

Metoda výpočtu solárního potenciálu střech v Ústeckém kraji

Přehled metody

Pro modelování solárního potenciálu střech byl vyvinut vlastní výpočetní nástroj v jazyce Python a C, který kombinuje funkce z knihovny **pvlb-python** (knihovna pro simulaci výkonu fotovoltaických systémů; Holmgren et al. 2018) s vlastními implementacemi pro analýzu lokálního zastínění. Výpočty jsou prováděny s časovým krokem 15 minut pro každý měsíc v roce.

Vstupní data

Geodata

- **Digitální model povrchu (DSM):** Výškový model terénu, vegetace a budov s prostorovým rozlišením 1 m, pořízený metodou leteckého laserového skenování (ALS LiDAR)
- **Polygony střech:** Vektorové hranice střešních ploch z Katastru nemovitostí ČR

Meteorologická data

Dlouhodobá měření z meteorologických stanic v Ústeckém kraji, konkrétně na stanicích **Tušimice** (1984 - 2023), **Doksany** (2003 - 2023) a **Kočkov** (1984 - 2023). Použity byly měření následujících veličin:

- Globální horizontální záření (GHI - Global Horizontal Irradiance) - všechny tři stanice
- Difúzní horizontální záření (DHI - Diffuse Horizontal Irradiance) - pouze stanice Tušimice a Doksany

Model CSDF (Clear Sky Diffuse Fraction)

Klimatické parametry

Model používá tři klíčové parametry odvozené z meteorologických dat:

1. Clearsky Index (k_c)

$$k_c = \text{GHI_measured} / \text{GHI_clearsky}$$

Poměr skutečně naměřeného globálního záření k modelovanému záření při čisté atmosféře. Vyjadřuje účinek oblačnosti na útlum slunečního záření. Vypočítáno jako měsíční průměr z několikaletých měření.

2. Diffuse Fraction (k_d)

$$k_d = \text{DHI_measured} / \text{GHI_measured}$$

Podíl difúzního záření na celkovém globálním záření. Tento parametr určuje rozklad globálního záření na přímou (DNI) a difúzní složku. Vypočítáno jako měsíční průměr z několikaletých měření.

3. Linkeho turbidita (T_L) Bezrozměrná veličina vyjadřující vliv aerosolů a vodní páry v atmosféře na útlum slunečního záření. Hodnoty jsou odhadnuty z empiricky stanovených tabulek v závislosti na zeměpisné poloze a ročním období (implementováno v pvlib).

4. Albedo Albedo vyjadřuje schopnost povrchu odrážet sluneční záření (hodnoty 0-1, kde 0 = žádný odraz, 1 = úplný odraz). Hodnota nastavena na 0.18 jako kompromis mezi reflexí střech a okolní zemědělské krajiny.

Výpočetní workflow

Krok 1: Simulace clearsky záření (pvlib)

Pro střed oblasti zájmu se simuluje globální horizontální záření při čisté atmosféře pomocí **Ineichen-Perez clearsky modelu** (funkce `pvlib.irradiance.get_clearsky()`; Ineichen and Perez 2002) s aplikací Linkeho turbidity. Výpočet probíhá v 15minutových intervalech.

Krok 2: Aplikace clearsky indexu

Clearsky globální záření se vynásobí měsíčním průměrem clearsky indexu, čímž se získá odhad skutečného globálního horizontálního záření při typické oblačnosti:

$$\text{GHI} = \text{GHI_clearsky} \times k_c$$

Krok 3: Dekompozice na přímou a difúzní složku

Globální záření se rozloží na přímou normálovou iradianci (DNI) a difúzní horizontální iradianci (DHI) pomocí diffuse fraction:

$$\begin{aligned} \text{DHI} &= \text{GHI} \times k_d \\ \text{DNI} &= (\text{GHI} - \text{DHI}) / \cos(\text{zenith}) \end{aligned}$$

Krok 4: Výpočet lokálního horizontu (vlastní implementace)

Pro každou buňku DSM (1×1 m) v rastru střech se vypočítá **lokální horizont** pomocí vlastního algoritmu implementovaného v C/Python. Algoritmus vyhodnocuje elevační úhel horizontu (s korekcí na zakřivení Země) ve **36 radiálních směrech** (každých 10°) s krokem 1 m podél každého paprsku.

Výstupem jsou:

- **Horizon elevation angles:** Pole 36 elevačních úhlů horizontu pro každou buňku
- **Sky View Factor (SVF):** Podíl viditelné oblohy z dané buňky, vypočítán jako:

$$SVF = (1/n) \times \sum \cos^2(\text{horizon_elevation_i})$$

kde $n = 36$ (počet směrů)

Krok 5: Aplikace zastínění

Pro každý časový krok se vyhodnotí:

- a) **Zastínění přímého záření** Pokud je aktuální pozice slunce (azimut, elevace) pod lokálním horizontem v příslušném směru, přímé záření je pro danou buňku nulové.
- b) **Redukce difúzního záření** Difúzní záření se redukuje podle Sky View Factoru:

$$DHI_reduced = DHI \times SVF$$

Krok 6: Transpozice záření na skloněnou plochu (pvlib)

Globální, přímé a difúzní záření se přepočítají na skutečnou orientaci a sklon každé buňky střechy pomocí funkce `pvlib.irradiance.get_total_irradiance()`.

Tato funkce implementuje:

- Geometrickou transpozici přímé složky podle úhlu dopadu.
- Perezův model pro difúzní složku (Perez et al., 1990), který je uznávaným standardem v solární energetice a zohledňuje nehomogenní distribuci difúzního záření po obloze.
- Příspěvek odraženého záření od okolí (ground-reflected component) podle zadaného albeda.

Výstupem je **Plane of Array Irradiance (POA)** pro každou buňku.

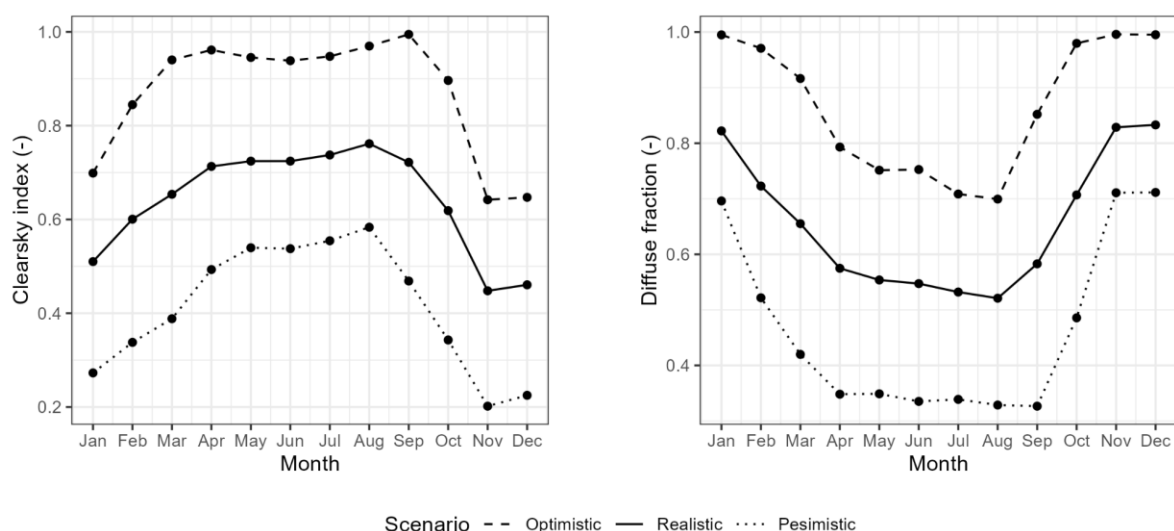
Krok 7: Agregace

Hodnoty POA ze všech 15minutových intervalů se sečtou za celý měsíc, čímž vznikne odhad **měsíční iradiace** [kWh/m²] pro každou buňku střechy.

Scénáře

Jsou definovány tři scénáře na základě statistického vyhodnocení variability měsíčních hodnot clearsky indexu a diffuse fraction (Obr 1):

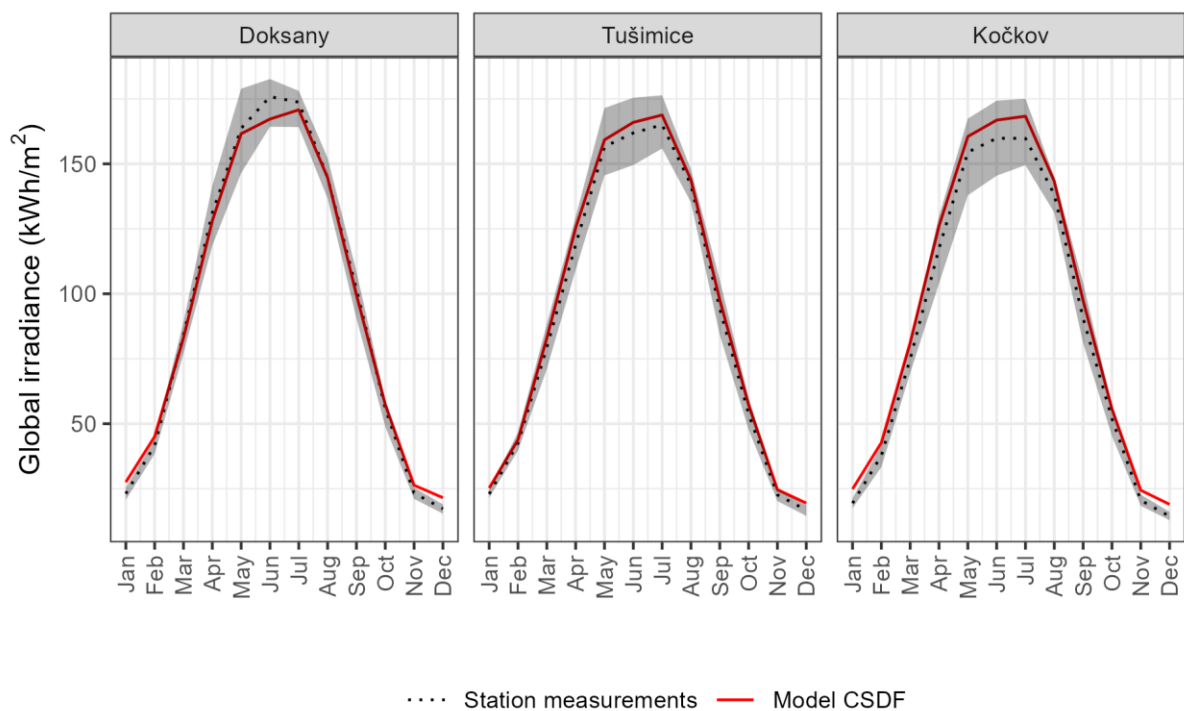
- **Realistický scénář:** Použití měsíčních průměrů parametrů
- **Optimistický scénář:** Použití hodnot horního kvartilu (Q3) - méně oblačnosti, větší podíl přímého záření
- **Pesimistický scénář:** Použití hodnot dolního kvartilu (Q1) - více oblačnosti, větší podíl difúzního záření



Obrázek 1. Parametry modelu CSDF pro tři scénáře: optimistický, realistický a pesimistický.

Validace

Model byl validován na stejných datech z meteorologických stanic. Validace byla provedena porovnáním modelovaného globálního záření (pro příslušnou geografickou lokaci stanice) s měsíčními průměry (zprůměrovanými napříč lety) staničních měření globálního záření na všech třech stanicích (Tušimice, Doksany, Kočkov). Shoda modelu s měřenými hodnotami byla porovnána vizuálně (Obr. 2) a pomocí metrik normalizované odmocniny střední kvadratické chyby (nRMSE) a relativní střední chyby (rME). Model CSDF vykazuje velmi dobrou shodu v predikci globálního záření (nRMSE = 5,1%; rME = 3,2 %).



Obrázek 2. Validace modelu CSDF pro globální záření.

Výstupní data

Pro každou buňku střechy (1×1 m) jsou vypočítány:

- Měsíční hodnoty iradiace [kWh/m²/měsíc] pro 12 měsíců a všechny tři scénáře (realistický, optimistický, pesimistický)
- Roční suma iradiace [kWh/m²/rok] pro realistický scénář

Softwarové nástroje a knihovny

- **pvlb-python:** Open-source knihovna pro modelování fotovoltaických systémů (Holmgren et al., 2018)
 - Clearsky modely, transpozice záření, solární geometrie
- **Vlastní implementace:**
 - Výpočet lokálního horizontu a Sky View Factor (C/Python)
 - Integrace meteorologických parametrů
 - Workflow management

Reference

- Holmgren, W. F., Hansen, C. W., & Mikofski, M. A. (2018). pvlib python: a python package for modeling solar energy systems. *Journal of Open Source Software*, 3(29), 884.
- Ineichen, P., & Perez, R. (2002). A new airmass independent formulation for the Linke turbidity coefficient. *Solar Energy*, 73(3), 151-157.
- Perez, R., Seals, R., Ineichen, P., Stewart, R., & Menicucci, D. (1987). A new simplified version of the Perez diffuse irradiance model for tilted surfaces. *Solar Energy*, 39(3), 221-231.

Poznámka: Výsledky představují modelový odhad solárního potenciálu založený na dostupných geodatech a klimatických parametrech. Skutečná produkce fotovoltaického systému závisí na řadě dalších faktorů včetně typu a účinnosti panelů, invertorů, orientace instalace a meziroční variabilitě počasí.