

Adrian TRZAŃSKI
Aleksander PANEK
Politechnika Warszawska

OKREŚLANIE EFEKTYWNOŚCI ENERGETYCZNEJ KOLEKTORÓW SŁONECZNYCH

Powszechność stosowania kolektorów słonecznych wymaga dostarczenia projektantom opisów metod i procedur obliczeniowych, które pozwolą na dokładną analizę zagadnień energetycznych związanych z ich stosowaniem. Wytyczne projektowe udostępniane przez producentów korzystają z zagregowanych wartości i często odnoszą się jedynie do kilku orientacji i lokalizacji. Coraz bardziej zaawansowane rozwiązania architektoniczne wymagają stosowania dokładniejszych metod obliczeniowych. W niniejszej pracy przedstawiono metodę obliczeń na podstawie której opracowano arkusz kalkulacyjny SOLAT pozwalający na określenie uzyskiwanego ciepła i efektywności inwestycji dla różnych lokalizacji i dowolnej orientacji kolektora.

1. SZACOWANIE ILOŚCI PROMIENIOWANIA SŁONECZNEGO DOCIERAJĄCEGO DO DOWOLNIE ZORIENTOWANEJ POWIERZCHNI

1.2 Metoda Liu-Jordana

Metoda Liu-Jordana umożliwia obliczenie średniego dziennego promieniowania słonecznego padającego na powierzchnię dowolnie zorientowaną, na podstawie danych dla powierzchni poziomej. Metoda ta zakłada, że na energię odbieraną przez powierzchnię pochyloną składają się trzy elementy: promieniowanie bezpośrednie, promieniowanie rozproszone izotropowe, promieniowanie rozproszone odbite od powierzchni Ziemi.

Zdolność powierzchni do odbierania poszczególnych składowych promieniowania słonecznego w różnym stopniu zależy jej orientacji i pochylenia. Dzieje się tak z uwagi na fakt, iż w zależności od rozpatrywanej składowej promieniowania słonecznego zmienia się źródło promieniowania, którym może być tarcza słoneczna, nieboskłon lub powierzchnia Ziemi.

Uwzględniając powyższe zależności wartości napromieniowania całkowitego pochylonej powierzchni można obliczyć na podstawie wzoru:

$$\overline{H_{T,i}} = \overline{H_{b,i}} \cdot \overline{R_{b,i}} + \overline{H_{d,i}} \cdot \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + \overline{H_i} \cdot \rho_{g,i} \cdot \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \quad (1)$$

gdzie:

$\overline{H_{b,i}}$ - średnie dzienne bezpośrednie promieniowanie słoneczne padające na poziomą powierzchnię dla i-tego miesiąca, MJ/m²/d,

$\overline{H_{d,i}}$ - średnie dzienne dyfuzyjne promieniowanie słoneczne padające na poziomą powierzchnię dla i-tego miesiąca, MJ/m²/d,

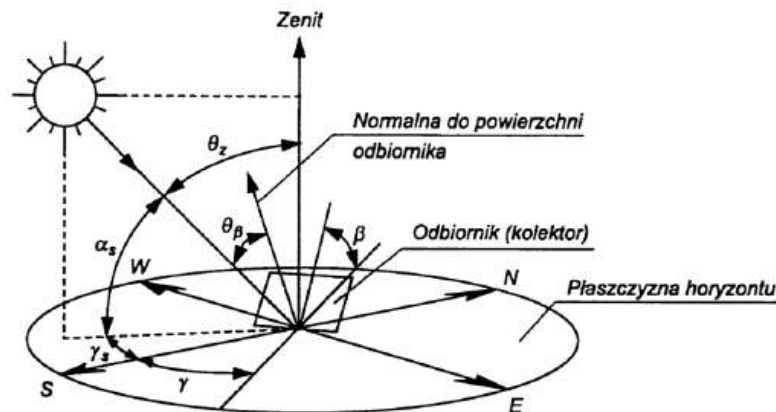
$\overline{H_i}$ - średnie dzienne całkowite promieniowanie słoneczne padające na poziomą powierzchnię dla i-tego miesiąca (wartość z pomiarów), MJ/m²/d,

$\rho_{g,i}$ - albedo, współczynnik refleksyjności gruntu dla i-tego miesiąca,

$\overline{R_{b,i}}$ - współczynnik korekcyjny dla promieniowania bezpośredniego dla i-tego miesiąca.

1.3 Zależności geometryczne

W obliczeniach, pozycję Słońca, określa się za pomocą kątów w układzie horyzontalnym, kątów określających położenie Ziemi i jej osi obrotu względem Słońca.. Na rysunku 1 przedstawiono ważniejsze kąty wykorzystywane do obliczeń promieniowania.



Rys. 1 Kąty w układzie Słońce – odbiornik promieniowania słonecznego [4]

Fig. 1 Geometrical relations of Sun – collector model [4]

Ponadto w obliczeniach uwzględniana jest szerokość geograficzna ϕ obiektu oraz deklinacja słoneczna δ – czyli kątowe położenie Słońca w południe astronomiczne

względem płaszczyzny równika. W celu uzyskania prawidłowych wyników niezbędne jest wyrażanie oznaczonych kątów w radianach.

1.4 Współczynnik przejrzystości atmosfery

Do przeprowadzenia obliczeń niezbędna jest znajomość średnich udziałów składowych bezpośredniej i dyfuzyjnej promieniowania słonecznego dla analizowanych miesięcy. Najczęściej nie dysponujemy odpowiednimi danymi pomiarowymi dla danej lokalizacji. Wartości te można obliczyć na podstawie znajomości współczynnika przejrzystości atmosfery K_T . Wartość średnią tego współczynnika przy badaniu okresów miesięcznych można określić na podstawie następującej zależności, [4][4]:

$$\overline{K_{T,i}} = \frac{\overline{H_i}}{\overline{H_{o,i}}} \quad (2)$$

Pojawiający się w tym wzorze symbol $\overline{H_{o,i}}$ oznacza średnią miesięczną wartość nasłonecznienia dla płaszczyzny równoległej do powierzchni Ziemi i zlokalizowanej na zewnątrz atmosfery. Przy obliczeniach wykonywanych dla pełnych miesięcy posługujemy się deklinacją charakterystyczną dla danego miesiąca, określoną dla tzw. dni rekomendowanych. Numery dni rekomendowanych dla poszczególnych miesięcy zostały przedstawione w tabeli 1.

Tabl. 1 Porządkowe numery dni rekomendowanych dla poszczególnych miesięcy [4]

Tabl. 1 Ordinal numbers of recommended days [4]

Lp.	miesiąc	porządkowy numer dnia rekomendowanego	Lp.	miesiąc	Porządkowy numer dnia rekomendowanego
1	styczeń	17	7	lipiec	198
2	luty	47	8	sierpień	228
3	marzec	75	9	wrzesień	258
4	kwiecień	105	10	październik	288
5	maj	135	11	listopad	318
6	czerwiec	162	12	grudzień	344

Średnią wartość nasłonecznienia dla płaszczyzny równoległej do powierzchni Ziemi i zlokalizowanej na zewnątrz atmosfery można określić na podstawie zależności [4]:

$$\overline{H_{o,i}} = \frac{86400}{\pi} G_{sc} \left(1 + 0,033 \cos \frac{2\pi \cdot n_i}{365} \right) \left[\sin(\omega_{s,i}) \cos \phi \cos \delta_i + |\omega_{s,i}| \sin \phi \sin \delta_i \right] \quad (3)$$

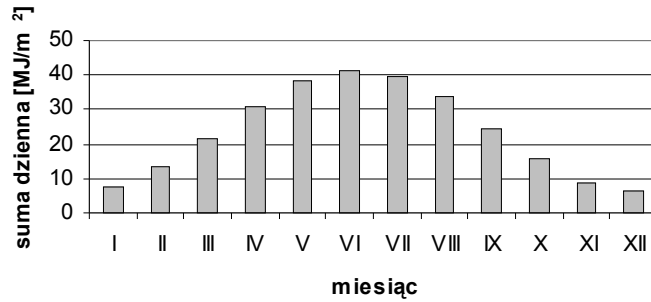
gdzie:

n_i – numer rekomendowanego dnia dla i -tego miesiąca,

$\omega_{s,i}$ – kat godzinowy wschodu słońca dla rekomendowanego dnia i -tego miesiąca.

δ_i – deklinacja dla rekomendowanego dnia i -tego miesiąca, rad.

Wartości nasłonecznienia dla zlokalizowanej na zewnątrz atmosfery płaszczyzny równoległej do powierzchni Ziemi, znajdującej się nad Warszawą, dla dni rekomendowanych zostały przedstawione na rysunku 2.



Rys.2 Wartości nasłonecznienia dla zlokalizowanej na zewnątrz atmosfery płaszczyzny równoległej do powierzchni Ziemi, znajdującej się nad Warszawą.

Fig. 2 Values of the density of solar flux on the vertical plane out of the atmosphere, located above Warsaw

1.5 Dyfuzyjna i bezpośrednia składowa promieniowania słonecznego

Dysponując średnimi miesięcznymi wartościami współczynnika przejrzystości atmosfery można obliczyć wartość składowej dyfuzyjnej promieniowania słonecznego na podstawie następujących zależności:

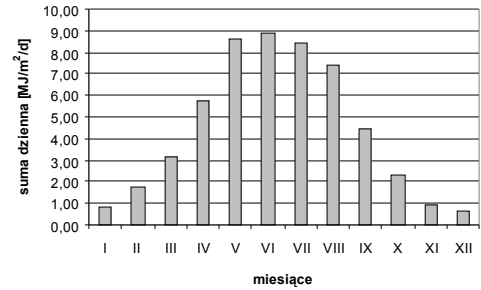
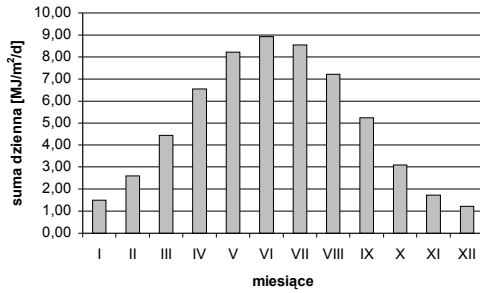
$$\text{dla } \omega_s \leq \frac{81,4\pi}{180}, \bar{H}_{d,i} = \bar{H}_i \cdot \left(1,391 + \bar{K}_{T,i} \left(-3,56 + \bar{K}_{T,i} \left(4,189 + \bar{K}_{T,i} \left(-2,137\right)\right)\right)\right) \quad (4)$$

$$\text{dla } \omega_s > \frac{81,4\pi}{180}, \bar{H}_{d,i} = \bar{H}_i \cdot \left(1,311 + \bar{K}_{T,i} \left(-3,022 + \bar{K}_{T,i} \left(3,427 + \bar{K}_{T,i} \left(-1,821\right)\right)\right)\right) \quad (5)$$

Składową bezpośrednią jest różnicą promieniowania całkowitego i obliczonej wartości dyfuzyjnego promieniowania padającego na poziomą powierzchnię:

$$\bar{H}_{b,i} = \bar{H}_i - \bar{H}_{d,i} \quad (6)$$

Przykładowo dla Warszawy wartości średnie dziennego promieniowania dyfuzyjnego i bezpośredniego padającego na powierzchnię gruntu zostały przedstawione na rysunku 3.



a)

b)

Rys. 3 Wartości składowej dyfuzyjnej a) i bezpośredniej b) średniego dziennego promieniowania padającego na poziomą powierzchnię dla Warszawy.

Fig. 3 Values of diffusive a) and direct b) densities of solar flux incident on ground level in Warsaw

1.6 Zależność dziennego nasłonecznienia powierzchni od orientacji

Stosunek nasłonecznienia dziennego na dowolnie zorientowaną powierzchnię pochyloną do nasłonecznienia na powierzchnię poziomą, wyraża się w postaci współczynnika korekcyjnego dla promieniowania bezpośredniego [4][4].:

dla $\omega_{ss,i} \geq \omega_{sr,i}$

$$\begin{aligned} \bar{R}_{b,i} = & (\sin \delta_i (\sin \phi \cos \beta - \cos \phi \sin \beta \cos \gamma) (\omega_{ss,i} - \omega_{sr,i}) \\ & + \cos \delta_i (\cos \phi \cos \beta + \sin \phi \sin \beta \cos \gamma) (\sin \omega_{ss,i} - \sin \omega_{sr,i}) \\ & - \cos \delta_i \sin \beta \sin \gamma (\cos \omega_{ss,i} - \cos \omega_{sr,i})) / (2(\cos \phi \cos \delta_i \sin \omega_{s,i} + \omega_{s,i} \sin \phi \sin \delta_i)) \end{aligned} \quad (7)$$

dla $\omega_{ss,i} < \omega_{sr,i}$

$$\begin{aligned} \bar{R}_{b,i} = & (\sin \delta_i (\sin \phi \cos \beta - \cos \phi \sin \beta \cos \gamma) (\omega_{ss,i} - (-\omega_{s,i})) \\ & + \cos \delta_i (\cos \phi \cos \beta + \sin \phi \sin \beta \cos \gamma) (\sin \omega_{ss,i} - \sin(-\omega_{s,i})) \\ & - \cos \delta_i \sin \beta \sin \gamma (\cos \omega_{ss,i} - \cos(-\omega_{s,i})) + (\sin \delta_i (\sin \phi \cos \beta - \cos \phi \sin \beta \cos \gamma) (\omega_{s,i} - \omega_{sr,i}) \\ & + \cos \delta_i (\cos \phi \cos \beta + \sin \phi \sin \beta \cos \gamma) (\sin \omega_{s,i} - \sin \omega_{sr,i}) \\ & - \cos \delta_i \sin \beta \sin \gamma (\cos \omega_{s,i} - \cos \omega_{sr,i})) / (2(\cos \phi \cos \delta_i \sin \omega_{s,i} + \omega_{s,i} \sin \phi \sin \delta_i)) \end{aligned} \quad (8)$$

gdzie:

$\omega_{sr,i}$ - kąt godzinowy wschodu słońca na powierzchnię pochyloną obliczony dla rekomendowanego dnia i-tego miesiąca, rad,

$\omega_{ss,i}$ - kąt godzinowy zachodu słońca na powierzchnię pochyloną obliczony dla rekomendowanego dnia i-tego miesiąca, rad.

2. OKREŚLENIE UŻYTECZNEJ ENERGII UZYSKIWANEJ PRZY POMOCY KOLEKTORÓW SŁONECZNYCH

2.2 Metoda wykresu f

Dane dotyczące promieniowania słonecznego padającego na powierzchnię kolektorów słonecznych nie wystarczają do obliczenia uzyskanej za ich pośrednictwem energii cieplnej. Dokonanie oceny udziału ciepła uzyskiwanego z konwersji promieniowania słonecznego w zaspokojeniu zapotrzebowania na ciepło wymaga uwzględnienia parametrów kolektorów i charakterystyki instalacji do podgrzewania wody.

Jedną z metod umożliwiających oszacowanie ilości energii uzyskanej za pośrednictwem kolektorów jest opracowana przez Beckmana i in. metoda wykresu f [4][4]. Metoda ta pozwala na określenie udziału energii słonecznej w zaspokajaniu potrzeb energetycznych dla badanego okresu. W tym celu należy obliczyć parametr f :

$$f_i = 1,029Y - 0,065X_{cc,i} - 0,245Y^2 + 0,0018X_{c,i}^2 + 0,0215Y^3 \quad (9)$$

gdzie :

$X_{cc,i}, Y_i$ - bezwymiarowe współczynniki które wyraża się za pomocą następujących zależności:

$$Y_i = \frac{A_K \cdot F_R'(\overline{\tau\alpha}) \cdot \overline{H}_{T,i} \cdot L_{dni,i}}{Q_{CWU,i}^o \cdot 1000000} \quad (10)$$

Wartość współczynnika $X_{cc,i}$ określa się korzystając z ogólnego równania dla instalacji z czynnikiem ciekłym:

$$X_i = \frac{A_K \cdot F_R' U_L \cdot (100 - t_{p,i}) \cdot 86400 \cdot L_{dni,i}}{Q_{CWU,i}^o \cdot 1000000} \quad (11)$$

przy czym:

$L_{dni,i}$ - liczba dni w i-tym miesiącu,

$t_{p,i}$ - średnia temperatura powietrza w i-tym miesiącu, °C,

$Q_{CWU,i}^o$ - obliczeniowe zapotrzebowanie na ciepło do podgrzewania wody użytkowej w i-tym miesiącu,

$F_R'(\overline{\tau\alpha})$ - bezwymiarowy parametr opisujący sprawność absorbowania promieniowania słonecznego przez kolektor,

$F_R' U_L$ - parametr opisujący straty ciepła z kolektora, W/m²K.

Wyposażenie instalacji słonecznego podgrzewania wody w zasobnik ciepłej wody sprawia, że wydajność systemu w znacznej mierze zależy od jego pojemności. Zależność ta może zostać uwzględniona w postaci skorygowanej wartości współczynnika X_i .

$$X_c = X \cdot \left(\frac{v_{zas}}{75} \right)^{-0,25} \quad (12)$$

gdzie:

v_{zas} – stosunek objętości zastosowanego zasobnika do powierzchni kolektorów słonecznych.

Z uwagi na ogólną postać wzoru (9), w przypadku analizowania wydajności systemów słonecznego podgrzewania wody użytkowej należy uwzględnić dodatkowy współczynnik prowadzący do zależności:

$$X_{cc,i} = X_c \cdot \frac{11,6 + 1,18 \cdot t_{CWU} + 3,86 \cdot t_{w,i} - 2,32 \cdot t_{p,i}}{100 - t_{p,i}} \quad (13)$$

gdzie:

t_{CWU} – wymagana temperatura ciepłej wody użytkowej, °C,

$t_{w,i}$ – średnia temperatura wody zasilającej w i-tym miesiącu, °C,

$t_{p,i}$ – średnia temperatura powietrza w i-tym miesiącu, °C.

2.3 Określenie użytecznej energii uzyskiwanej ze słonecznych instalacji przy pomocy metody wykresu f

Po określeniu wartości współczynnika f , można obliczyć ilość ciepła uzyskanego z energii słonecznej na podstawie zależności:

$$Q_{u,i} = f_i \cdot Q_{CWU,i} \quad (14)$$

Oszacowana w ten sposób ilość uzyskiwanego ciepła w poszczególnych okresach użytkowania, pozwala na ocenę efektywności energetyczno ekonomicznej rozpatrywanej inwestycji. Dokonanie takiej analizy jest podstawą wyboru optymalnego wariantu inwestycji, jak również na określenie opłacalności wykorzystania instalacji dla poszczególnych miesięcy.

3. PODSUMOWANIE

Przedstawiona metoda obliczeniowa została wykorzystana w arkuszu kalkulacyjnym SOLAT (dostępnym bezpłatnie w Internecie) pozwalającym na szybką i dokładną ocenę efektywności energetyczno-ekonomicznej inwestycji zastosowania cieczowych kolektorów

słonecznych. Źródłem inspiracji dla opracowania takiego arkusza był program RETScreen International, opracowany przez National Resources Canada (NRCan) CANMET Energy Diversification Research Laboratory (CEDRL).

Wzrastające zapotrzebowanie na energię, rosnące koszty jej uzyskania oraz troska o stan środowiska naturalnego sprawiają, że inwestorzy poszukują alternatywnych źródeł energii. Umożliwienie dokonania rzetelnej analizy opłacalności inwestycji wykorzystujących odnawialne źródła energii może się przyczynić do zwiększenia ich wykorzystania.

4. LITERATURA

1. Duffie J.A.: Beckman W.A.: Solar Engineering of Thermal Processes. John Wiley & Sons, New York 1991.
2. Pluta Z.: Podstawy teoretyczne fototermicznej konwersji energii słonecznej. Oficyna wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2000.
3. Smolec W.: Fototermiczna konwersja energii słonecznej. Wydawnictwo naukowe PWN, Warszawa 2000.
4. Natural Resources Canada's (NRCan) CANMET Energy Diversification Research Laboratory (CEDRL): RETScreen International. Ministry of Natural Resources Canada 2000
5. Adrian Trząski: Komputerowe wspomaganie projektowania instalacji opartych na kolektorach słonecznych, praca magisterska, Politechnika Warszawska 2003

5. ESTIMATION OF ENERGY EFFICIENCY OF SOLAR COLLECTORS

(summary)

The paper presents method of estimation of energy efficiency of solar collectors' installations for hot water supply. The basic formulas and detailed calculation procedure is presented for all of those who have to perform own calculation, as the existing design guidelines provided by manufactures, are mostly using aggregated, stepwise values and overall efficiency.

The referred freeware software, developed for the purpose of the work, targets the decision makers in order to convince them about feasibility of undertaking the investments. This method has been used in a program allowing user quick and simple estimation of possible energy gains in a considered project.