Doświadczenie „PROMIENIOWANIE SŁONECZNE”

Wprowadzenie teoretyczne

Słońce jest głównym źródłem energii docierającej do Ziemi. Jego moc promieniowania jest tak ogromna, że w ciągu jednej godziny powierzchnia całej Ziemi otrzymuje więcej energii niż cała ludzkość zużywa w ciągu roku. W praktyce jednak tylko niewielka część tej energii może być efektywnie pozyskana i wykorzystana, głównie ze względu na ograniczenia technologiczne i warunki atmosferyczne.

Na jednostkę powierzchni ustawioną prostopadle do promieniowania, poza atmosferą, przypada średnio około 1361 W/m² — wartość ta nazywana jest stałą słoneczną. W rzeczywistości nie jest to wartość absolutnie stała — zmienia się sezonowo (ok. ±3,3%) w wyniku zmienności odległości Ziemi od Słońca związanej z ruchem orbitalnym.

Promieniowanie elektromagnetyczne emitowane przez Słońce można z dobrym przybliżeniem opisać za pomocą modelu ciała doskonale czarnego o temperaturze powierzchni około 5778 K. Widmo takiego ciała opisuje rozkład Plancka, który określa moc wypromieniowaną w jednostkowym zakresie długości fali:

$$B(\lambda,T)=\frac{2\pi h c^2}{\lambda^5}\cdot\frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda k_B T}}-1}, \tag{1}$$

gdzie:
$B(\lambda,T)$ — natężenie promieniowania w jednostkowym przedziale długości fali [$W\cdot m^{-2}\cdot m^{-1}$],
h — stała Plancka,
c — prędkość światła,
k_B — stała Boltzmanna,
T — temperatura powierzchni ciała,
λ — długość fali.

Długość fali dla maksimum tego widma określa prawo przesunięć Wiena:

$$\lambda_{max}=\frac{b}{T}, \tag{2}$$

gdzie $b \approx 2{,}898\cdot 10^{-3}\ m\cdot K$. Dla temperatury Słońca oznacza to, że maksimum wypromieniowanej energii przypada na długość fali ok. 0,5–0,55 µm, czyli w zakresie światła widzialnego (między żółcią a zielenią).

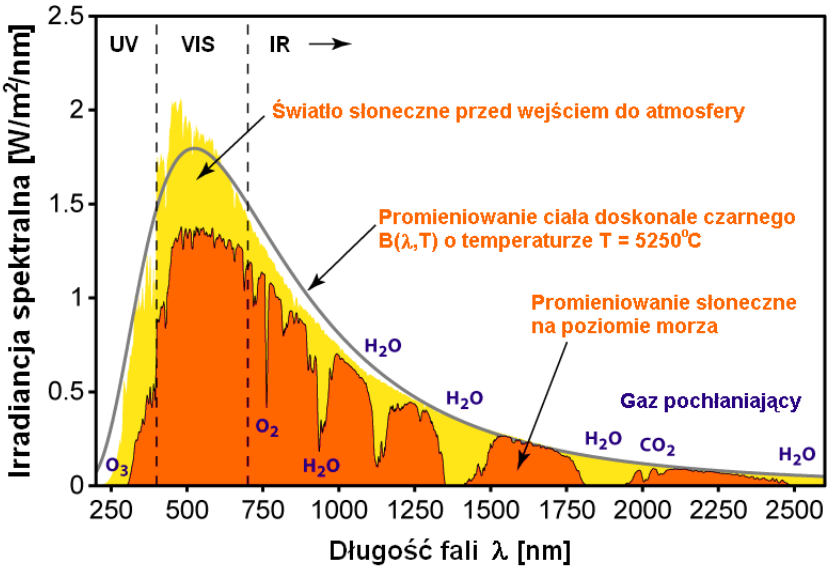
Całkowitą moc promieniowania emitowaną przez jednostkę powierzchni ciała doskonale czarnego, po scałkowaniu radiancji po długościach fal, opisuje prawem Stefana-Boltzmanna:

$$E(T)=\int_0^\infty B(\lambda,T)\,d\lambda=\sigma T^4, \tag{3}$$

gdzie:
E — całkowita emisja energetyczna [W/m²],
$\sigma \approx 5{,}67\cdot 10^{-8}\ Wm^{-2}K^{-4}$ — stała Stefana-Boltzmanna.

Dla powierzchni Słońca daje to całkowitą emisję rzędu $6{,}3\cdot 10^7$ W/m², która — po rozproszeniu w przestrzeni — daje wartość stałej słonecznej obserwowaną w pobliżu Ziemi.

W drodze od Słońca do powierzchni Ziemi promieniowanie ulega tłumieniu, wynikającemu z procesów absorpcji i rozpraszania w atmosferze. Różne składniki atmosfery pochłaniają określone długości fal. Na przykład: ozon (O_3) silnie absorbuje promieniowanie UV, para wodna (H_2O) i dwutlenek węgla (CO_2) — podczerwień, aerozole i pyły mogą pochłaniać części promieniowania widzialnego.



Widmo promieniowania słonecznego na szczycie atmosfery (kolor żółty), na poziomie morza (kolor czerwony), oraz widmo ciała doskonale czarnego $B(\lambda,T)$ o temperaturze T = 5250°C (szara linia)

Z kolei rozpraszanie światła można podzielić na:

1. Rayleighowskie rozpraszanie (na cząsteczkach powietrza), które powoduje niebieski kolor nieba i odpowiada za silne rozproszenie krótkofalowego światła (niebieskiego).
2. Rozpraszanie na cząstkach większych, (np. pyłach, kropelkach wody), które może być opisane teorią Mie, jest mniej selektywne względem długości fali i dominuje przy wysokim zanieczyszczeniu lub zachmurzeniu.

Efektem tych procesów jest podział promieniowania słonecznego na:

- składnik bezpośredni (docierający po prostej drodze ze Słońca),
- składnik rozproszony (pochodzący z całego nieboskłonu),
- składnik odbity (np. od chmur, powierzchni gruntu — mniej istotny w tym kontekście).

Na ilość energii promieniowania docierającego do powierzchni wpływają:

- kąt padania promieni słonecznych (kąt zenitalny) — im wyższe Słońce, tym krótsza droga przez atmosferę (mniejsza masa optyczna),
- zachmurzenie — niskie chmury redukują promieniowanie znacznie silniej niż wysokie,
- zawartość pary wodnej i zanieczyszczeń — zwiększają absorpcję i rozpraszanie.

W typowy letni, pogodny dzień w Polsce chwilowe natężenie napromienienia powierzchni poziomej osiąga do 1000 W/m², choć tylko w wyjątkowych warunkach może zbliżyć się do wartości stałej słonecznej. Taka wartość będzie jedynie chwilową wartością maksymalną. Definiujemy ją następująco:

$$GHI(t) = DHI(t) + DNI(t)\cdot\cos\theta\,, \tag{4}$$

gdzie:

$GHI(t)$ (Global Horizontal Irradiance) – sumaryczne promieniowanie padające na powierzchnię poziomą, wyrażane w jednostkach: W/m²

$DHI(t)$ (Diffuse Horizontal Irradiance) – promieniowanie rozproszone padające na powierzchnię poziomą z całego nieba (bez tarczy Słońca), wyrażone w jednostkach: W/m² (moc chwilowa).

$DNI(t)$ (Direct Normal Irradiance) – promieniowanie bezpośrednie tarczy Słońca, mierzone na powierzchni prostopadłej do kierunku promieniowania,

θ – kąt zenitalny Słońca – chwilowy kąt między kierunkiem promieniowania bezpośredniego Słońca a kierunkiem pionowym

W pogodny letni dzień w Polsce:

$DNI(t)$ może wynosić ~900 W/m²,

$DHI(t)$ ~100 – 200 W/m²,

$GHI(t)$ (łącznie) ~1000 W/m².

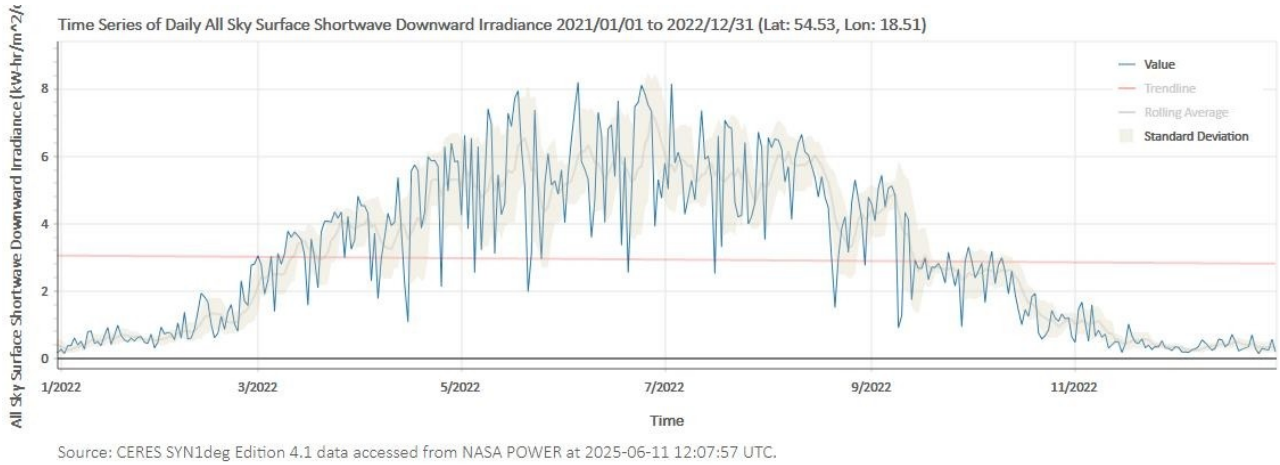
W dzień pochmurny:

$DNI(t) \approx 0$, brak bezpośredniego promieniowania,

$DHI(t) \approx$ 100 – 300 W/m²,

$GHI(t) \approx DHI$.

Interesująca jest też dobowo skumulowana energia, czyli całkowite napromieniowanie na powierzchnię poziomą – $H_{GHI,d}$ (Global Horizontal Irradiation per day) wyrażone w kWh/m²/dzień – to miara całkowitej ilości promieniowania słonecznego, jaka pada na jednostkę powierzchni poziomej w ciągu doby.



Całkowita energia dzienna $H_{GHI,d}$ w zakresie krótkofalowym w Gdyni – zmiany w 2022 roku.

Przykładowe miesięczne dane średniego dziennego napromieniowania ($H_{GHI,d}$) dla Gdyni, oparte na danych NASA POWER oraz Global Solar Atlas. To przybliżone wartości typowe dla polskiego wybrzeża:

Miesiąc	Średnie $H_{GHI,d}$ (kWh/m²/dzień)
Styczeń	0,6
Luty	1,2
Marzec	2,5
Kwiecień	4,0
Maj	5,2
Czerwiec	5,7
Lipiec	5,5
Sierpień	5,0
Wrzesień	3,8
Październik	2,5
Listopad	1,2
Grudzień	0,6
Średnia roczna	**≈3,2**

Takie dane mogłyby stanowić kluczowy parametr np. w projektowaniu systemów fotowoltaicznych.

Trzeba jeszcze tylko wziąć pod uwagę sprawność paneli fotowoltaicznych, która wynosi:

- 20-22% dla paneli monokrystalicznych
- 16-18% dla paneli polikrystalicznych

Sprawność ta dodatkowo zależy np. od temperatury, wyższa temperatura obniża sprawność paneli.

Dodatkowo należy uwzględnić nachylenie paneli (kąt i kierunek), bo informacja dotyczy powierzchni poziomej.

„PROMIENIOWANIE SŁONECZNE”

Pytania do przygotowania:

1. Co to jest ciało doskonale czarne i dlaczego promieniowanie emitowane przez Słońce można aproksymować modelem takiego ciała?
2. Sformułuj prawo Stefana–Boltzmanna. Jak zmieni się całkowita moc promieniowania ciała doskonale czarnego po dwukrotnym zwiększeniu temperatury?
3. Sformułuj prawo przesunięć Wiena i oblicz długość fali odpowiadającą maksimum emisji dla temperatury powierzchni Słońca równej 5778 K.
4. Czym jest stała słoneczna? Dlaczego jej wartość zmienia się w ciągu roku mimo nazwy sugerującej stałość?
5. Wyjaśnij różnicę pomiędzy: mocą promieniowania [W/m²], energią promieniowania [J/m²], napromieniowaniem dobowym [kWh/m²/dzień].
6. Opisz procesy, jakie zachodzą z promieniowaniem słonecznym podczas przechodzenia przez atmosferę ziemską (rozpraszanie, absorpcja, odbicie)?
7. Na czym polega rozpraszanie Rayleigha i dlaczego niebo ma kolor niebieski?
8. Jakie składniki atmosfery odpowiadają za absorpcję promieniowania słonecznego w różnych zakresach widma?
9. Co to jest masa optyczna atmosfery i jak zależy od kąta zenitalnego Słońca?
10. Dlaczego zimą natężenie promieniowania słonecznego docierającego do powierzchni Ziemi jest znacznie mniejsze niż latem? Wymień co najmniej trzy przyczyny.
11. Zdefiniuj pojęcia: *GHI*, *DNI*, *DHI*. Podaj zależność matematyczną między nimi.
12. Jakie warunki meteorologiczne powodują wzrost udziału promieniowania rozproszonego w całkowitym promieniowaniu docierającym do powierzchni?
13. Dlaczego w dzień całkowicie pochmurny pomiar promieniowania bezpośredniego może być bliski zeru, mimo że natężenie oświetlenia pozostaje znaczne?
14. W jaki sposób można eksperymentalnie rozdzielić promieniowanie bezpośrednie i rozproszone za pomocą luksomierza oraz tuby kolimacyjnej?
15. Dane z NASA POWER dla Gdyni podają średnie dobowe napromienienie równe 5,4 kWh/m²/dzień. Oblicz:
    a) ile energii w dżulach dociera w ciągu doby na 1 m²
    b) jaka jest średnia moc przypadająca na 1 m² w ciągu całej doby
    c) jaka byłaby średnia moc, jeśli przyjąć 10 godzin efektywnego nasłonecznienia

„PROMIENIOWANIE SŁONECZNE”

Wskazówki do wykonania pomiarów

Celem ćwiczenia jest:
- wykonanie terenowego pomiaru natężenia promieniowania słonecznego,
- wyznaczenie udziału promieniowania bezpośredniego i rozproszonego,
- porównanie wyników pomiarowych z danymi satelitarnymi,
- analiza sezonowej zmienności promieniowania słonecznego,
- porównanie warunków solarnych dwóch lokalizacji.

Przygotuj aparaturę:
- luksomierz i tuba kolimacyjna
- statyw
- karta pomiarowa
- komputer z arkuszem kalkulacyjnym i dostępem do danych NASA POWER

Część A. Pomiar terenowy

1. Wybierz miejsce: niezacienione, oddalone od powierzchni odbijających światło, zapewniające bezpośrednią ekspozycję na Słońce.
2. Zapisz: datę, godzinę, temperaturę, zachmurzenie, rodzaj chmur.
3. Na podstawie daty, godziny i współrzędnych geograficznych miejsca pomiaru określ kąt zenitalny Słońca, korzystając z kalkulatora położenia Słońca.
4. Pomiar całkowitego promieniowania $GHI(t)$: wybierz jednostki W/m^2; ustaw luksomierz poziomo, wykonaj 5 pomiarów w odstępach 10-20 s, zanotuj wyniki.
5. Pomiar promieniowania bezpośredniego $DNI(t)$: załóż tubę kolimacyjną, ustaw oś tuby na tarczę słoneczną, wykonaj 5 pomiarów, zanotuj wyniki i wróć do sali laboratoryjnej

Część B. Analiza danych satelitarnych

6. Wejdź na stronę https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/ i znajdź dwie lokalizacje uzgodnione z prowadzącym (np. Gdynia i miejsce zamieszkania – każdy student inne)
7. Wybierz kolejno:
- Single Point,
- User Community: Renewable Energy
- Temporal Level: daily
- Location: wybierz klikając na mapie lub wpisz wartości „Latitude” i „Longitude”
- Time Extent: ubiegły rok,
- Parameters:
  - All Sky Surface Shortwave Downward Irradiance → $H_{GHI,d}$
  - Clear Sky Surface Shortwave Downward Irradiance → $H_{CLR\,GHI,d}$ – wartość hipotetyczna, gdyby nie było zachmurzenia
  - All Sky Surface Shortwave Downward Direct Normal Irradiance → $H_{DNI,d}$
  - All Sky Surface Shortwave Diffuse Irradiance → $H_{DHI,d}$
- Data Download: Format: ASCII

8. Kliknij Submit – pobieranie danych na komputer, powtórz pobieranie dla drugiej lokalizacji
9. Otwórz pliki w arkuszu kalkulacyjnym i usuń rekordy (dni) zawierające wartość: -999 (brak danych)

Wskazówki do sprawozdania

„PROMIENIOWANIE SŁONECZNE”

Sprawozdanie powinno zawierać następujące elementy:

- Cel ćwiczenia
- Krótki opis metody pomiarowej
- Warunki meteorologiczne podczas pomiarów
- Wyniki pomiarów terenowych
- Analizę danych NASA POWER
- Obliczenia i interpretację wyników
- Wykresy wykonane na komputerze i wydrukowane
- Dyskusję oraz wnioski

Część A. Pomiar terenowy

Parametr	Wartość
Data	
Godzina	
Lokalizacja	
Kąt zenitalny Słońca θ [°]	
Temperatura [°C]	
Zachmurzenie	
Rodzaj chmur	

Pomiar chwilowy	1	2	3	4	5	Średnia
GHI(t) [W/m²]						
DNI(t) [W/m²]						

Wykonaj obliczenia

- Średnie sumaryczne promieniowanie padające na powierzchnię poziomą:

$$\overline{GHI}_{pom} = \frac{GHI_1(t) + \ldots + GHI_5(t)}{5}$$

- Średnie promieniowanie bezpośrednie tarczy Słońca:

$$\overline{DNI}_{pom} = \frac{DNI_1(t) + \ldots + DNI_5(t)}{5}$$

- Średnie promieniowanie rozproszone padające na powierzchnię poziomą:

$$\overline{DHI}_{pom} = \overline{GHI}_{pom} - \overline{DNI}_{pom} \cdot \cos(\theta)$$

- Udział promieniowania rozproszonego:

$$U_D = \frac{\overline{DHI}_{pom}}{\overline{GHI}_{pom}} \cdot 100\,\%$$

- Porównanie ze stałą słoneczną:

$$\eta = \frac{\overline{GHI}_{pom}}{1361} \cdot 100\,\%$$

Część B. Analiza danych satelitarnych

Pobranie i przygotowanie danych NASA POWER

Pobierz dane dla dwóch lokalizacji, na przykład : (I) miejsca zamieszkania oraz (II) lokalizacji wskazanej przez prowadzącego. Zakres czasowy: cały poprzedni rok kalendarzowy.

W serwisie NASA POWER wybierz:

- Single Point
- Community: Renewable Energy
- Temporal: Daily
- Time extent: poprzedni rok
- Format danych: ASCII (.txt)

Zaznacz następujące parametry:

- **ALLSKY_SFC_SW_DWN:** $H_{GHI,d}$ – całkowite dobowe napromieniowanie słoneczne docierające do poziomej powierzchni [kWh/m²/day].
- **CLRSKY_SFC_SW_DWN:** Clear Sky ($H_{CLR\,GHI,d}$) – całkowite dobowe napromieniowanie słoneczne, hipotetyczne – przy bezchmurnym niebie [kWh/m²/day].
- **ALLSKY_SFC_SW_DNI:** Direct Normal Irradiance ($H_{DNI,d}$) – całkowite dobowe napromieniowanie słoneczne bezpośrednie na powierzchnię prostopadłą do promieni słonecznych [kWh/m²/day].
- **ALLSKY_SFC_SW_DIFF:** Diffuse Horizontal Irradiance ($H_{DHI,d}$) – całkowite dobowe napromieniowanie słoneczne rozproszone docierające do powierzchni poziomej [kWh/m²/day].

Otwórz pobrany plik w arkuszu kalkulacyjnym. Pierwsze kolumny zawierają YEAR, MO i DY (rok, miesiąc i dzień), kolejne cztery kolumny odpowiadają wybranym parametrom.

Uwaga:

Przed rozpoczęciem obliczeń należy usunąć wszystkie rekordy zawierające wartość -999 w którejkolwiek z analizowanych kolumn. Wartość -999 oznacza brak danych (missing value) i nie może być uwzględniana podczas obliczania średnich, minimów, maksimów ani odchylenia standardowego.

Analiza danych

Na podstawie pobranych danych NASA POWER dla obu lokalizacji:

1. Oblicz średnie miesięczne i roczne wartości dobowego napromienienia całkowitego ($H_{GHI,d}$), bezpośredniego ($H_{DNI,d}$) oraz rozproszonego ($H_{DHI,d}$).
2. Przedstaw na wykresach zmienność miesięcznych wartości $H_{GHI,d}$, $H_{DNI,d}$ *i* $H_{DHI,d}$, w obu lokalizacjach. Dobierz sposób prezentacji umożliwiający porównanie zarówno poszczególnych składników promieniowania, jak i lokalizacji.
3. Opracuj tabelę porównawczą zawierającą najważniejsze charakterystyki promieniowania w obu lokalizacjach (np. wartości średnie, maksymalne i minimalne, różnice sezonowe).
4. Oblicz dla każdego dnia wskaźnik bezchmurnego nieba:
   $$K_c = \frac{H_{GHI,d}}{H_{CLR\,GHI,d}}$$
   gdzie: $H_{CLR\,GHI,d}$ oznacza dobowe napromienienie przy bezchmurnym niebie.
5. Wyznacz średnie miesięczne wartości K_c i przedstaw ich zmienność na wykresie. Porównaj wyniki dla obu lokalizacji.

Dyskusja i wnioski

Na podstawie przeprowadzonych obliczeń oraz przygotowanych tabel i wykresów sformułuj co najmniej 6 wniosków, uwzględniających porównanie obu lokalizacji oraz fizyczną interpretację uzyskanych wyników.

W dyskusji zwróć szczególną uwagę na:

- **Zmienność sezonową promieniowania słonecznego** – porównaj wartości: $H_{GHI,d}$, $H_{DNI,d}$ *i* $H_{DHI,d}$, w poszczególnych miesiącach. Czy ich maksima i minima występują w tych samych okresach? Jak duże są różnice między latem a zimą?
- **Udział promieniowania rozproszonego** – w których miesiącach jest największy, a w których najmniejszy? Jak można wyjaśnić obserwowane zmiany?

- **Wpływ zachmurzenia** – przeanalizuj sezonową zmienność wskaźnika K_c. Czy miesiące o największym napromienieniu charakteryzują się jednocześnie najwyższymi wartościami tego wskaźnika?
- **Porównanie lokalizacji** – wskaż najważniejsze podobieństwa i różnice w wartościach: $H_{GHI,d}$, $H_{DNI,d}$ i $H_{DHI,d}$, oraz ich zmienności sezonowej. W których miesiącach różnice są największe i jakie mogą być ich przyczyny?
- **Możliwości wykorzystania energii słonecznej** – oceń, która lokalizacja charakteryzuje się korzystniejszymi warunkami do pozyskiwania energii słonecznej i jak zmieniają się one w ciągu roku.
- **Porównanie pomiarów terenowych z danymi NASA POWER** – oceń, czy uzyskane wyniki pomiarowe są zgodne z ogólną charakterystyką promieniowania w danej lokalizacji. Uwzględnij różnice między wartościami chwilowymi i dobowymi oraz ograniczenia zastosowanej metody pomiarowej.
- **Ograniczenia analizy** – oceń, w jakim stopniu dane z jednego roku pozwalają scharakteryzować warunki promieniowania słonecznego w badanych lokalizacjach.

Każdy wniosek powinien być poparty konkretnymi wynikami liczbowymi, odnosić się do przeprowadzonych obliczeń lub wykresów oraz, tam gdzie to możliwe, zawierać fizyczne wyjaśnienie zaobserwowanych zależności. Unikaj ogólnych stwierdzeń niezwiązanych bezpośrednio z uzyskanymi wynikami.