższe od tych wyznaczonych modelem izotropowym.

Tab. 4. Godzinowe wartości napromieniowania na powierzchnię pochyloną pod kątem 45° zorientowaną na wschód, południe, zachód i północ 15 października

Tab. 4. Hourly irradiation values on a 45° inclined surface oriented east, south, west and north on September 15

Kierunek Godzina	Wschód		Południe		Zachód		Północ	
	I_c (W/m ²)	I_s (W/m ²)	I_c (W/m ²)	I_s (W/m ²)	I_c (W/m ²)	I_s (W/m ²)	I_c (W/m ²)	I_s (W/m ²)
7	6,15	6,15	6,15	6,15	6,15	6,15	6,15	6,15
8	151,51	165,72	139,03	150,41	72,81	69,22	72,81	69,22
9	156,60	163,19	161,99	170,09	126,43	124,59	126,43	124,59
10	204,24	210,47	224,17	236,71	176,24	173,62	172,56	168,77
11	234,83	238,50	276,87	295,11	224,91	225,13	204,77	198,01
12	243,25	239,61	330,15	358,89	270,86	277,51	218,16	205,18
13	185,67	179,53	251,95	269,22	230,22	239,81	185,32	179,05
14	156,36	135,21	331,57	374,61	319,02	357,45	156,36	135,21
15	91,98	52,43	483,46	564,90	560,88	666,25	91,98	52,43
16	71,12	32,43	272,72	373,32	272,72	373,32	71,12	32,43
17	21,99	21,99	21,99	21,99	21,99	21,99	21,99	21,99
Suma (W/m ²)	1523,71	1445,24	2500,04	2821,39	2282,23	2535,04	1327,66	1193,03

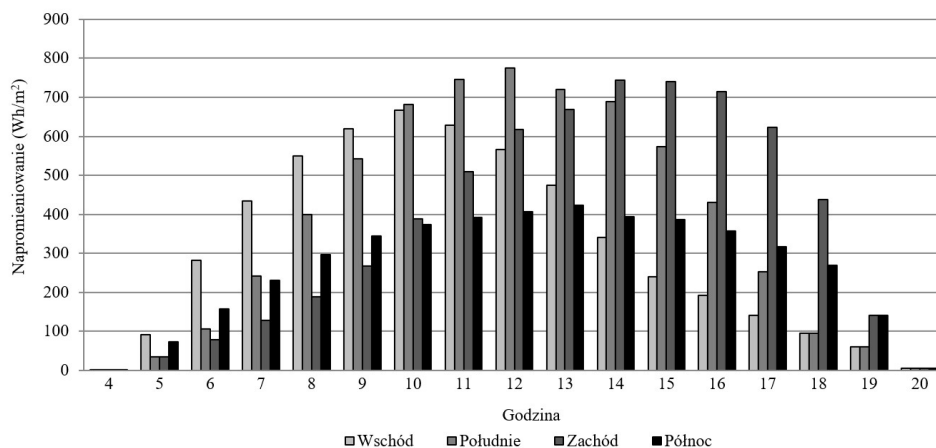
Wyniki obliczeń dla dnia 15 października prezentują się podobnie, jak te wyznaczone dla 15 kwietnia. Jako, że zaprezentowane dane dotyczą dnia jesienno do powierzchni północnej nie dociera promieniowanie bezpośrednie oraz rozproszone okołosłoneczne.

Należy zaznaczyć, że przedstawione wyniki obliczeń dotyczą jedynie pojedynczych dni roku i mogą one nie całkowicie odwzorowywać różnice występujące w modelach promieniowania słonecznego.

Analizując wyniki obliczeń godzinowego napromieniowania słonecznego wyraźnie widać wpływ uwzględniania przez model anizotropowy kierunkowości rozproszonego promieniowania słonecznego. Gdy do rozpatrywanej powierzchni dociera promieniowanie bezpośrednie, a w konsekwencji współczynnik anizotropowości promieniowania rozproszonego jest większy od 0 wtedy wyniki obliczeń dla modelu anizotropowego dają wyższe wartości niż wyniki obliczeń przeprowadzone modelem izotropowym. Większe zyski słoneczne w godzinach wieczornych obliczone modelem anizotropowym wynikają z występowania promieniowania jaśniejszego horyzontu i większego udziału promieniowania bezpośredniego w promieniowaniu całkowitym, w tym większego wskaźnika f .

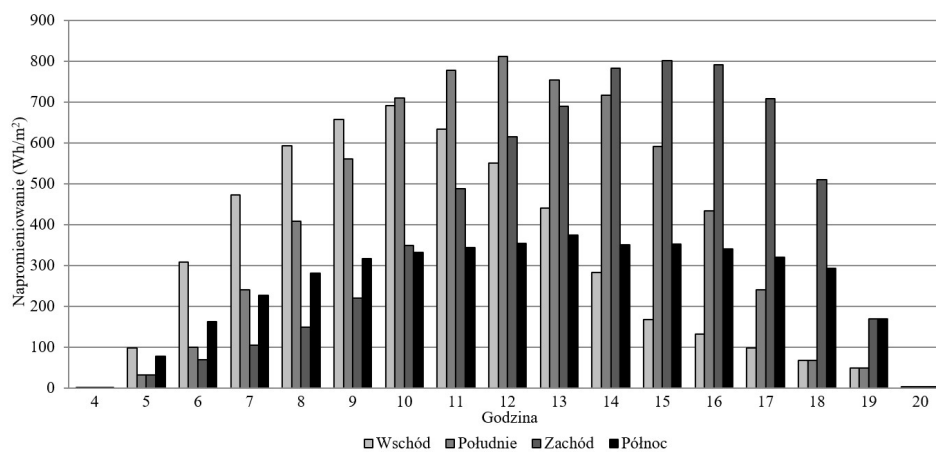
Rysunki 12 i 13 przedstawiają godzinowe napromieniowanie na poszczególne rozpatrywane w tym rozdziale powierzchnie.

Na wykresach wyraźnie widać jak kształtują się zyski słoneczne w kolejnych godzinach dnia dla poszczególnych powierzchni. Zauważyć można, że w godzinach porannych ilość energii promieniowania słonecznego docierająca



Rys. 12. Godzinowe napromieniowanie na powierzchnię pochyloną pod kątem 45° zorientowaną na wschód, południe, zachód i północ 17 lipca wyznaczone modelem izotropowym

Fig. 12. Hourly irradiation on a 45° inclined surface oriented east, south, west and north on July 17, calculated by an isotropic model



Rys. 13. Godzinowe napromieniowanie na powierzchnię pochyloną pod kątem 45° zorientowaną na wschód, południe, zachód i północ 17 lipca wyznaczone modelem anizotropowym

Fig 13. Hourly irradiation on a 45° inclined surface oriented east, south, west and north on July 17, calculated by an anisotropic model

do powierzchni północnej jest większa od tej docierającej do powierzchni południowej i zachodniej. Jest to okres, kiedy powierzchnia północna "widzi" bezpośrednio tarczę słoneczną. Analogicznie w godzinach wieczornych napromienianie na powierzchnię północną jest wyższe od tego docierającego do powierzchni wschodniej, czy południowej. W tych godzinach do powierzchni północnej dociera promieniowanie bezpośrednie. Zauważyć można także przesunięcie w czasie maksymalnych zysków energetycznych w zależności od ukierunkowania powierzchni. Dla powierzchni wschodniej najczęściej promieniowania słonecznego dociera o godzinie 10, do południowej o 12, natomiast do zachodniej o 15. Największe godzinne zyski energetyczne dla powierzchni wschodniej to około 670 Wh/m^2 dla modelu izotropowego oraz niecałe 700 Wh/m^2 dla modelu anizotropowego. Dla powierzchni zachodniej to odpowiednio 750 Wh/m^2 800 Wh/m^2 . Ma to wpływ na wyznaczanie optymalnego usytuowania odbiornika energii promieniowania słonecznego czy przeszklonej przegrody obudowy budynku. Wyniki zamieszczone na rysunkach 12 i 13 pokrywają się z rezultatami obliczeń dotyczących wyznaczania optymalnego usytuowania powierzchni.

7. Wnioski

Z przeprowadzonych obliczeń wyraźnie wynika, że w przypadku stosowania aktywnych odbiorników energii promieniowania słonecznego, takich jak kolektory słoneczne czy moduły fotowoltaiczne i słonecznych systemów pasywnych najlepszym wyborem jest strona południowa. Jeżeli dach budynku jest dwuspadowy i skierowany w stronę wschodu i zachodu lepszym wyborem jest strona zachodnia. W okresie letnim zyski słoneczne od strony zachodniej mogą być nawet dwukrotnie wyższe. Również z tego powodu należy zwrócić uwagę na przegrzewanie pomieszczeń wschodnich i zachodnich zatem i konieczność stosowania zacienienia. W krajach o szerokościach geograficznych zbliżonych do polskich do obliczeń napromieniania słonecznego powinno stosować się model anizotropowy promieniowania słonecznego. Miesięczne różnice w napromienianiu na rozpatrywaną powierzchnię mogą różnić się o kilkanaście procent. Może mieć to duże znaczenie przy wymiarowaniu instalacji korzystających z promieniowania słonecznego, jak kolektory słoneczne czy moduły fotowoltaiczne. W przypadku projektowania instalacji na okres zimowy bądź metodą najgorszego miesiąca, kiedy budynek ma być samowystarczalny energetycznie możemy mieć do czynienia ze zbyt dużymi zyskami słonecznymi (problem z magazynowaniem energii) bądź zbyt wysokimi kosztami budowy i eksploatacji. Przy zastosowaniu modelu anizotropowego do wyznaczania sumarycznego napromieniania słonecznego i zysków energetycznych z danej powierzchni odbiornika inwestycja w dany system korzystający z promieniowania słonecznego może okazać się opłacalna w przypadku, gdy obliczenia modelem izotropowym wskazywały inaczej.

Literatura

- [1] Chwieduk D. Dostępność promieniowania słonecznego do obudowy budynku zlokalizowanego w Polsce centralnej, Polska Energetyka Słoneczna, Warszawa, kwiecień-czerwiec 2009.
- [2] Chwieduk D. Energetyka słoneczna budynku, Arkady, Warszawa, 2011.
- [3] Duffie J.A., Beckman W.A. Solar engineering of thermal processes, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1991.
- [4] Hay J. E., Davies J.A. Calculation of the solar radiation incident on an inclined surface, Proceedings first Canadian solar radiation data workshop, 59, Ministry of Supply and Service Canada, 1985.
- [5] Klucher T. M. Evaluating Models to Predict Insulation on Tilted Surfaces, Solar Energy, Vol. 23, 111. 1979.
- [6] Reindl D. T., Duffie J.A., Beckman W. A. Evaluation of Hourly Tilted Surface Radiation Models, Solar Energy, 45, 9, 1999.
- [7] Temps R. C., Coulson K. L. Solar radiation incident upon slopes of different orientations, Solar Energy, 19, 179-184, 1977.
- [8] <http://www.meteonorm.com> {dostęp 23.05.2016r.}.

COMPARISON OF THE SOLAR RADIATION MODELS

Summary

The paper compares the results of calculations of solar irradiation on different oriented surfaces. Meteorological data taken from several weather stations located in Warsaw, Suwałki, Gdańsk and Kolobrzeg were used for the calculations. The irradiation data for horizontal surface has been taken from website www.meteonorm.com. At first, comparable models of solar radiation were presented. It was described what types of solar radiation are included in each model. In the next step, the irradiation values for the south facing surface inclined at the 45° were compared. Calculations were made for all four locations. The differences in the results of the calculations performed with both models were mentioned. The next stage of the analysis was to determine the appropriate orientation of the area to maximizing the energy gains, over the whole year or during the summer or winter. At the end of the study, solar irradiation was calculated for surfaces oriented on four sides of the world inclined at 45°. The last chapter presents conclusions of the calculations. The most recommended orientation and inclination of front surfaces of solar receivers have been determined with regard to maximize solar gains through the year.

Keywords: solar irradiation, solar diffuse radiation models, irradiation of surfaces of different location in Poland

Przesłano do redakcji: 30.07.2017 r.

Przyjęto do druku: 29.12.2017 r.