

**QUYOSH RADIATSIYASINI PYTHON DASTURLASH YORDAMIDA  
MODELLASHTIRISH VA EKSPERIMENTAL MA'LUMOTLAR BILAN  
TAQQOSLASH**

**Roziqov Jurabek Yuldashboy o'g'li, Ro'ziboyev Valijon Umarali o'g'li, Kamolova  
Muhabbat Muhiddin qizi, Ahmedova Shalola Yunusali qizi**

Farg'ona davlat universiteti, Murabbiylar ko'chasi 19,

E-mail: [roziqovjurabek1991@gmail.com](mailto:roziqovjurabek1991@gmail.com),

<https://doi.org/10.5281/zenodo.17865532>

**Annotatsiya:** Ushbu maqolada Yer yuzasiga yetib keladigan quyosh radiatsiyasi intensivligini uchta keng qo'llaniladigan "ochiq osmon" modellaridan foydalangan holda – ASHRAE 2001, Hottel (1976) va ASHRAE 2009 – kompleks sonli modellashtirish va tekshirish natijalari taqdim etiladi. Tadqiqotning maqsadi yil davomida ushbu modellar aniqligini baholash bo'lib, hisob-kitoblar Python va MATLAB dasturlash tillarida amalga oshirilgan. Har bir model yilning kuniga hamda qabul qiluvchi sirtning og'ish burchagiga bog'liq holda to'g'ridan-to'g'ri va tarqoq quyosh radiatsiyasi miqdorini hisoblashga tatbiq qilindi. Hisoblangan qiymatlar har bir modelning amaliyligini va cheklovlarini aniqlash maqsadida eksperimental ma'lumotlar bilan grafik tarzda taqqoslandi. Model aniqligini miqdoriy baholash uchun asosiy ko'rsatkichlar hisoblab chiqildi hamda natijalar ASHRAE 2001 modeli sinovdan o'tkazilgan modellar ichida eng yuqori moslikka ega ekanini ko'rsatdi. Ushbu tadqiqot quyosh energiyasi tizimlarini loyihalashni optimallashtirish, ma'lum iqlim sharoitlari uchun model tanlash hamda takrorlanuvchanlikni ta'minlash maqsadida ochiq manbali Python realizatsiyasini taqdim etadi.

**Kalit so'zlar:** Quyosh radiatsiyasi, ASHRAE modeli, Hottel modeli, sonli simulyatsiya, eksperimental taqqoslash, quyosh nurlanishi intensivligi

**MODELING SOLAR RADIATION USING PYTHON PROGRAMMING AND  
COMPARING IT WITH EXPERIMENTAL DATA**

**Abstract:** This paper presents a comprehensive numerical modeling and validation of solar radiation intensity at the Earth's surface using three established clear-sky models: ASHRAE 2001, Hottel (1976), and ASHRAE 2009. The purpose is to evaluate their accuracy over the course of a year, based on simulation results computed using Python and MATLAB environments. Each model is applied to compute direct and diffuse solar radiation as a function of the day of the year and the tilt angle of the receiving surface. The computed values are graphically compared with experimental data to assess each model's relevance and limitations. Key performance metrics (mean bias error, root mean square error, etc.) are calculated to quantify model accuracy, and the results indicate that the ASHRAE 2001 model shows the closest agreement with measurements among the models tested. This study contributes to the optimization of solar energy system design and model selection for specific climatic conditions, and provides an open-source Python implementation for reproducibility.

**Keywords:** Solar Radiation, ASHRAE Model, Hottel Model, Numerical Simulation, Experimental Comparison, Solar Insolation.

**МОДЕЛИРОВАНИЕ СОЛНЕЧНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ  
ПРОГРАММИРОВАНИЯ НА PYTHON И СРАВНЕНИЕ ЕГО С  
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМИ ДАННЫМИ**

**Аннотация:** В данной работе представлено комплексное численное моделирование и валидация интенсивности солнечного излучения на поверхности Земли с использованием трёх известных моделей для ясного неба: ASHRAE 2001, Hottel (1976) и ASHRAE 2009. Целью является оценка их точности в течение года на основе результатов моделирования, выполненных в средах Python и MATLAB. Каждая модель применяется для расчёта прямой и рассеянной солнечной радиации в зависимости от дня года и угла наклона принимающей поверхности. Рассчитанные значения графически сравниваются с экспериментальными данными для оценки релевантности и ограничений каждой модели. Для количественной оценки точности модели рассчитываются ключевые показатели эффективности (средняя ошибка смещения, среднеквадратическая ошибка и т. д.). Результаты показывают, что модель ASHRAE 2001 демонстрирует наиболее близкое соответствие результатам измерений среди протестированных моделей. Данное исследование способствует оптимизации проектирования солнечной энергетической системы и выбору модели для конкретных климатических условий, а также предоставляет реализацию на Python с открытым исходным кодом для воспроизводимости результатов.

**Ключевые слова:** Солнечное излучение, модель ASHRAE, модель Хоттеля, численное моделирование, экспериментальное сравнение, солнечная инсоляция.

## KIRISH

Quyosh radiatsiyasini modellashtirish qayta tiklanuvchi energiya tizimlarini loyihalash va binolarda iqlimga bog‘liq parametrlarni tahlil qilish uchun muhim hisoblanadi. Yer yuzasiga yetib keladigan quyosh radiatsiyasini baholash maqsadida ko‘plab empirik va yarim empirik modellar ishlab chiqilgan. Ular orasida ASHRAE 2001, ASHRAE 2009 hamda Hottel (1976) modeli muhandislik amaliyotida keng qo‘llaniladi. Ushbu maqolada mazkur modellar yil davomida quyosh radiatsiyasini baholash qilish qobiliyatiga urg‘u berilgan holda sonli realizatsiya va vizualizatsiya orqali tahlil qilinadi va taqqoslanadi.

Ushbu tadqiqotning asosiy maqsadlari quyidagilardan iborat:

- (1) ASHRAE 2001, Hottel (1976) va ASHRAE 2009 modellarini Python dasturlash tili orqali (MATLAB orqali tekshirish bilan birga) amalga oshirish;
- (2) bir yil davomida va bir nechta og‘ish burchaklari uchun soatlik va sutkalik to‘g‘ridan-to‘g‘ri hamda tarqoq nurlanishni hisoblash;
- (3) model natijalarini mos ravishda o‘lchangan eksperimental ma’lumotlar bilan taqqoslash;
- (4) model xatolarini miqdoriy baholash va ularning ehtimoliy fizik sabablarini muhokama qilish.

Ushbu maqola uch amaliy yo‘nalish bo‘yicha hissa qo‘shadi. Birinchidan, u Python ilmiy hisoblash muhitida uchta modelning shaffof va takrorlanuvchi realizatsiyasini taqdim etadi, bu boshqa tadqiqotchilar uchun foydalanish va yana sinovdan o‘tkazishni osonlashtiradi. Ikkinchidan, u tizimli og‘ishlarni tasodifiy og‘ishlardan ajratib ko‘rsatadigan va xato xarakterini ehtimoliy atmosfera sabablariga (masalan, bulutlar sababli tarqoq komponentning kuchayishi yoki aerazol hosil qilgan so‘nish) bog‘laydigan tizimli xato tahlilini taqdim etadi. Uchinchidan, maqola o‘rta kengliklardagi kontinental iqlim sharoitlari uchun model tanlash va oddiy tuzatish strategiyalari (masalan, empirik og‘ish tuzatishlari yoki yer sirtidan qaytgan komponentni kiritish) bo‘yicha amaliy tavsiyalarni taklif qiladi.

## MODELLASHTIRISH METODOLOGIYASI

Hozirgi kunda Yer yuzasiga yetib keladigan quyosh radiatsiyasini baholash uchun ko‘plab modellar mavjud. Ilmiy adabiyotlarda (masalan, [1], [2]) turli modellar tahlil qilingan va ularning imkoniyatlari hamda aniqlik darajalari o‘rganilgan. Ushbu modellar uchun umumiy xususiyat – quyosh doimiysi tushunchasidan foydalanishdir. Bu qiymat Yer atmosferasidan tashqarida, quyosh nurlariga perpendikulyar yo‘nalishda o‘lchanadigan radiatsiya oqimi intensivligini bildiradi va odatda  $1367 \text{ W/m}^2$  deb qabul qilinadi [3].

Yerning Quyosh atrofidagi orbitasi ellips shaklida bo‘lganligi sababli, atmosfera ustidagi quyosh radiatsiyasi yil davomida o‘zgarib turadi: qiymat yanvar boshlarida (Yer Quyoshga eng yaqin bo‘lganda) maksimal, iyul boshlarida (Yer eng uzoq bo‘lganda) minimal bo‘ladi. Quyosh radiatsiyasini atmosfera chegarasida baholash uchun bir necha empirik formulalar taklif qilingan, ulardan biri quyidagicha ifodalanadi:

$$E_0 = E_{sc} \cdot \left(1 + 0.033 \cos\left(\frac{360n}{365}\right)\right) \quad (1)$$

bu yerda  $n$  – yilning tegishli kuni (masalan, 1-yanvar, 1-fevral va hokazo).

Bundan tashqari, radiatsiya modellaridagi asosiy parametrlaridan biri nisbiy havo massasi  $m$  hisoblanadi. Bu kattalik quyosh nurlarining atmosfera orqali haqiqiy o‘tish uzunligining, Quyosh zenitda bo‘lgandagi o‘tish uzunligiga nisbati bilan aniqlanadi [4]:

$$m = 1 / \cos(\theta_z) \quad (2)$$

Bundan aniqroq bo‘lgan formulalar mavjud bo‘lib, ular qabul qiluvchi sirtning dengiz sathidan balandligi  $h$  ni ham hisobga oladi.

Yer yuzasidagi quyosh radiatsiyasi intensivligini baholash uchun turli modellar qo‘llanadi. Ushbu tadqiqot geografik joylashuvdan mustaqil, ko‘plab hisoblash tizimlarida (jumladan, ANSYS Fluent) keng qo‘llaniladigan modellarni tanlaydi: ASHRAE 2001, Hottel (1976) va ASHRAE 2009 [5–12].

### 2.1 Quyosh geometriyasi va atmosfera ustidan sirtga o‘tish

Atmosfera ustidagi radiatsiya (1) ni sirtga foydali kattaliklarga aylantirish uchun har bir vaqt nuqtasida quyidagi quyosh geometriyasi parametrlarini hisoblash talab etiladi:

Quyosh og‘ish burchagi (yaqinlashgan):

$$\delta \approx 23.45^\circ \sin\left(\frac{360^\circ}{365}(284 + n)\right) \quad (3)$$

Quyosh zenit burchagi (kenglik, og‘ish va soat burchagi orqali):

$$\cos\theta_z = \sin\phi \sin\delta + \cos\phi \cos\delta \cos\omega \quad (4)$$

Shundan so‘ng, atmosferadan tashqari gorizont tekislikka tushadigan nurlanish:

$$E_{\text{ex, goriz}} = E_{\text{ex}} \cos\theta_z \quad (\cos\theta_z > 0) \quad (5)$$

Bu kattaliklar yer usti irradiansining yuqori chegarasini belgilaydi va atmosfera orqali o‘tishdagi so‘nish hisoblari uchun boshlang‘ich qiymat vazifasini bajaradi.

### 2.2 Takomillashtirilgan havo massasi va bosim tuzatmasi

Zenit burchagi katta bo‘lganda yoki joy dengiz sathidan baland bo‘lganda, oddiy (2) formulasi o‘rniga Kasten – Young tipidagi tuzatma qo‘llanadi:

$$m_{K\&Y} = \frac{1}{\cos\theta_z + 0.50572 (96.07995^{0-\theta_z})^{-1.6364}} \quad (6)$$

Bosim tuzatmasi:

$$m' = m_{K\&Y} \cdot \frac{P}{P_0} \quad (7)$$

bu yerda  $P$  - lokal atmosfera bosimi,  $P_0$  - standart bosim ( $1013.25 \text{ hPa}$ ).

Havo massasini orqali tuzatish baland hududlarda atmosferaning optik so‘nishini ancha aniqlashtiradi.

### 2.3. Og‘ish burchagiga ega sirt uchun POA (plane-of-array) nurlanishi va tushish burchagi

Model natijalarini qiya sirtlarda (kollektorlar) o‘lchangan qiymatlar bilan taqqoslashda to‘g‘ridan-to‘g‘ri, tarqoq va yer sathidan qaytgan komponentlar yig‘indisi hisobga olinishi kerak. Quyosh nuri bilan kollektor normal orasidagi tushish burchagining kosinusi quyidagi formula orqali aniqlanadi

$$\begin{aligned} \cos\theta = \sin\delta \sin\phi \cos\beta - \sin\delta \cos\phi \sin\beta \cos\gamma + \cos\delta \cos\phi \cos\omega \cos\beta + \\ + \cos\delta \sin\phi \cos\omega \sin\beta \cos\gamma + \cos\delta \sin\omega \sin\beta \sin\gamma \end{aligned} \quad (8)$$

Qiya sirtga tushadigan **POA (plane-of-array) nurlanishi** quyidagi komponentlarning yig‘indisidan iborat:

1. Og‘ish burchagi bo‘yicha to‘g‘ridan-to‘g‘ri komponent:

$$DNI \cdot \cos\theta$$

2. Tarqoq komponent: izotrop model (osmon nurlanishi bir tekis tarqalgan deb olinadi), yoki anizotrop model (Hay–Davies, Perez va boshqalar)
3. Yerdan qaytgan komponent:  
Albedo×GHI×geometrik omil

**ASHRAE 2001 modeli:** Ushbu model quyosh radiatsiyasining to‘g‘ridan-to‘g‘ri ( $I_b$ ) va tarqoq ( $I_d$ ) komponentlarini alohida hisoblaydi. Modelning asosiy tenglamalari quyidagicha:

$$I_b = A \cdot \exp(-B / \sin(\theta_z)), \quad I_d = C \cdot F_{ss} \cdot I_b \quad (9)$$

bu yerda:

**A** — Yer atmosferasidan tashqaridagi quyosh radiatsiyasi intensivligi ( $E_0$ ),

**B** — atmosferaning so‘nish koeffitsienti,

**C** — tarqoq komponent koeffitsienti,

$F_{ss}$  — qabul qiluvchi sirtning og‘ish burchagiga bog‘liq omil.

$E_0$  quyidagicha aniqlanadi:

$$\begin{aligned} E_0 = 1.00011 + 0.034221\cos(\Gamma) + 0.00128\sin(\Gamma) + 0.000719\cos(2\Gamma) + \\ 0.000077\sin(2\Gamma), \end{aligned} \quad (10)$$

bu yerda:  $\Gamma = 2\pi(n-1)/365$  – yilning tegishli kuniga bog‘liq burchak.

Hottel modeli (1976) atmosferadan o‘tuvchi quyosh radiatsiyasining so‘nishini empirik koeffitsientlar asosida hisoblaydi. To‘g‘ridan-to‘g‘ri nurlanish quyidagi tenglama orqali aniqlanadi:

$$\begin{aligned} I_b = I_{ex} a_b \exp(-k_b m'), \quad I_d = I_{ex} a_d \exp(-k_d m'), \\ m' = m \cdot \frac{P}{P_0} = \frac{P/P_0}{\cos\theta_z}, \quad \tau_b = a_b e^{(-k_b m')}, \quad \tau_d = a_d e^{(-k_d m')}. \end{aligned} \quad (11)$$

Bu yerda:  $a_b$  va  $a_d$  — mos ravishda to‘g‘ridan-to‘g‘ri va tarqoq komponentlar uchun atmosfera shaffoflik koeffitsientlari,

$k_b$  va  $k_d$  — Hottelning empirik ifodalariga ko‘ra havo massasiga (va bilvosita zenit burchagiga) bog‘liq ko‘rsatkichlar.

( $a_b$ ,  $a_d$ ,  $k_b$ ,  $k_d$  uchun aniq tenglamalar matn ixchamligi sababli keltirilmagan.)

ASHRAE 2009 modeli to'g'ridan-to'g'ri va tarqoq nurlanishni quyidagi eksponensial tenglamalar asosida hisoblaydi:

$$I_{nb} = E_{sc} \cdot \exp(-\tau_b \cdot m^{ab}), \quad I_d = E_{sc} \cdot \exp(-\tau_d \cdot m^{ad}) \quad (12)$$

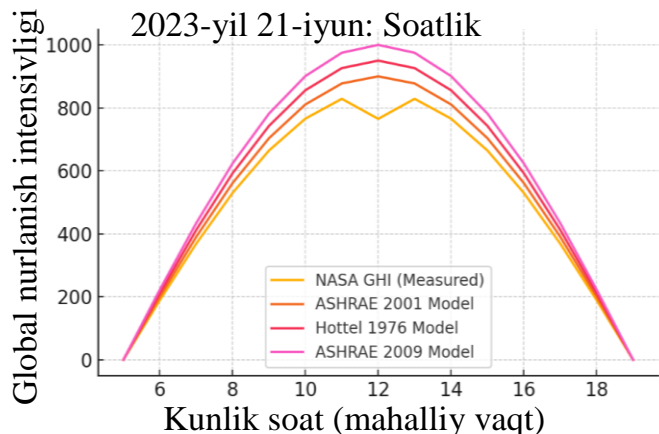
bu yerda  $a_b$  va  $a_d$  – empirik koeffitsientlar bo'lib, ular  $\tau_b$  va  $\tau_d$  ga bog'liq.

$$ab = 1,219 - 0,043\tau_b - 0,151\tau_d - 0,204\tau_b\tau_d \quad (13a)$$

$$ad = 0,202 - 0,852\tau_d - 0,007\tau_d - 0,357\tau_d\tau_b \quad (13b)$$

## NATIJAR VA MUHOKAMA

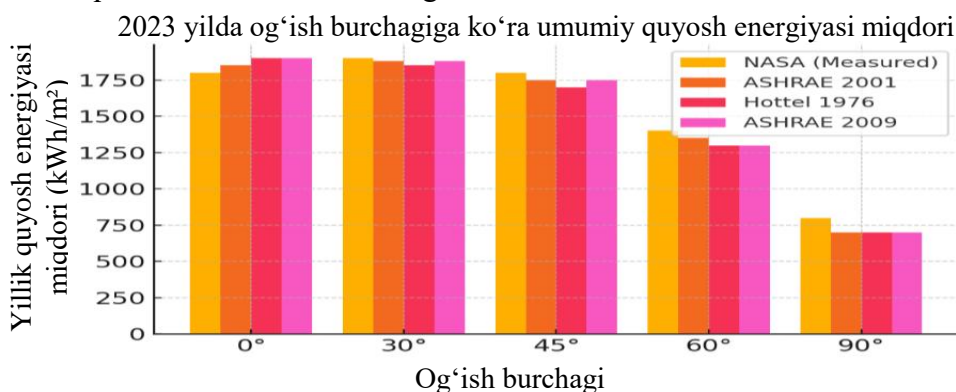
1-rasmda ko'rsatilganidek, kun davomida quyosh radiatsiyasining o'zgarishi modellar tomonidan hisoblangan qiymatlar va eksperimental o'lchovlar bilan taqqoslandi. Grafikdan yaqqol ko'rinadiki, ASHRAE 2001 modeli eksperimental qiymatlarga eng yaqin natijalarni beradi. ASHRAE 2009 va Hottel modellarida esa ayrim soatlarda sezilarli tafovutlar mavjud bo'lib, ular ushbu modellar tarkibidagi atmosferadagi yutilish koeffitsientlari va empirik tuzatmalarga bog'liq. Eksperimental egri chiziqda 11:00 dan 12:00 gacha bo'lgan oraliqda bulutlanish tufayli kichik pasayish kuzatiladi.



**1-rasm. Model (ASHRAE 2001, ASHRAE 2009, Hottel) va eksperimental ma'lumotlar bo'yicha quyosh radiatsiyasi intensivligining taqqoslanishi.**

Yillik insolyatsiya- yaning turli og'ish burchaklari (0°, 30°, 45°, 60°, 90°) bo'yicha qiya sirtlarda o'zgarishi ko'rsatilgan. Grafikda model qiymatlari, NASA ma'lumotlari va eksperimental o'lchovlar o'zaro taqqoslangan.

Bu tafovutlar, og'ish burchagi ortishi bilan tarqoq komponentni va yerdan qaytgan nurlanishni aniq modellashtirish muhimligini ko'rsatadi.



**2-rasm. 0°, 30°, 45°, 60°, 90° og'ish burchaklarida sirtlarga tushadigan yillik quyosh energiyasi miqdori.**

2-rasm yillik quyosh energiyasi (insolyatsiya) turli og'ish burchaklarida ( $0^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $90^\circ$ ) qiya sirtlarda hisoblangan. Model qiymatlari, NASA sun'iy yo'ldosh ma'lumotlari va eksperimental natijalar o'zaro taqqoslangan.

Natijalar quyidagicha: past og'ish ( $0^\circ$ ) uchun model qiymatlari biroz ortiqcha baholangan,  $30^\circ$ – $45^\circ$  burchaklarda moslash eng yaxshi,  $90^\circ$  ga yaqin bo'lgan sirtlar uchun modellar insolyatsiyani kam baholagan [13-20].

Bu esa og'ish ortqanda tarqoq nurlanish va yer sathidan qaytgan komponentni aniqlik bilan modellashtirish talab qilinishini ko'rsatadi.

### XULOSALAR

Tahlil qilingan model va eksperimental ma'lumotlar asosida ASHRAE 2001 modeli kunlik profil hamda yillik yig'indilar bo'yicha o'lgangan quyosh nurlanishi qiymatlariga eng yaqin moslikni ko'rsatdi. ASHRAE 2009 va Hottel (1976) modellarida esa ayrim soatlarda – ayniqsa tongda va kechga yaqin vaqtlar hamda bulutlanish sharoitida – sezilarli chetlanishlar kuzatildi. Modellar bilan o'lchovlar o'rtasidagi farqlar asosan quyidagi omillar bilan bog'liq: (a) tarqoq nurlanishni qayta ishlashda ufq yaqinidagi tarqoq komponentlarning inkor qilinishi, (b) atmosferadagi yutilishning parametrizatsiyasi (masalan, aerazol va suv bug'i ta'siri), (c) modellar tarkibida yer sathidan qaytgan nurlanish komponentining mavjud emasligi.

Ushbu ishda ishlab chiqilgan Python asosidagi realizatsiya (algoritmalar to'liq hujjatlashtirilgan va MATLAB bilan o'zaro tekshirilgan) boshqa tadqiqotchilar va muhandislarga hisob-kitoblarni turli joylashuvlar uchun takrorlash va moslashtirish imkonini beradi. Kod va ma'lumotlarning ommaga ochiq holda taqdim etilishi quyosh nurlanishi modellashtirish bo'yicha jamoaviy takomillashtirishni qo'llab-quvvatlashga xizmat qiladi.

Umuman olganda, tadqiqot shuni tasdiqlaydiki, nisbatan sodda empirik modellar to'g'ri parametrizatsiya qilingan va mahalliy o'lchovlar asosida tekshirilgan taqdirda amaliy muhandislik vazifalari uchun yetarlicha ishonchli bo'lishi mumkin. Yuqori aniqlik talab qilinadigan ilovalarda yoki atmosferasi murakkab hududlarda ushbu empirik modellarni mahalliy o'lchovlar bilan birlashtirish hamda tarqoq nurlanish va yer sathidan qaytish jarayonlarini yaxshiroq hisobga oluvchi yondashuvlarni qo'shish yanada ishonchli natijalar beradi.

### ADABIYOTLAR

1. Noorian, A.M., Moradi, I., & Kamali, G.A. (2008). Evaluation of 12 models to estimate hourly diffuse irradiation on inclined surfaces. *Renewable Energy*, 33(6), 1406–1412. DOI: 10.1016/j.renene.2007.06.027
2. Wong, L.T., & Chow, W.K. (2001). Solar radiation model. *Applied Energy*, 69(3), 191–224. DOI: 10.1016/S0306-2619(01)00012-5
3. ASHRAE (2009). *ASHRAE Handbook—Fundamentals*. Atlanta, GA: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. (Chapter on climatic design information, including solar constant value)
4. Duffie, J.A., & Beckman, W.A. (2013). *Solar Engineering of Thermal Processes* (4th ed.). John Wiley & Sons, New York. (Approximate air mass formula)
5. Gueymard, C.A. (2012). Clear-sky irradiance predictions for solar resource mapping and large-scale applications: Improved validation methodology and detailed performance analysis of 18 broadband models. *Solar Energy*, 86(8), 2145–2169. DOI: 10.1016/j.solener.2011.11.011
6. Guermoui, M., Rabehi, A., & Melgani, F. (2020). A comprehensive review of hybrid models for solar radiation forecasting. *Journal of Cleaner Production*, 258, 120357. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.120357

7. Bounoua, Z., Ouazzani Chahidi, L., & Mechaqrane, A. (2021). Estimation of daily global solar radiation using empirical and machine-learning methods: A case study of five Moroccan locations. *Sustainable Materials and Technologies*, 28, e00261. DOI: 10.1016/j.susmat.2021.e00261
8. ASHRAE (2001). *ASHRAE Handbook—Fundamentals*. Atlanta, GA: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. (Section on solar radiation models)
9. NASA Atmospheric Science Data Center (2021). *Surface meteorology and Solar Energy (SSE) – Solar Radiation Data*. (Accessed from <https://eosweb.larc.nasa.gov>)
10. Sobirov, M.M., Rozikov, J.Yu., Yusupova, D.A., & Ruziboev, V.U. (2023). Calculation of spectral and angular distribution of diffusely reflected, diffusely transmitted, and unscattered fluxes of solar radiation in atmospheric layers. *Applied Solar Energy*, 59(5), 761–769. DOI: 10.3103/S0003701X23601187
11. Hottel, H.C. (1976). A simple model for estimating the transmittance of direct solar radiation through clear atmospheres. In *Proceedings of the 1976 Annual Meeting of the American Section of the International Solar Energy Society*. (Empirical atmospheric transmission model)
12. Hay, J.E., & Davies, J.A. (1980). Calculation of the solar radiation incident on an inclined surface. *Proceedings of the IMechE*, 186(Part A), 25–32. DOI: 10.1243/PIME\_CONF\_1980\_186\_519\_02
13. Perez, R., Ineichen, P., Seals, R., Michalsky, J., & Stewart, R. (1990). Modeling diffuse irradiance on inclined surfaces: the Perez model. *Solar Energy*, 44(5), 271–289. DOI: 10.1016/0038-092X(90)90060-3
14. Kasten, F., & Young, A.T. (1989). Revised optical air mass tables and approximation formula. *Applied Optics*, 28(22), 4735–4738. DOI: 10.1364/AO.28.004735
15. Bird, R.E., & Hulstrom, R.L. (1981). A simplified clear sky model for direct and diffuse insolation on horizontal surfaces. *Solar Energy Research Institute Report*, Golden, CO (SERI/TR-642-761).
16. 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. DOI: 10.21105/joss.00884
17. Roca-Fernández, C., Pons, X., & Ninyerola, M. (2025). A comparison of different solar radiation models in the Iberian Peninsula. *Atmosphere*, 16(5), 590. DOI: 10.3390/atmos16050590
18. Yıldırım, H.B., Çelik, Ö., Teke, A., & Barutçu, B. (2018). Estimating daily global solar radiation with a graphical user interface in the eastern Mediterranean region of Turkey. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 1528–1537. DOI: 10.1016/j.rser.2017.06.030
19. Zaaoumi, A., Bah, A., Ciocan, M., Sebarchievici, C., Bălan, M.C., Mechaqrane, A., & Alaoui, M. (2021). Estimation of the energy production of a parabolic trough solar thermal power plant using analytical and artificial neural network models. *Renewable Energy*, 170, 620–638. DOI: 10.1016/j.renene.2021.01.129
20. Chanchangi, Y.N., Adeniji, A.A., Agbo, S.N., & Mallick, T. (2023). Nigeria's energy review: Focusing on solar energy potential and penetration. *Environment, Development and Sustainability*, 25(7), 5755–5796. DOI: 10.1007/s10668-022-02308-4