



Wpływ błędów w normie PN-EN ISO 52010-1 na wynikowe godzinowe wartości natężenia promieniowania słonecznego całkowitego

The impact of errors in the PN-EN ISO 52010-1 standard on the resulting hourly values of total solar irradiance



Dr inż. Piotr Michalak

ORCID ID: 0000-0002-8443-3502

Wydział Inżynierii Mechanicznej
i Robotyki

AGH Akademia Górniczo-Hutnicza

pmichal@agh.edu.pl

Słowa kluczowe: PN-EN ISO 52010-1, natężenie promieniowania słonecznego, promieniowanie dyfuzyjne, model Pereza

Streszczenie

Norma PN-EN ISO 52010-1 zawiera opis procedury do obliczania godzinowych wartości natężenia promieniowania słonecznego całkowitego na dowolnie zorientowaną powierzchnię pochyloną. W tym celu wykorzystuje ona model anizotropowy Pereza. Jednak w tej procedurze znajdują się błędy mające wpływ na wyniki obliczeń. Celem pracy jest ocena tych błędów w odniesieniu do oryginalnego modelu Pereza. Dla zobrazowania ich wielkości wykonano obliczenia dla powierzchni pochylonej do podłoża pod kątem 45° oraz 90°, skierowanej kolejno na północ, południe, wschód i zachód, zlokalizowanej w Krakowie. Wykorzystano dane z nowych Typowych Lat Meteorologicznych TLM2000 typu TMY, ISO, TRY, HSY oraz CWY. Do oceny jakości modelu z normy względem jego pierwotnej postaci wykorzystano cztery miary statystyczne, tj.: błąd średni (ME), błąd średni bezwzględny (MAE), błąd średniokwadratowy (MSE) oraz pierwiastek błędu średniokwadratowego (RMSE). Dla powierzchni pionowej błąd średni we wszystkich przypadkach wskazywał na przeszacowanie przez model z normy obliczonego natężenia promieniowania słonecznego o średnią wartość od 1,2 W/m² do 1,9 W/m². Błąd RMSE był najniższy dla orientacji północnej, i wahał się od 6,5 W/m² (TMY) do 7,4 W/m² (ISO), zaś najwyższy dla orientacji południowej, w granicach od 7,8 W/m² (TMY) do 8,5 W/m² (HSY). Są to wartości, które wskazują na istotne rozbieżności, co może wpływać z kolei na obliczeniowe wskaźniki energetyczne budynków.

Keywords: PN-EN ISO 52010-1, solar irradiance, diffuse irradiance, Perez model

Abstract

The PN-EN ISO 52010-1 standard contains a description of the procedure for calculating the hourly total solar irradiance on any oriented inclined surface. For this purpose, it uses Perez's anisotropic model. However, there are errors in this procedure that affect the calculation results. The aim of this work is to evaluate these errors in relation to Perez's original model. To illustrate their magnitude, calculations were performed for surfaces inclined at angles of 45° and 90° to the ground, facing North, South, East and West, and located in Krakow. Data from the new Polish Typical Meteorological Years (TLM2000) in TMY, ISO, TRY, HSY and CWY formats were used. Four statistical measures were used to assess the quality of the standard model in relation to its original form, namely: mean error (ME), mean absolute error (MAE), mean square error (MSE) and root mean square error (RMSE). For vertical surfaces, the mean error in all cases indicated an overestimation by the standard model of the hourly values of the calculated solar irradiance by an average value of 1.2 W/m² to 1.9 W/m². The RMSE error was lowest for the north orientation, and varied from 6.5 W/m² (TMY) to 7.4 W/m² (ISO), and highest for the south orientation, from 7.8 W/m² (TMY) to 8.5 W/m² (HSY). These results indicate significant discrepancies, which in turn may affect the calculated energy performance of buildings.

Oznaczenia

- a – współczynnik modelu Pereza
- b – współczynnik modelu Pereza
- F₁ – współczynnik jasności – okołosłoneczny
- F₂ – współczynnik jasności – horyzontu
- f₁₁... f₂₃ – współczynniki modelu Pereza
- G_{sol;b} – normalne natężenie promieniowania słonecznego bezpośredniego
- G_{sol;b,h} – natężenie promieniowania słonecznego bezpośredniego padające na powierzchnię poziomą
- G_{s,d} – natężenie promieniowania rozproszonego na powierzchni poziomej
- I_{ext} – natężenie promieniowania słonecznego płasz-

- czyzny poziomej na górnej granicy atmosfery
- I_{dif} – całkowite natężenie promieniowania rozproszonego na powierzchni pochylonej
- I_{dir} – natężenie promieniowania bezpośredniego na powierzchni pochylonej
- I_{grnd} – natężenie promieniowania odbitego od gruntu
- I_{tot,norma} – całkowite natężenie promieniowania słonecznego na powierzchni pochylonej wyznaczone wg normy
- I_{tot,ref} – całkowite natężenie promieniowania słonecznego na powierzchni pochylonej wyznaczone wg modelu Pereza
- I_{tot} – całkowite natężenie promieniowania słonecznego na powierzchni pochylonej

T_{shift}	– różnica między czasem strefowym a UTC dla danej lokalizacji
m	– masa optyczna atmosfery
n_{day}	– numer kolejnego dnia w roku
t_s	– czas słoneczny rzeczywisty
t_{eq}	– równanie czasu
α_{sol}	– kąt wzniesienia słońca
β_{ic}	– kąt pochylenia powierzchni
δ	– deklinacja słoneczna
Δ	– współczynnik jasności nieboskłonu
ε	– współczynnik przejrzystości nieboskłonu
θ_z	– kąt zenitalny
$\theta_{\text{sol;ic}}$	– kąt padania promieni słonecznych na powierzchnię pochyłą
λ_w	– długość geograficzna rozpatrywanej lokalizacji
$\rho_{\text{sol;grnd}}$	– współczynnik odbicia promieniowania słonecznego od gruntu
φ_w	– szerokość geograficzna rozpatrywanej lokalizacji
ω	– kąt godzinny Słońca
γ	– kąt azymutu rozpatrywanej powierzchni

Wstęp

Dążenie do ograniczenia energochłonności budynków przekłada się na rosnące wymagania dotyczące izolacyjności przegród zewnętrznych na przestrzeni ostatnich dekad (Lis & Lis, 2016). W związku z tym, w bilansie cieplnym istotny staje się udział energii promieniowania słonecznego (Idczak & Firląg, 2006; Świącicki, 2014). Może być ona także wykorzystana do przygotowania ciepłej wody oraz produkcji energii elektrycznej (Górzyński, 2020; Gil-Mastalerczyk & Kraska, 2023). Z tych powodów, ocena potencjału energetycznego promieniowania słonecznego w danej lokalizacji jest istotna z praktycznego punktu widzenia.

Latem 2017 roku Europejski Komitet Normalizacyjny (CEN) opublikował zestaw norm serii 52000 przeznaczonych do oceny charakterystyki energetycznej budynku. Jedną z nich jest norma EN ISO 52010-1, która we wrześniu tego samego roku została opublikowana przez Polski Komitet Normalizacyjny (PKN) jako PN-EN ISO 52010-1:2017-09 (PKN, 2017). Zawiera ona m.in. opis procedury do obliczania natężenia promieniowania słonecznego całkowitego na powierzchni o dowolnej orientacji i pochyleniu. Ta procedura opiera się na wykorzystaniu wartości godzinowych natężenia promieniowania słonecznego bezpośredniego i rozproszonego padającego na powierzchnię poziomą, dostępnych w plikach typowych lat meteorologicznych. Na tej podstawie, dzięki zastosowaniu transpozycyjnego modelu Pereza (Perez et al., 1988), oblicza się godzinowe wartości natężenia promieniowania całkowitego na powierzchnię o danej orientacji (azymucie) i pochyleniu do poziomu. Procedura ta została przedstawiona w publikacji (Michalak, 2018). Zwrócono tam także uwagę na błędy w normie (niewłaściwe oznaczenia, czy też pomyłki we wzorach), mogące wpływać na rezultaty obliczeń. Ten problem rozwinęto w kolejnej pracy (Michalak, 2019a), gdzie na przykładzie pięciu lokalizacji zaprezentowano wyniki obliczeń natężenia promieniowania słonecznego padającego na powierzchnię pionową zorientowaną w kierunkach N, S, E i W. Jako dane źródłowe wykorzystano pliki typowych lat meteorologicznych opracowane w oparciu o dane z lat 1971–2000, oznaczo-

ne jako TLM1970 (Narowski, 2006). Stwierdzone zostały różnice w wartościach miesięcznych napromieniowania uzyskanych wg normy oraz z zastosowaniem oryginalnego modelu Pereza. W kolejnym kroku wyznaczone zostały wartości rocznego zapotrzebowania na ciepło do ogrzewania dwóch przykładowych budynków mieszkalnych (jedno i wielorodzinne), w tych samych lokalizacjach. W pierwszym obiekcie różnice jednostkowego wskaźnika zapotrzebowania na energię użytkową do ogrzewania (EU) nie przekroczyły 0,3 kWh/m². Natomiast w drugim obiekcie te rozbieżności wahały się od –0,2 kWh/m² do +0,5 kWh/m². Zatem bez żadnych ingerencji w parametry budynku uzyskano różne wartości EU tylko z powodu błędów w zapisie procedury obliczeniowej podanej w normie. Co więcej, zgodnie z informacją zamieszczoną na stronie internetowej ISO (ISO, 2017), po pięciu latach obowiązywania, w roku 2022 norma została zweryfikowana i ponownie zatwierdzona bez żadnych poprawek. W związku z tym, jej wersja z roku 2017 nadal pozostaje aktualna.

Oprócz rodzaju zastosowanego modelu, obliczona wielkość napromieniowania, a zatem i słonecznych zysków ciepła oraz zapotrzebowanie na ciepło do ogrzewania zależą także od zastosowanych wejściowych danych meteorologicznych (Michalak, 2019b). Jest to o tyle istotne, że w roku 2022 zostały opublikowane nowe typowe lata meteorologiczne dla Polski (Narowski, 2022a; Narowski, 2022b), przygotowane przez dr inż. Piotra Narowskiego w ramach projektu TLM2000 w oparciu o dane meteorologiczne i klimatyczne z lat 2001–2020. W pracy (Narowski, 2022c) przedstawione zostało porównanie przebiegów zmienności temperatury termometru suchego oraz natężenia promieniowania słonecznego całkowitego na powierzchnię poziomą z typowych lat meteorologicznych TLM1970 i TLM2000 dla sześciu lokalizacji. Wykazało ono różnice ich wartości godzinowych, co przełożyło się odpowiednio na wartości średnie miesięczne oraz sumy miesięczne.

W związku z tym zachodzi pytanie o wpływ błędów zidentyfikowanych w normie na rezultaty obliczeń wykonanych wg normy PN-EN ISO 52010-1:2017-09 w przypadku zastosowania nowych danych meteorologicznych z plików TLM2000.

W tym celu w niniejszym artykule przedstawiono procedurę oraz wyniki obliczeń godzinowego natężenia promieniowania całkowitego na powierzchnie pochyłone dla lokalizacji w Krakowie. Pozwoliły one na określenie różnic wynikających z zastosowania metody z normy oraz z oryginalnego modelu i sformułowanie wniosków.

Materiały i metody

Dane meteorologiczne

W obliczeniach posłużono się danymi meteorologicznymi ze zbioru TLM2000 dla Krakowa. Według informacji podanych w (Narowski, 2022c), pliki te zostały przygotowane zgodnie z pięcioma różnymi procedurami. Pierwsza została opracowana w National Renewable Energy Laboratory (NREL), a wynikowe pliki są dostępne, jako pliki TMY. Kolejna jest przedstawiona w normie PN-EN ISO 15927-4, zaś zbiory wynikowe oznaczono, jako pliki ISO. Trzecia została przedstawiona przez ASHRAE, a wygenerowane pliki oznaczono z kolei, jako TRY. Ponadto, opraco-

wane zostały lata meteorologiczne z najcieplejszym latem (HSY) oraz najchłodniejszą zimą (CWY). Tych pięć różnych zbiorów zawiera zestaw danych meteorologicznych dla każdego z 8760 godzinowych rekordów.

Algorytm obliczeń wg PN-EN ISO 52010-1

Norma określa różne ścieżki prowadzące do obliczenia godzinowych wartości natężenia promieniowania słonecznego całkowitego (I_{tot}) padającego na rozpatrywaną powierzchnię. Ich wykorzystanie jest zależne od posiadanych danych promieniowania słonecznego.

We wszystkich rodzajach wymienionych wcześniej plików TLM znajdują się godzinowe wartości natężenia promieniowania słonecznego padającego na powierzchnię poziomą: całkowitego ($G_{sol,g}$), bezpośredniego ($G_{sol,b,h}$), rozproszonego ($G_{sol,d}$) i na zewnętrznej warstwie atmosfery (I_{ext}), a także bezpośredniego normalnego ($G_{sol,b}$) oraz kąta wzniesienia słońca (α_{sol}). Fakt ten ułatwia dalsze obliczenia, które rozpoczyna się od wyznaczenia wartości parametrów pomocniczych. Pierwszym z nich jest masa optyczna atmosfery (m). Jeśli $\alpha_{sol} < 10$, wtedy:

$$m = 1/(\sin(\alpha_{sol}) + 0,15 \cdot (\alpha_{sol} + 3,885)^{-1,253}) \quad (1)$$

Jeśli $\alpha_{sol} \geq 10$ to:

$$m = 1/\sin(\alpha_{sol}) \quad (2)$$

W kolejnym kroku wylicza się kąt zenitalny (θ_z):

$$\theta_z = 90 - \alpha_{sol} \quad (3)$$

Lokalizacja danej powierzchni jest określona za pomocą znanej szerokości (φ_w) i długości (λ_w) geograficznej. Jej ułożenie dane jest poprzez kąt pochylenia do poziomu (β) oraz azymut (γ). Kąt azymutalny jest określany od południa, w kierunku wschodnim ze znakiem dodatnim, zaś w kierunku zachodnim – z ujemnym. Na tej podstawie określa się kąt padania promieni słonecznych na rozpatrywaną powierzchnię:

$$\begin{aligned} \theta_{sol,ic} = & \arccos [\sin(\delta) \cdot \sin(\varphi_w) \cdot \cos(\beta) \\ & - \sin(\delta) \cdot \cos(\varphi_w) \cdot \sin(\beta) \cdot \cos(\gamma) \\ & + \cos(\delta) \cdot \cos(\varphi_w) \cdot \cos(\beta) \cdot \cos(\omega) \\ & + \cos(\delta) \cdot \sin(\varphi_w) \cdot \sin(\beta) \cdot \cos(\gamma) \cdot \cos(\omega) \\ & + \cos(\delta) \cdot \sin(\beta) \cdot \sin(\gamma) \cdot \sin(\omega)] \end{aligned} \quad (4)$$

Kąt godzinowy Słońca (ω) oblicza się z zależności:

$$\omega = 15 \cdot (12,5 - t_s) \quad (5)$$

jako jego średnią pozycję w danej godzinie. Stąd też we wzorze występuje wartość 12,5 zamiast zwykle spotykanej 12.

Czas słoneczny rzeczywisty (t_s) w danej lokalizacji jest określony przez zależność:

$$t_s = n_{hour} - T_{shift} - t_{eq}/60 \quad (6)$$

Przy tym, n_{hour} oznacza kolejną godzinę doby czasu urzędowego. T_{shift} jest różnicą między czasem strefowym dla danej lokalizacji (określonej długością λ_w) a czasem uniwersalnym UTC:

$$T_{shift} = TZ - \lambda_w/15 \quad (7)$$

a TZ jest godzinowym przesunięciem czasu urzędowego w danej strefie w odniesieniu do UTC.

Równanie czasu (t_{eq}) jest w normie dane zależnością dla kolejnych dni (n_{day}) w roku:

$$\begin{aligned} t_{eq} = & -0,0113 - 0,0019 \cdot n_{day}, \text{ jeśli } n_{day} \leq 20, \\ t_{eq} = & -0,0227 - 0,0393 \cos(0,0357 \cdot (n_{day} - 43)), \\ & \text{jeśli } 20 < n_{day} \leq 135, \\ t_{eq} = & -0,0061 + 0,0218 \cos(0,0449 \cdot (n_{day} - 135)), \\ & \text{jeśli } 135 < n_{day} \leq 240, \\ t_{eq} = & 0,0275 + 0,0436 \cos(0,036 \cdot (n_{day} - 306)), \\ & \text{jeśli } 240 < n_{day} \leq 335, \\ t_{eq} = & -0,002 \cdot (n_{day} - 359), \text{ jeśli } n_{day} > 335 \end{aligned} \quad (8)$$

Deklinacja słoneczna określana jest z zależności:

$$\begin{aligned} \delta = & 0,33281 - 22,984 \cdot \cos(R) - \\ & 0,3499 \cdot \cos(2 \cdot R) - 0,1398 \cdot \cos(3 \cdot R) + 3,7872 \cdot \sin(R) + \\ & 0,03205 \cdot \sin(2 \cdot R) + 0,07187 \cdot \sin(3 \cdot R) \end{aligned} \quad (9)$$

w której:

$$R = 360 \cdot n_{day}/365 \quad (10)$$

Znajomość powyższych parametrów pozwala na przejście do kolejnego etapu, w którym określone są parametry modelu Pereza. Są to współczynniki: modelu (a , b), przejrzystości nieboskłonu (ε) oraz jasności: nieboskłonu (Δ), okołosłoneczny (F_1) i horyzontu (F_2). Są one otrzymywane kolejno z zależności (11)–(16):

$$a = \max[0; \cos(\theta_{sol,ic})] \quad (11)$$

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

$$\varepsilon = \frac{\frac{G_{sol,d} + G_{sol,b}}{G_{sol,d}} + 1,014 \left(\frac{\pi}{180} \alpha_{sol} \right)^3}{1 + 1,014 \left(\frac{\pi}{180} \alpha_{sol} \right)^3} \quad (13)$$

$$\Delta = m \cdot G_{sol,d}/I_{ext} \quad (14)$$

$$F_1 = \max[0; f_{11}(\varepsilon) + f_{12}(\varepsilon) \cdot \Delta + f_{13}(\varepsilon) \cdot (\pi \cdot \theta_z/180)] \quad (15)$$

$$F_2 = f_{21}(\varepsilon) + f_{22}(\varepsilon) \cdot \Delta + f_{23}(\varepsilon) \cdot (\pi \cdot \theta_z/180) \quad (16)$$

Wartości współczynników f_{11} oraz f_{12} we wzorach (15) i (16) są podane w (PKN, 2017), (Perez, 1988). Godzinowa wartość natężenia promieniowania rozproszonego padającego na powierzchnię pochyłą jest zaś obliczana z równania:

$$I_{dif} = G_{sol,d} \left[(1 - F_1) \frac{1 + \cos(\beta_{ic})}{2} + F_1 \frac{a}{b} + F_2 \sin(\beta_{ic}) \right] \quad (17)$$

Szukana wartość natężenia promieniowania całkowitego jest sumą składowej bezpośredniej (I_{dir}), rozproszonej (I_{dif}) oraz odbitej od gruntu (I_{grnd}):

$$I_{tot} = I_{dir} + I_{dif} + I_{grnd} \quad (18)$$

Przy czym:

$$I_{dir} = \max[0; G_{sol,b} \cdot \cos(\theta_{sol,ic})] \quad (19)$$

Natężenie promieniowania odbitego od gruntu:

$$I_{grnd} = [G_{sol,d} + G_{sol,b} \cdot \sin(\alpha_{sol})] \cdot \rho_{sol,grnd} \cdot [1 - \cos(\beta_{ic})]/2 \quad (20)$$

Należy przy tym wspomnieć, że drugi (środkowy) składnik sumy po prawej stronie równania (17), a określający promieniowanie okołosłoneczne, w normie jest przypisany do składowej bezpośredniej i jest dodawany do składnika danego równaniem (19), a pomijany jest w równaniu (17). Matematycznie prowadzi to do tego samego rezultatu, jak równanie (18). Dlatego, dla czytelności i uproszczenia toku obliczeniowego, w niniejszej pracy nie zastosowano tej modyfikacji.

Uwagi do procedury z PN-EN ISO 52010-1

Jak już wspomniano we wstępie, w normie znajduje się kilka błędów o charakterze redakcyjnym i merytorycznym. O ile te pierwsze są możliwe do wychwycenia bez większych problemów, to błędy drugiego rodzaju można zidentyfikować jedynie analizując dokładnie kolejne formuły matematyczne i porównując je z tymi opublikowanymi w pracach źródłowych. W rozpatrywanym przypadku zidentyfikowano dwa błędy w równaniu (13), które prawidłowo powinno mieć postać:

$$\varepsilon = \frac{G_{sol;d} + G_{sol;b} + 1,041 \left(\frac{\pi}{180} \theta_z \right)^3}{1 + 1,041 \left(\frac{\pi}{180} \theta_z \right)^3} \quad (21)$$

Jak widać, zamiast " α_{sol} " jest tu " θ_z ", a zamiast współczynnika o wartości 1,014 jest 1,041.

Ocena rozbieżności

Przedstawienie wiarygodnej oceny wpływu zauważonych błędów na wyniki obliczeń wymaga nieco pogłębionej analizy. Najprostsze jest określenie maksymalnych i minimalnych różnic między badanymi modelami. Jednak nie daje to pełnego obrazu występujących rozbieżności. Badane zbiory danych obejmują bowiem wartości godzinowe dla pełnego roku, czyli dla 8760 rekordów dla każdego z rozpatrywanych przypadków. Dlatego w dalszej części do oceny rozbieżności pomiędzy modelem referencyjnym ($I_{sol,ref}$) a tym z normy ($I_{sol,norma}$) posłużono się także czterema miarami statystycznymi. Należą do nich kolejno (Pamuła, 2015):

Błąd średni (ME – Mean Error), dany zależnością:

$$ME = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (I_{tot,norma} - I_{tot,ref}) \quad (22)$$

Błąd średni bezwzględny (MAE – Mean Absolute Error):

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |I_{tot,norma} - I_{tot,ref}| \quad (23)$$

Błąd średniokwadratowy (MSE – Mean Square Error):

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (I_{tot,norma} - I_{tot,ref})^2 \quad (24)$$

Pierwiastek błędu średniokwadratowego (RMSE – Root Mean Square Error):

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (I_{tot,norma} - I_{tot,ref})^2} \quad (25)$$

W rozpatrywanym przypadku liczba próbek $n = 8760$.

Wyniki

Dane meteorologiczne

Dla uzyskania odpowiedzi na wątpliwości przedstawione we wstępie zostały wykonane obliczenia wartości godzinowych natężania promieniowania całkowitego. Zastosowano model z normy oraz model oryginalny, z prawidłową zależnością na współczynnik przejrzystości nieboskłonu (ε), zgodnie z równaniem (21). Obliczenia wykonano

z wykorzystaniem pięciu rodzajów plików z Typowych Lat Meteorologicznych TLM2000 wymienionych wcześniej, tj. TMY, ISO, TRY, HSY oraz CWY.

W Tabeli 1 zestawiono wartości maksymalne natężenia promieniowania słonecznego całkowitego ($G_{sol,g}$), bezpośredniego ($G_{sol;b,h}$) oraz rozproszonego ($G_{sol;d}$) na powierzchni poziomej w wymienionych zbiorach dla Krakowa.

Tabela 1. Wartości maksymalne irradiancji (W/m^2) dla poszczególnych rodzajów plików TLM2000. Źródło: opracowanie własne

Table 1. Maximum irradiance values (W/m^2) for individual types of TLM2000 files. Source: authors' own study

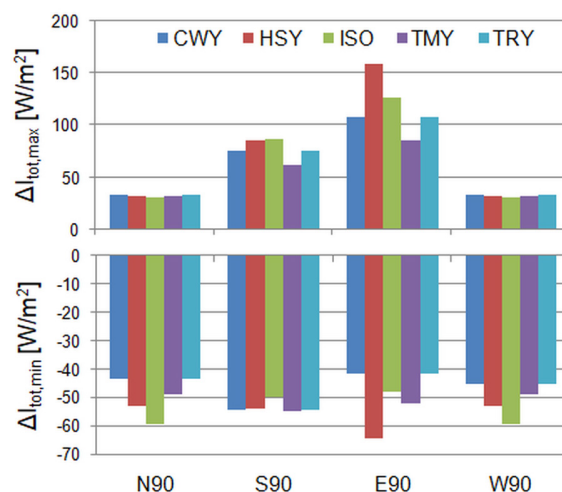
Parametr	TMY	TRY	ISO	HSY	CWY
$G_{sol,g}$	868,37	889,40	866,04	867,54	889,40
$G_{sol;b,h}$	707,51	744,66	720,68	724,71	744,66
$G_{sol;d}$	378,68	378,94	381,81	402,05	387,94

Mimo pozornie niewielkich rozbieżności między wartościami maksymalnymi należy mieć na uwadze, że różnice w metodologii wyboru danych źródłowych do poszczególnych rodzajów plików, przedstawione w (Narowski, 2022c), przekładają się na różnice ich przebiegów godzinowych w ciągu roku (Tabela 2). Ze względu na to, że pliki TMY są zalecane do stosowania w symulacjach energetycznych budynków, to różnice obliczono w odniesieniu do tego typu.

Tabela 2. Maksymalne i minimalne godzinowe różnice $G_{sol,g}$ (W/m^2) pomiędzy TMY oraz pozostałymi plikami. Źródło: opracowanie własne

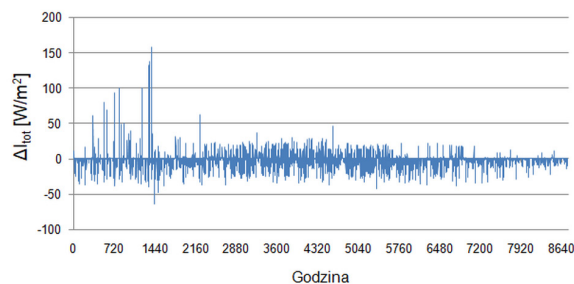
Table 2. Maximum and minimum hourly differences $G_{sol,g}$ (W/m^2) between TMY and other files. Source: authors' own study

	TMY - TRY	TMY - ISO	TMY - HSY	TMY - CWY
Max	644,03	653,03	751,44	848,61
Min	-770,73	-812,17	-293,09	-771,24



Rysunek 1. Maksymalne i minimalne godzinowe różnice ΔI_{tot} (W/m^2) pomiędzy wartościami referencyjnymi i obliczonymi z normy. Źródło: opracowanie własne

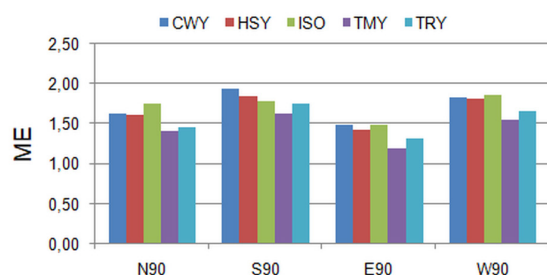
Figure 1. Maximum and minimum hourly differences of ΔI_{tot} (W/m^2) between reference values and the model from the standard. Source: authors' own study



Rysunek 2. Przebieg ΔI_{tot} dla pliku HSY i powierzchni E90.

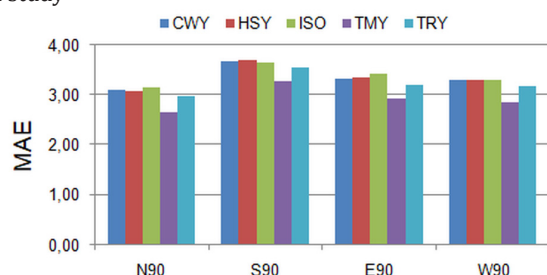
Źródło: opracowanie własne

Figure 2. ΔI_{tot} for a HSY file and an East-orientated vertical surface (E90). Source: authors' own study



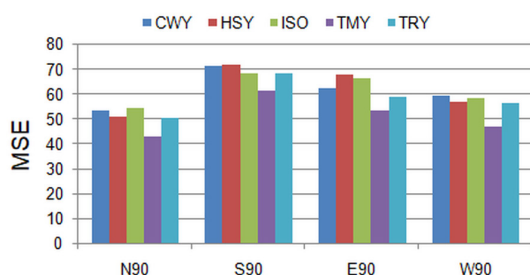
Rysunek 3. Błąd średni dla powierzchni prostopadłej. Źródło: opracowanie własne

Figure 3. Average error for a vertical surface. Source: authors' own study



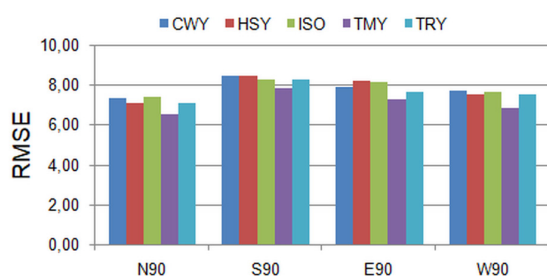
Rysunek 4. Błąd średni bezwzględny dla powierzchni prostopadłej. Źródło: opracowanie własne

Figure 4. Mean average error for a vertical surface. Source: authors' own study



Rysunek 5. Błąd średniokwadratowy dla powierzchni prostopadłej. Źródło: opracowanie własne

Figure 5. Meansquared error for a vertical surface. Source: authors' own study



Rysunek 6. Błąd RMSE dla powierzchni prostopadłej. Źródło: opracowanie własne

Figure 6. RMSE error for a vertical surface. Source: authors' own study

Rezultaty dla powierzchni pionowej wskazują, że wybór danego pliku do symulacji energetycznych budynków powinien być przemyślany, ponieważ może on istotnie wpłynąć na uzyskane rezultaty.

W dalszej części rozpatrzono powierzchnie zlokalizowane w Krakowie, pochylone do podłoża pod kątem 90° oraz 45° , a skierowane kolejno na północ (N), południe (S), wschód (E) i zachód (W). We wszystkich przypadkach pominięto składową odbitą od gruntu (refleksyjną) przyjmując współczynnik odbicia $\rho_{sol,grnd} = 0$.

Powierzchnia prostopadła do podłoża

Dla powierzchni prostopadłej do podłoża we wszystkich przypadkach zanotowano znaczne maksymalne rozbieżności względem modelu referencyjnego (Rysunek 1).

Wartości dodatnie ΔI_{tot} na Rysunku 2 oznaczają, że model z normy zaniża obliczone natężenie całkowite promieniowania słonecznego. Widać, że wartości maksymalne są najniższe (rzędu $31 \dots 33 \text{ W/m}^2$) dla orientacji północnej i zachodniej, zaś najwyższe dla orientacji wschodniej. Wartości minimalne są na podobnym poziomie ($-41 \dots -64 \text{ W/m}^2$) dla wszystkich typów plików TLM. Należy jednak mieć na uwadze, że w ciągu całego roku powyższe wartości mogą pojawić się incydentalnie. Dobrym tego przykładem jest np. wykres dla zbioru HSY dla powierzchni zorientowanej na wschód (E90), pokazany na Rysunku 2.

W związku z tym dokładniejszych informacji na temat zanotowanych rozbieżności dostarczyć może analiza statystyczna, której wyniki przedstawiono na kolejnych rysunkach. Wartość błędu średniego (Rysunek 3) była dodatnia we wszystkich przypadkach. Wskazuje to na systematyczne przeszacowywanie przez model z normy godzinowych wartości obliczonego natężenia promieniowania słonecznego o średnią wartość od $1,19 \text{ W/m}^2$ (TMY, E90) do $1,93 \text{ W/m}^2$ (CWY, S90). Jednak należy mieć na uwadze fakt, że podczas sumowania (równanie (22)) godzinowe wartości ujemne i dodatnie znoszą się wzajemnie. W związku z tym, dla uzyskania pełniejszego obrazu analizowanej sytuacji, konieczne jest wykorzystanie także innych miar.

Wartość błędu średniego bezwzględnego (Rysunek 4) wahała się od $2,67 \text{ W/m}^2$ (TMY, N90) do $3,71 \text{ W/m}^2$ (HSY, S90). Wskazuje ona średni błąd, jakim obarczone były wartości obliczone wg normy względem modelu odniesienia, dla całego roku.

Błąd średniokwadratowy MSE (Rysunek 5) wskazuje na rozrzut wokół średniej ze zbioru. Jednocześnie jest wrażliwy na wartości skrajne, oddalone od tej średniej. Jego wartości były najniższe dla orientacji północnej, najślabiej oświetlonej, a wahały się od $42,6$ (TMY) do $54,4$ (ISO). Najwyższe wartości zanotowano dla powierzchni zwróconej na południe i wyniosły one od $61,1$ (TMY) do $71,4$ (HSY).

Ostatni z wykorzystanych wskaźników to pierwiastek błędu średniokwadratowego RMSE (Rysunek 6), wyrażany w jednostkach analizowanej wielkości fizycznej. Można go interpretować jako średnią różnicę między wartościami z normy i odniesienia.

Jak widać z Rysunku 6, przyjmował on najniższe wartości dla orientacji północnej, od $6,5 \text{ W/m}^2$ (TMY) do $7,4 \text{ W/m}^2$ (ISO). Najwyższe zanotowano dla orientacji południowej, a wyniosły one od $7,8 \text{ W/m}^2$ (TMY) do $8,5 \text{ W/m}^2$ (HSY).

Powierzchnia pochyłona pod kątem 45°

Dla powierzchni pochyłonej pod kątem 45° do podłoża zanotowano różnice o podobnym charakterze jak w poprzednim przypadku, lecz o mniejszych wartościach. Wynika to z tego, że wraz ze zmniejszaniem kąta pochylenia rozpatrywanej powierzchni do poziomu, w całkowitym natężeniu promieniowania słonecznego docierającego do tej powierzchni maleje udział składowej rozproszonej. Obliczone rozbieżności były jednak na tyle duże, że trudno je uznać za zaniedbywalne.

Błąd średni (ME) wahał się dla orientacji wschodniej od 0,80 (TMY) do 1,02 (ISO) i dla południowej od 1,17 (TMY) do 1,40 (CWY). MAE z kolei przyjmował wartości od 2,05 W/m² (TMY) do 2,39 W/m² (ISO) i od 2,37 W/m² (TMY) do 2,69 W/m² (HSY) odpowiednio dla kierunku północnego i południowego.

Również MSE był niższy niż w poprzednim przypadku. Wahał się on od 24,7 (TMY) do 31,4 (ISO) dla południa oraz od 33,1 (TMY) do 39,0 (HSY) dla południa.

Z kolei RMSE przyjmował dość wyrównane wartości, od 4,97 W/m² (TMY) do 5,60 W/m² (ISO) i od 5,76 W/m² (TMY) do 6,24 W/m² (HSY), odpowiednio dla orientacji północnej i południowej.

Wnioski

W artykule przedyskutowano wpływ błędów w normie PN-EN ISO 52010 we wzorze na wartość współczynnika przejrzystości nieboskłonu w modelu Perez na wynikowe wartości natężenia promieniowania słonecznego całkowitego docierającego do powierzchni pochyłonej zlokalizowanej w Krakowie. Wykorzystano dane z plików Typowych Lat Meteorologicznych TLM2000 typu TMY, ISO, TRY, HSY oraz CWY. Niezależnie od rodzaju zbioru wejściowego zanotowano istotne rozbieżności rezultatów obliczeń wykonanych z wykorzystaniem oryginalnego, poprawnego, modelu oraz według normy. Ich wielkość, mierzona za pomocą pierwiastka błędu średniokwadratowego (RMSE), w przypadku powierzchni prostopadłej do podłoża była najniższa dla orientacji północnej, i wyniosła od 6,5 W/m² (TMY) do 7,4 W/m² (ISO). Najwyższe rozbieżności zanotowano dla orientacji południowej, a wahały się one od 7,8 W/m² (TMY) do 8,5 W/m² (HSY).

Są to wartości, które nie można uznać za zaniedbywalne. Jest to o tyle istotne, że mogą one mieć wpływ np. na rezultaty obliczeń charakterystyki energetycznej budynków. Dlatego też jak najszybciej powinny być one skorygowane przez odpowiedzialne za to instytucje.

Bibliografia

- Gil-Mastalerczyk, J., & Kraska, K. (2023) Promieniowanie słoneczne – istotny element w procesie projektowania domu pasywnego w Polsce. *Materiały Budowlane*. 2023(7), 11–17. <https://doi.org/10.15199/33.2023.07.03>
- Górzyński, J. (2020) Pozyskiwanie i przetwarzanie energii odnawialnej. *Napędy i sterowanie*. 22(10), 70–77

- Idczak M., & Firląg Sz. (2006). Okna u budynkach pasywnych – funkcje, wymagania, bilans energetyczny, komfort cieplny. *Świat szkła*. 2022(7–8), 38–45
- ISO. (2017) ISO 52010-1:2017 Energy performance of buildings — External climatic conditions. Part 1: Conversion of climatic data for energy calculations.
- Lis P., & Lis A. (2016). Możliwość poprawy efektywności energetycznej budynków edukacyjnych. *Budownictwo o Z optymalizowanym Potencjale Energetycznym*. 1(17), 55–60. <https://doi.org/10.17512/bozpe.2016.1.08>
- Michalak, P. (2018). Obliczanie natężenia promieniowania słonecznego całkowitego padającego na dowolnie zorientowane powierzchnie pochyłone według nowej normy PN-EN ISO 52010-1:2017. *Ciepłownictwo, Ogrzewnictwo, Wentylacja*, 49 (7), 280–287. <https://doi.org/10.15199/9.2018.7.5>
- Michalak, P. (2019). Wpływ błędów w normie PN-EN ISO 52010-1 na wyniki obliczeń natężenia promieniowania słonecznego. *Ciepłownictwo, Ogrzewnictwo, Wentylacja*, 50(7), 253–256. <https://doi.org/10.15199/9.2019.7.2>
- Michalak, P. (2019). Nowe normy serii PN-EN ISO 52000 a miesięczne zyski ciepła od nasłonecznienia w budynkach mieszkalnych. *Ciepłownictwo, Ogrzewnictwo, Wentylacja*, 50(2), 50–55. <https://doi.org/10.15199/9.2019.2.2>
- Narowski, P. (2006). Dane klimatyczne do obliczeń energetycznych w budownictwie. *Ciepłownictwo, Ogrzewnictwo, Wentylacja*. 11(37), 22–27
- Narowski, P. (2022). Nowe typowe lata meteorologiczne dla Polski. *Rynek Instalacyjny*. 2022(11), 32–36
- Narowski, P. (2022). TLM2000 – Typowe lata meteorologiczne dla Polski wyznaczone na podstawie danych meteorologicznych i klimatycznych z lat 2001–2020. *Ciepłownictwo, Ogrzewnictwo, Wentylacja*. 53(9), 7–20. <https://doi.org/10.15199/9.2022.9.1>
- Narowski, P. (2022). Analiza porównawcza typowych lat meteorologicznych Polski wyznaczonych na podstawie danych źródłowych z lat 2001–2020. *Instal*, 2022(10), 11–25. <https://doi.org/10.36119/15.2022.10.2>
- Pamuła, T. (2015). Predykcja natężenia ruchu w ciągu skrzyżowań z wykorzystaniem sieci neuronowych. *TTS Technika Transportu Szynowego*, 22(12), 1180–1185.
- Perez, R., Stewart, R., Seals, R., & Guertin, T. (1988). The Development and Verification of the Perez Diffuse Radiation Model. *Atmospheric Sciences Research Center SUNY at Albany*. <https://www.osti.gov/biblio/7024029>
- Święcicki, A. (2014). Optymalizacja wymiany okien z uwzględnieniem efektu solarnego. *Materiały Budowlane*. 2014(12), 55–57. <https://doi.org/10.15199/33.2014.12.18>
- PKN. (2017) PN-EN ISO 52010-1:2019-09. Energetyczne właściwości użytkowe budynków - Zewnętrzne warunki klimatyczne – Część 1: Konwersja danych klimatycznych do obliczeń energetycznych. *Polski Komitet Normalizacyjny*, 2017, Warszawa

Zastrzeżenie: Oświadczenia, opinie i dane przedstawione w publikacjach są wyłączną odpowiedzialnością ich autorów i nie odzwierciedlają stanowiska redakcji *Ciepłownictwo Ogrzewnictwo Wentylacja*. Redakcja nie ponosi odpowiedzialności za jakiegokolwiek szkody dotyczące osób lub mienia wynikające z idei, metod, zaleceń lub produktów omawianych w treści publikacji. *Artykuł udostępniony na licencji Creative Commons CC BY 4.0*.

Disclaimer: The statements, opinions, and data presented in the publications are the sole responsibility of their authors and do not necessarily reflect the views of the editorial board of *Ciepłownictwo Ogrzewnictwo Wentylacja*. The editorial board assumes no responsibility or liability for any injury to persons or damage to property resulting from any ideas, methods, instructions, or products referred to in the content of the publications. *The article is distributed under the Creative Commons CC BY 4.0 license*.