

## Increasing the Accuracy of Solar Radiation Interpolation Using Auxiliary Data Obtained from DEM in Cokriging

Navid Hooshagi<sup>1✉</sup>, Seyed Reza Ghafari Razin<sup>2</sup>, Mohamad Sajad Karimi<sup>3</sup>

1. Assistant Professor of Geospatial Information System (GIS), Department of Surveying Engineering, College of Earth Sciences Engineering, Arak University of Technology, Arak, Iran

✉E-mail: Hooshangi@arakut.ac.ir

2. Assistant Professor in Geodesy, Department of Surveying Engineering, College of Earth Sciences Engineering, Arak University of Technology, Arak, Iran

E-mail: Mr.ghafari@arakut.ac.ir

3. M.Sc of Surveying Engineering, College of Earth Sciences Engineering, Arak University of Technology, Arak, Iran

E-mail: Mskarimi1998@yahoo.com



**How to Cite:** Hooshagi, N; Ghafari Razin, S. R; & Karimi, M.S. (2022). Increasing the Accuracy of Solar Radiation Interpolation Using Auxiliary Data Obtained from DEM in Cokriging. *Geography and Development*, 20 (68), 215-237.

**DOI:** <http://dx.doi.org/10.22111/J10.22111.2022.7009>

### Received:

16 October 2021

### Received in revised form:

24 January 2022

### Accepted:

18 April 2022

### Published online:

25 August 2022

### Keywords:

Solar radiation,  
Geospatial information  
system (GIS),  
Spatial interpolation,  
Cokriging,  
Solar radiation tools.

### ABSTRACT

Accurate calculation of the amount of solar radiation in an area has an effective role in the climatology and agriculture of the region, estimating the rate of evapotranspiration, site selection of solar power plant and using photovoltaic systems. Point measurements at ground stations using pyranometers are the most accurate method of estimating solar radiation, in which measurements are extended to a continuous surface using spatial interpolation methods. The main purpose of this study is to increase the accuracy of solar radiation zoning in Iran using Cokriging method. For this purpose, the amount of solar radiation was first calculated using the Digital Elevation Model (DEM) and the Solar Radiation spatial toolbox in ArcGIS software. Then the correlation coefficient (R) between the obtained values from the software with the values of solar radiation measured at ground stations was calculated. According to  $R = 0.713$  between these two data, by Cokriging method, these two data were combined and the continuous surface of solar radiation for the whole of the country was calculated. The results showed that the calculation of solar radiation using Area Solar GIS tool is not accurate enough compared to ground data, but the combination of the two data, while affecting the topography in the calculation of solar radiation, increases the interpolation accuracy by 11%. Therefore, although existing models may not be accurate enough to estimate solar radiation on a national scale compared to terrestrial data, they can be used to improve the accuracy of terrestrial data zoning. According to the final map, most regions of the country, except the northern and northwestern regions, receive solar radiation above the global average ( $340 \text{ w/m}^2$ ).



© the Author(s).

Publisher: University of Sistan and Baluchestan

### Extended Abstract

#### 1. Introduction

Accurate calculation of solar radiation is the basis of many uses of solar energy, economic and environmental considerations (Zhou et al., 2021: 1) and plays an important role in many scientific fields such as ecological studies, agriculture, hydrology, architecture, and renewable energies (Hooshangi and Alesheikh, 2015: 198; Jeong et al., 2017:70; He et al.,

2020:1). Considering the geographical location of Iran and having continuous hours of receiving solar energy, it has many capabilities to receive this energy (Rezaei et al., 2016: 132; Momeni and Gholiyan, 2019: 68).

The methods presented for solar radiation calculation based on the use of effective factors are classified into four general categories (Feng et al., 2021:1):1. using

experimental models and atmospheric parameters, 2. using the machine learning approaches, 3. using satellite images, 4- measurement by pyranometers at different points on the surface of the earth. Each measurement method has advantages and disadvantages, and the method used in each research depends on the extent of the region, available information, and data. Finding a suitable and accurate method for calculating and zoning solar radiation is essential and important (Karaman et al., 2021: 1; Makade et al., 2020: 245; Zhou et al., 2021: 1). Among the existing methods, accurate land data zoning with interpolation methods are highly efficient due to their simplicity and appropriate scalability. The use of interpolation methods, due to the small number of ground stations as well as the extent of Iran's north to south, has faced problems in the zoning of solar radiation in the country (Hoshengi and Alisheikh, 2014: 188). For this purpose, using geostatistical interpolation methods with the ability to include auxiliary data can be a practical approach. Among the existing interpolation methods, the use of geostatistical Cokriging interpolation provides the possibility of combining data from different sources. The main core of

Cokriging interpolation is accurate ground data and other available data from the region can be included in this method as auxiliary data (Liao et al., 2011: 1247). Therefore, the main goal of this research is to increase the accuracy of solar radiation zoning in the country of Iran, which is done by using auxiliary data integration in the form of Cokriging method.

### 2. Methods and Material

This research is implemented in three main stages. In the first step, the amount of solar radiation is calculated using the Digital Elevation Model (DEM) and the Solar Radiation toolbox in the ArcGIS environment. In the second step, the correlation coefficient of the terrestrial values of solar radiation and the values obtained from the first step is calculated. In the third stage, according to the value of the obtained correlation coefficient, the ground values of solar radiation are combined with the Cokriging method and using the auxiliary data obtained in the first stage, and the continuous level of solar radiation is calculated for the whole country. The implementation of this research is based on Figure 1.

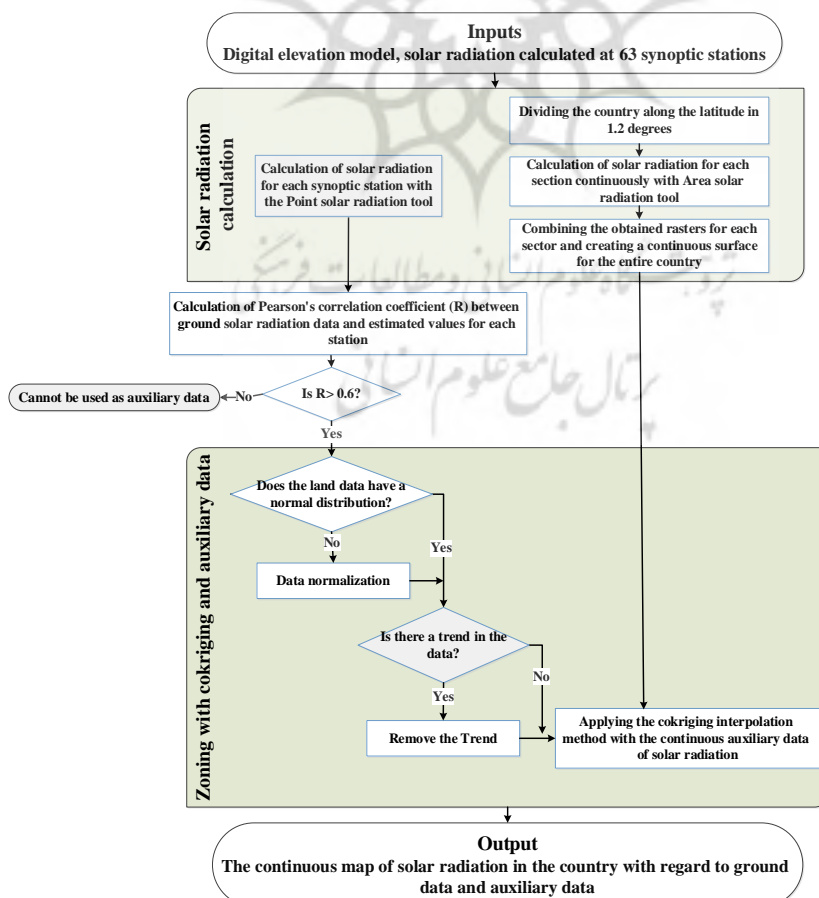


Figure 1: The flowchart of the research implementation view

### 3. Results and Discussion

For 2016, from January 1 to December 31, the output of the Point solar radiation function was calculated. The maximum amount of solar radiation recorded in ground stations is  $622 \text{ w/m}^2$  and the minimum amount is  $293 \text{ w/m}^2$ , which was recorded in the northern part of Bushehr province and Semnan province, respectively. Next, in order to calculate the correlation between two data sets (ground data and data extracted from Point solar radiation function), Pearson's test was used in SPSS Statistics 19.0 software. The correlation value calculated in our research is equal to 0.713, which is significant at the 0.01 level. Therefore, the output of the Point solar radiation function is suitable data for

use in Cokriging. At this stage, in order to calculate the continuous level of solar radiation, the DEM of Iran was divided into 1.2-degree sections, so that each section has a 0.2 intersect with its adjacent section. Therefore, a continuous surface was created for the area using the Area solar radiation function. ArcGIS software was used to perform the interpolation process. At first, interpolation was done without using auxiliary data, the output of which is shown in Figure 2-a. Next, Cokriging interpolation was done using the raster file obtained from the Area solar radiation function as auxiliary data. The surface created by the Cokriging method is shown in Figure 2-b.

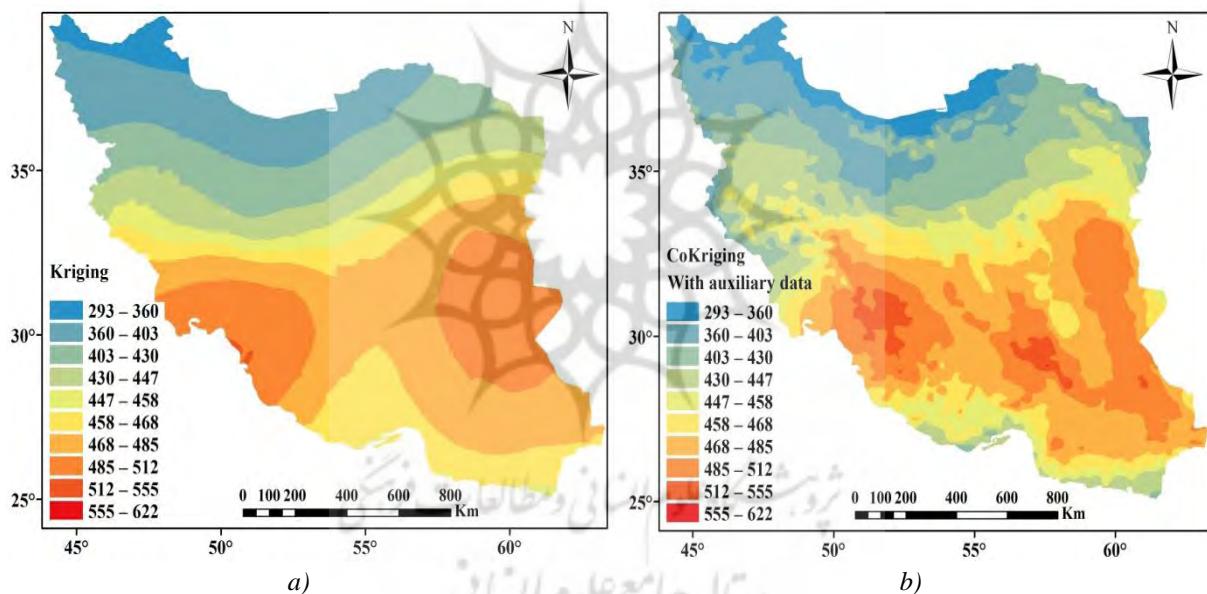


Figure 2: Zoning output with the Ordinary kriging method (OK): a) without using auxiliary data, b) using auxiliary data from the raster file resulting from the Area solar radiation function

The amount of error calculated in cross-validation in ground data interpolation without using auxiliary data is  $\text{RMSE}=32.2 \text{ w/m}^2$ . This error value in Cokriging using auxiliary data is equal to  $\text{RMSE} = 28.7 \text{ w/m}^2$ . By dividing the RMSE value by the total data (to descale the RMSE), the RRMSE value was calculated for both modes, which was 7.3% for kriging without auxiliary data and 6.5% for Cokriging, which is within the acceptable error range.

### 4. Conclusion

In this research, the Cokriging method and auxiliary data obtained from the Solar radiation toolbox in ArcGIS software were used to increase the accuracy of solar radiation zoning in Iran. The results of zoning using the Ordinary kriging method with auxiliary data showed that by using auxiliary data, the accuracy of the created surface is improved by 11% and reaches the  $\text{RMSE} = 28.7 \text{ w/m}^2$ , which is acceptable. The conducted research shows that the use of continuous auxiliary data obtained from ready-

made functions can increase the accuracy of solar radiation interpolation to an acceptable level. This auxiliary data can be obtained from various sources. Based on the output of this research, by using the Cokriging method, different data can be combined in the interpolation process in terms of the spatial correlation between the data to increase the accuracy of the interpolation. The final map for solar radiation showed that using the output of the Area solar radiation function allows the solar radiation map to include changes in the topography of the earth. The main advantage of using this surface function is that it gives continuous results in the region. Based on this map, it has been observed that the southern and central parts of the country (especially the areas

along the Zagros mountains) receive high solar radiation.

For future research, it is suggested that the output of solar radiation obtained from satellite images and the Angstrom model be combined with ground data using the Cokriging method. It is also recommended to check the proposed method in this research in urban areas with the digital surface model (DSM) and its output be used directly in measuring the potential of urban areas in terms of receiving solar energy and locating solar panels.

**Keywords:** Solar radiation, Geographic information system (GIS), Spatial interpolation, Cokriging, Solar radiation tools.

## 5. References

- Alamdari, P., Nematollahi, O. and Alemrajabi, A. A. (2013). Solar energy potentials in Iran: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 21, 778-788.  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032113000087>
- Babar, B., Graversen, R. and Boström, T. (2019). Solar radiation estimation at high latitudes: Assessment of the CMSAF databases, ASR and ERA5. *Solar Energy*, 182, 397-411.  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X19301847>
- Batlles, F. J., Bosch, J. L., Tovar-Pescador, J., Martínez-Durban, M., Ortega, R. and Miralles, I. (2008). Determination of atmospheric parameters to estimate global radiation in areas of complex topography: Generation of global irradiation map. *Energy Conversion and Management*, 49(2), 336-345.  
[http://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig\\_q=RN:39094064](http://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig_q=RN:39094064)
- Bellaoui, M., Bouchouicha, K. and Oulimar, I. (2021). Estimation of daily global solar radiation based on MODIS satellite measurements: The case study of Adrar region (Algeria). *Measurement*, 183, 109, 802.  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263224121007545>
- Chelbi, M., Gagnon, Y. and Waewsak, J. (2015). Solar radiation mapping using sunshine duration-based models and interpolation techniques: Application to Tunisia. *Energy Conversion and Management*, 101, 203-215.  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890415004069>
- Emmendorfer, L. R. and Dimuro, G. P. (2021). A point interpolation algorithm resulting from weighted linear regression. *Journal of Computational Science*, 50, 101304.  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877750321000053>
- Esri (2021). Area Solar Radiation [Online]. Environmental Systems Research Institute. Available: <https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.3/tools/spatial-analyst-toolbox/area-solar-radiation.htm>
- Feng, Y., Zhang, X., Jia, Y., Cui, N., Hao, W., Li, H. and Gong, D. (2021). High-resolution assessment of solar radiation and energy potential in China. *Energy Conversion and Management*, 240, 114265.  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890421004416>
- Gassar, A. a. A. and Cha, S. H. (2021). Review of geographic information systems-based rooftop solar photovoltaic potential estimation approaches at urban scales. *Applied Energy*, 291, 116817.  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261921003184>



- He, C., Liu, J., Xu, F., Zhang, T., Chen, S., Sun, Z., Zheng, W., Wang, R., He, L., Feng, H., Yu, Q. and He, J. (2020). Improving solar radiation estimation in China based on regional optimal combination of meteorological factors with machine learning methods. *Energy Conversion and Management*, 220, 113111. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890420306555>
- Hirooka, D., Murata, N., Fujimoto, Y. and Hayashi, Y. (2018). Temporal Interpolation of Gridded Solar Radiation Data for Evaluation of PV Fluctuations. *Energy Procedia*, 155, 259-268. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610218310063>
- Hooshangi, N. and Alesheikh, A. A. (2015). Evaluation of ANN, ANFIS and fuzzy systems in estimation of solar radiation in Iran. *Journal of Geomatics Science and Technology*, 4(3), 187-200. <http://jgst.issge.ir/article-1-109-fa.html>
- Hooshangi, N., AleSheikh, A. A. and Helali, H., (2015), Regional Assessment of Solar Radiation Potential by Evaluation and Optimization of Interpolation Methods in Iran, *Regional Planning*, 4(16), 1-16. [https://geoplanning.tabrizu.ac.ir/article\\_2217.html](https://geoplanning.tabrizu.ac.ir/article_2217.html)
- Jamil, B. and Bellos, E. (2019). Development of empirical models for estimation of global solar radiation exergy in India. *Journal of Cleaner Production*, 207, 1-16. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652618329858>
- Jeong, D. I., St-Hilaire, A., Gratton, Y., Bélanger, C. and Saad, C. (2017). A guideline to select an estimation model of daily global solar radiation between geostatistical interpolation and stochastic simulation approaches. *Renewable Energy*, 103, 70-80. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148116309855>
- Kamran, V. HK. (2014), Estimation of Potential Evapotranspiration with Estefnz Method and GIS Techniques in Eastern Azerbaijan, *Geography and Planning*, 18(49), 317-334. [https://geoplanning.tabrizu.ac.ir/article\\_2217.html](https://geoplanning.tabrizu.ac.ir/article_2217.html)
- Karaman, Ö. A., Tanyıldızı Ağır, T. and Arsel, İ. (2021). Estimation of solar radiation using modern methods. *Alexandria Engineering Journal*, 60(2), 2447-2455. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1110016820306979>
- Koo, C., Li, W., Cha, S. H. and Zhang, S. (2019). A novel estimation approach for the solar radiation potential with its complex spatial pattern via machine-learning techniques. *Renewable Energy*, 133, 575-592. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148118312503>
- Liao, K.-H., Xu, S.-H., Wu, J.-C., Ji, S.-H. and Lin, Q. (2011). Cokriging of Soil Cation Exchange Capacity Using the First Principal Component Derived from Soil Physico-Chemical Properties. *Agricultural Sciences in China*, 10(8), 1246-1253. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1671292711601168>
- Loghmani, I., Timoumi, Y. and Messadi, A. (2018). Performance comparison of two global solar radiation models for spatial interpolation purposes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 837-844. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032117313448>
- Makade, R. G., Chakrabarti, S., Jamil, B. and Sakhale, C. N. (2020). Estimation of global solar radiation for the tropical wet climatic region of India: A theory of experimentation approach. *Renewable Energy*, 146, 2044-2059. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148119312418>
- Momeni, H. and Gholiyan H. M. (2019). The policy of using solar radiation energy in the distribution of geographical areas Using ArcGIS applications. *Geography and Human Relationships*, 3 (2), 61-84. [https://www.gahr.ir/article\\_114593.html?lang=en](https://www.gahr.ir/article_114593.html?lang=en)
- Naserpour, S., Zolfaghari, H. and Zeaiean Firouzabadi, P. (2020). Calibration and evaluation of sunshine-based empirical models for estimating daily solar radiation in Iran. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 42, 100855. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2213138820312820>

- Núñez-Reyes, A. and Ruiz-Moreno, S. (2020). Spatial Estimation of Solar Radiation Using Geostatistics and Machine Learning Techniques. *IFAC-PapersOnLine*, 53(2), 3216-3222.  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405896320314683>
- Pardo-Igúzquiza, E., Chica-Olmo, M., Luque-Espinar, J. A. and Rodríguez-Galiano, V. (2015). Compositional cokriging for mapping the probability risk of groundwater contamination by nitrates. *Science of The Total Environment*, 532, 162-175.  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969715302023>
- Piedallu, C. and Gégout, J.-C. (2008). Efficient assessment of topographic solar radiation to improve plant distribution models. *Agricultural and Forest Meteorology*, 148(11), 1696-1706.  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168192308001767>
- Rezaei, M., Mohammad, H., Hatefi, A. and Graduated, M. (2016). Assessment of energy supply for photovoltaic systems based on solar energy analyst function (area: highway Zanjan – Tabriz). *mdrsjrns*, 20(3), 131-155.  
<http://hsmmsp.modares.ac.ir/article-21-10474-fa.html>
- Saraskanroud, S. A. and Belvasi, I. (2020). The feasibility of utilizing solar energy using remote sensing and SEBAL algorithm Case study: Alshar County, *Scientific - Research Quarterly of Geographical Data (SEPEHR)*, 29(113), 169-184.  
[http://www.sepehr.org/article\\_40478.html](http://www.sepehr.org/article_40478.html)
- Shboul, B., Al-Arfi, I., Michailos, S., Ingham, D., Ma, L., Hughes, K. J. and Pourkashanian, M. (2021). A new ANN model for hourly solar radiation and wind speed prediction: A case study over the north & south of the Arabian Peninsula. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 46, 101248.  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2213138821002587>
- Zandei, R., safaei, M. J. and khosravian, M. (2020), Potentiometric Analysis of Solar Energy in Rural Areas (Case Study: Sabzevar city), *Geography and Development*, 17(57), 69-94.  
[https://gdij.usb.ac.ir/article\\_4983.html](https://gdij.usb.ac.ir/article_4983.html)
- Zhou, Y., Liu, Y., Wang, D., Liu, X. and Wang, Y. (2021). A review on global solar radiation prediction with machine learning models in a comprehensive perspective. *Energy Conversion and Management*, 235, 113960.  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890421001369>
- Zou, L., Wang, L., Lin, A., Zhu, H., Peng, Y. and Zhao, Z. (2016). Estimation of global solar radiation using an artificial neural network based on an interpolation technique in southeast China. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 146, 110-122.  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364682616301390>



## افزایش دقت پهنه‌بندی تابش خورشیدی با تلفیق داده‌ها در روش کوکریجینگ

دکتر نوید هوشنگی<sup>۱\*</sup>، دکتر سیدرضا غفاری رزین<sup>۲</sup>، محمد سجاد کریمی<sup>۳</sup>

### مقاله پژوهشی

#### چکیده

محاسبه دقیق مقدار تابش خورشیدی در یک گستره مکانی، نقش مؤثری در اقلیم‌شناسی و کشاورزی منطقه، برآورد میزان تبخیر و تعرق، مکان‌یابی نیروگاه خورشیدی و به‌کارگیری سیستم‌های فتوولتائیک دارد. دقیق‌ترین روش برآورد تابش خورشیدی برداشت نقطه‌ای در ایستگاه‌های زمینی با استفاده از دستگاه‌های آفتاب‌نگار است که در آن اندازه‌گیری‌ها با استفاده از روش‌های درون‌یابی به یک سطح پیوسته تعمیم داده می‌شوند. هدف اصلی این تحقیق افزایش دقت پهنه‌بندی تابش خورشیدی در گستره کشور ایران در قالب روش کوکریجینگ است. بدین منظور ابتدا میزان تابش خورشیدی با استفاده از مدل ارتفاع رقومی (DEM) و ابزار مکانی Solar Radiation در نرم‌افزار ArcGIS محاسبه شد. در ادامه ضریب همبستگی (R) بین مقادیر به‌دست‌آمده از نرم‌افزار با مقادیر تابش خورشیدی اندازه‌گیری‌شده در ایستگاه‌های زمینی محاسبه شد. با توجه به  $R=0.713$  بین این دو داده، با روش کوکریجینگ داده‌ها با هم تلفیق شده و سطح پیوسته تابش خورشیدی برای کل کشور محاسبه شد. نتایج نشان داد که محاسبه تابش خورشیدی با استفاده از ابزار Area Solar GIS در مقایسه با داده‌های زمینی دقت کافی ندارند؛ ولی تلفیق این دو داده ضمن تأیید دادن توپوگرافی در محاسبه تابش خورشیدی، موجب افزایش دقت درون‌یابی به اندازه ۱۱ درصد می‌شود؛ از این رو ممکن است مدل‌های موجود برای برآورد تابش خورشیدی در مقایسه با داده‌های زمینی در مقیاس کشوری دقت کافی را نداشته باشند، اما می‌توان از آن‌ها برای بهبود دقت درون‌یابی داده‌های زمینی استفاده کرد. براساس نقشه نهایی اکثر مناطق کشور به غیر از مناطق شمالی و شمال‌غربی بالاتر از متوسط جهانی ( $340 \text{ w/m}^2$ ) تابش خورشیدی دریافت می‌کنند.

جغرافیا و توسعه، شماره ۶۸، پاییز ۱۴۰۱  
تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۷/۲۴  
تاریخ بازنگری داوری: ۱۴۰۰/۱۱/۰۴  
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۱/۲۹  
صفحات: ۲۳۷-۲۱۵



واژه‌های کلیدی:  
تابش خورشیدی، سیستم اطلاعات مکانی (GIS)، درون‌یابی مکانی، کوکریجینگ، ابزار Solar Radiation

#### مقدمه

کشور ایران به دلیل موقعیت جغرافیایی مناسب و دارا بودن ساعت‌های مستمر دریافت انرژی خورشیدی از قابلیت‌های زیادی برای دریافت این انرژی برخوردار است (Rezaei et al., 2016: 132) مؤمنی و محمدقلیان، ۱۳۹۹: ۶۸؛ از این رو محاسبه و اطلاع دقیق از شدت تابش خورشیدی موجب کاربردی‌شدن استفاده از این منبع تجدیدپذیر انرژی و کاهش عدم قطعیت تصمیم‌گیری برای سرمایه‌گذاری در این زمینه می‌شود (Loghmari et al., 2018: 837). توسعه کاربردی این منابع انرژی، بررسی تأثیرپذیری کشاورزی و هیدرولوژی منطقه، ضرورت پایش مستمر و پهنه‌بندی تابش خورشیدی را نشان می‌دهد (زندى و همکاران، ۱۳۹۸: ۶۹).

محاسبه دقیق میزان تابش خورشیدی اساس بسیاری از استفاده‌های انرژی خورشیدی، ملاحظات اقتصادی و زیست‌محیطی بوده (Zhou et al., 2021: 1) و در شاخه‌های متعدد علمی همچون مطالعات اکولوژیکی، کشاورزی، هیدرولوژی، معماری و انرژی‌های تجدیدپذیر نقش بسزایی دارد (Hooshangi and Alesheikh, 2015: 198; Jeong et al., 2017: 70; He et al., 2020: 1). پتانسیل تابش خورشیدی تأثیرگذارترین داده‌ها در مکان‌یابی نیروگاه‌های خورشیدی بوده و عموماً در فرایند تصمیم‌گیری برای احداث نیروگاه بیشترین وزن را به خود اختصاص می‌دهد (Feng et al., 2021: 1; Koo et al., 2019: 1).

## مبانی نظری و پیشینه تحقیق

از آنجاکه میزان تابش خورشیدی پیوسته تغییر می‌کند و اندازه‌گیری مستقیم در همه مناطق قابل انجام نیست، به دست آوردن مقدار دقیق تابش خورشیدی اغلب دشوار یا غیرممکن است (Emmendorfer and Zou et al., 2016: 2; Dimuro, 2021: 1). فقدان داده‌های مترآکم از منطقه موجب شکل‌گیری روش‌های مختلفی شده تا با استفاده از سایر عوامل دخیل در میزان تابش خورشیدی مقدار آن محاسبه شود (Chelbi et al., 2015: 203). عوامل متعددی در برآورد تابش خورشیدی مؤثر هستند، از جمله این موارد می‌توان به ساعات آفتابی، رطوبت نسبی، میزان ابرناکی (Jamil and Bellos, 2019: 2)، عرض جغرافیایی، دمای خاک (مؤمنی و محمدقلیان، ۱۳۹۹: ۸۰)، ارتفاع و دمای محیط (هوشنگی و همکاران، ۱۳۹۳: ۹)، شیب، جهت، آلودگی هوا (Zhou et al., 2021: 5)، میزان بارش باران (Babar et al., 2019: 397) اشاره کرد. روش‌های ارائه شده برای محاسبه مقدار تابش خورشیدی براساس نحوه استفاده از عوامل مؤثر در چهار دسته کلی قرار می‌گیرند (Feng et al., 2021: 1):

- ۱- استفاده از مدل‌های تجربی و پارامترهای جوی،
- ۲- استفاده از رویکردهای یادگیری ماشین،
- ۳- محاسبه با استفاده از داده‌ها و تصاویر ماهواره‌ای،
- ۴- اندازه‌گیری با دستگاه‌های آفتاب‌نگار در نقاط مختلف روی سطح زمین.

مدل‌های رایج تجربی مانند آنگستروم و کیمبال<sup>۱</sup> مقدار تابش خورشیدی را با استفاده از یک رابطه خطی بین تابش خورشیدی و عناصر اقلیمی مانند ارتفاع، عرض جغرافیایی و ساعات آفتابی محاسبه می‌کنند (Feng et al., 2021: 2; He et al., 2020: 2). مدل‌های تجربی از ساده‌ترین و کم‌هزینه‌ترین روش‌های برآورد تابش خورشیدی هستند؛ اما به دلیل استفاده از سایر داده‌ها، عموماً دقت پایینی دارند و برای گستره

کشور با خطا روبه‌رو می‌شوند (Hooshangi and Alesheikh, 2015: 189; Zhou et al., 2021: 1). دسته دوم از روش‌های تخمین تابش خورشیدی استفاده از رویکردهای یادگیری ماشین مانند روش‌های فازی، شبکه عصبی، فازی-عصبی (Shboul et al., 2021: 1) و ماشین بردار پشتیبان (He et al., 2020: 2) است. در این رویکرد، برخلاف مدل‌های تجربی، از مدل‌های غیرخطی پیچیده‌تری برای برقراری ارتباط بین تابش خورشیدی و عوامل دخیل استفاده می‌شود (Zhou et al., 2021: 1). خروجی رویکردهای یادگیری ماشین کاملاً وابسته به دقت داده‌های ورودی بوده (Feng et al., 2021: 2) و ارتباطات مکانی بین داده‌ها مانند همبستگی مکانی<sup>۲</sup> در آن‌ها لحاظ نمی‌شود. استفاده از تصاویر ماهواره‌ای از دیگر روش‌های رایج محاسبه تابش خورشیدی است که دقت قابل توجهی در این حوزه داشته و امکان محاسبات سری‌های زمانی از تابش خورشیدی را فراهم می‌کند. این رویکرد جایگزین مناسبی برای روش‌های تجربی و قدیمی به‌ویژه در مناطقی است که دسترسی به داده‌های زمینی وجود ندارد (Rezaei et al., 2016: 132). اصغری سراسکانرود و بلوایی (۱۳۹۹: ۱۷۰). اندازه‌گیری تابش خورشیدی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای مانند لندست (اصغری سراسکانرود و بلوایی، ۱۳۹۹: ۱۶۹) و مادیس (Bellaoui et al., 2021: 1) به صورت روزانه و در بهترین حالت ۱۲ ساعت یک‌بار است. گرفتن تابش خورشیدی از طریق تصاویر ماهواره‌ای دقت قابل قبولی ارائه می‌دهند (البته کمتر از دقت داده‌های زمینی (Babar et al., 2019: 398)، اما عدم دسترسی به تصاویر یک منطقه در هر زمان دلخواه، فاصله زمانی بین گرفتن تصویر و استخراج میزان تابش خورشیدی (زمان بر بودن فرایند) و پرهزینه بودن تصاویر ماهواره‌های زمین مرجع (Makade et al., 2020: 2045) باعث شده این رویکرد با خطاهایی همراه بوده است و در محدوده‌ها و شرایط خاصی کاربرد



جنوبی کشور ایران پهنه‌بندی تابش خورشیدی در سطح کشور را با مشکلاتی روبه‌رو می‌کند (Hooshangi and Alesheikh, 2015: 188). بدین منظور استفاده از روش‌های درون‌یابی زمین‌آماری با قابلیت لحاظ داده‌های کمکی و همچنین یافتن داده‌های کمکی مناسب می‌تواند رویکردی کاربردی باشد.

روش‌های مختلفی برای درون‌یابی داده‌های زمینی تابش خورشیدی استفاده شده که می‌توان به روش وزن‌دهی معکوس فاصله (IDW)، تابع پایه شعاعی، درون‌یابی پخشی و کریجینگ در گستره کشور ایران (هوشنگی و همکاران، ۱۳۹۳: ۶)، روش IDW در گستره کشور چین (Feng et al., 2021: 4)، روش IDW و اسپیلاین در گستره کشور تونس (Chelbi et al., 2015: 203; Loghmari et al., 2018: 837) روش IDW توسعه‌یافته در بخشی از آمازون (Emmendorfer & Dimuro, 2021: 1) اشاره کرد. در بین روش‌های درون‌یابی موجود، استفاده از روش درون‌یابی زمین‌آماری کوکریجینگ امکان تلفیق داده‌ها از منشأهای مختلف را فراهم کرده و خروجی آن یک سطح پیوسته با در نظر گرفتن اطلاعات مختلف و روابط مکانی آن‌هاست. هسته اصلی درون‌یابی کوکریجینگ داده‌های دقیق زمینی بوده و سایر داده‌های موجود از منطقه می‌توانند به صورت داده‌های کمکی وارد این روش شوند (Liao et al., 2011: 1247). قابلیت روش کوکریجینگ در مطالعات و پدیده‌های مختلفی از جمله مدل‌سازی مکانی آلودگی آب‌های زیرزمینی (Pardo-Igúzquiza et al., 2015: 162) و پهنه‌بندی آلودگی خاک (Liao et al., 2011: 1246) بررسی و پیشنهاد شده است. در زمینه تابش خورشیدی نیز در تحقیقات محدودی از جمله برای پهنه‌بندی در گستره کشور با داده‌های کمکی دما، ارتفاع استفاده شده است (هوشنگی و همکاران، ۱۳۹۳: ۱) که در آن داده‌های ورودی به صورت نقطه‌ای بوده و یک سطح پیوسته به‌عنوان داده‌های کمکی استفاده نشده است.

داشته باشد (Babar et al., 2019: 398; Feng et al., 2021: 2). دسته چهارم روش‌های تخمین تابش خورشیدی در یک منطقه، اندازه‌گیری در ایستگاه زمینی با استفاده از پیرانومتر<sup>۱</sup>، سولارمتر<sup>۲</sup> یا پیرو هلیومتر<sup>۳</sup> است (Karaman et al., 2021: 2447). بعد از اندازه‌گیری تابش خورشیدی در هر ایستگاه به صورت نقطه‌ای، با استفاده از روش‌های زمین‌آماری سطح پیوسته از مقادیر تابش خورشیدی ایجاد می‌شود (Jeong et al., 2017: 70). استفاده از داده‌های زمینی و روش‌های درون‌یابی زمین‌آماری در محاسبه تابش خورشیدی از روش‌های پرکاربرد و دقیق، اما پرهزینه است (Emmendorfer and Dimuro, 2021: 2; Karaman et al., 2021: 2447). تکنیک‌های پیچیده اندازه‌گیری و پرهزینه‌بودن احداث ایستگاه‌های زمینی عموماً مانع از افزایش تعداد ایستگاه‌ها می‌شود (Koo et al., 2019: 1). اصغری سراسکانرود و بلواسی، ۱۳۹۹: ۱۷۰). در این رویکرد پهنه‌بندی دقیق نقش بالایی در تخمین مقدار تابش خورشیدی پیدا می‌کنند؛ زیرا با پهنه‌بندی مناسب می‌توان دقت سطح پیوسته‌نمایی را افزایش داد (هوشنگی و همکاران، ۱۳۹۳: ۳).

براساس موارد بیان‌شده هر کدام از روش‌های اندازه‌گیری مزایا و معایبی دارند و روش استفاده‌شده در هر تحقیق به گستره منطقه، اطلاعات و داده‌های در دسترس بستگی داشته است. یافتن روشی مناسب و دقیق برای محاسبه و پهنه‌بندی تابش خورشیدی اساسی و مهم است (Karaman et al., 2021: 1; Makade et al., 2020: 245; Zhou et al., 2021: 1). در بین روش‌های موجود، پهنه‌بندی داده‌های دقیق زمینی با روش‌های درون‌یابی به دلیل سادگی و مقیاس‌پذیری مناسب<sup>۴</sup> از کارایی بالایی برخوردار هستند. استفاده از روش‌های درون‌یابی با وجود تعداد کم ایستگاه‌های زمینی و همچنین گستردگی شمالی

1. Pyranometer
2. Solarimeter
3. Pyroheliometer

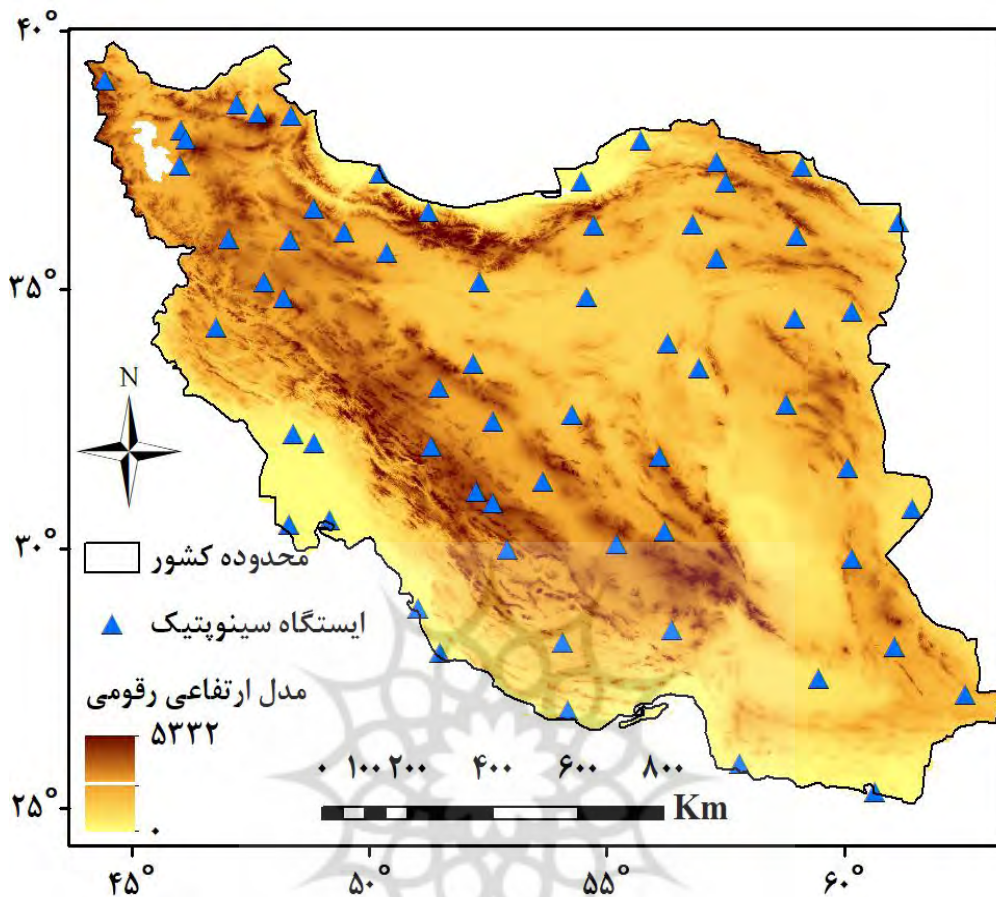
۴. منظور قابل پیاده‌سازی در مناطق مطالعاتی با وسعت‌های مختلف

گستره کشور ایران است که با استفاده از تلفیق داده کمکی در قالب روش کوکریجینگ انجام می‌شود. بدین منظور ابتدا مقدار تابش خورشیدی با استفاده از ابزار محاسبه تابش خورشیدی Solar radiation در نرم افزار ArcGIS محاسبه و دقت حاصل بررسی می‌شود. در ادامه با بررسی رابطه بین داده‌های زمینی و خروجی حاصل از مدل موجود، از سطح ایجاد شده برای افزایش دقت پهنه‌بندی تابش خورشیدی استفاده می‌شود. نوآوری این تحقیق استفاده از خروجی پیوسته مدل Solar radiation به‌عنوان داده کمکی در روش درون‌یابی کوکریجینگ است.

#### منطقه مطالعاتی و داده‌های استفاده‌شده

کشور ایران فلاتی با مساحت ۱،۶۴۸،۱۹۵ کیلومتر مربع با ارتفاع متوسط ۱۲۰۰ متر از سطح دریاست که ارتفاع برخی از چین‌خوردگی‌های آن از ۴۰۰۰ متر بیشتر است. مدل ارتفاعی رقومی (DEM) کشور در شکل ۱ نمایش داده شده است که پستی و بلندهای کشور را نمایش می‌دهد. مطابق با آمار هواشناسی ایران و با توجه به میزان تابش خورشیدی، شهرهای بزرگ و کوچک ایران به‌طور متوسط از ۲۵۰ تا ۲۹۱ روز آفتابی در سال برخوردار هستند که این امر بیانگر پتانسیل بسیار بالای انرژی خورشید در کشور است (مؤمنی و محمدقلیان، ۱۳۹۹: ۶۹). شدت تابش خورشیدی در ایران حدود ۱۸۰۰ تا ۲۲۰۰ کیلووات ساعت بر مترمربع در سال برآورد می‌شود که بیشتر از میانگین جهانی است (Alamdari et al., 2013: 779). با این حال، به دلیل گستردگی وسیع عرض جغرافیایی و ویژگی‌های ابری، تغییرات مکانی بزرگی در مقدار تابش خورشیدی در سراسر کشور مشاهده می‌شود (Naserpour et al., 2020: 2). برآورد دقیق میزان تابش خورشیدی و استفاده از پتانسیل‌های ذاتی مانند انرژی‌های تجدیدپذیر می‌تواند راهکاری سالم و پرسود برای تأمین انرژی در کشور ایران باشد.

انتخاب داده کمکی (داده‌ای که با تابش خورشیدی همبستگی دارد) نقش بسزایی در افزایش دقت روش کوکریجینگ دارد (Pardo-Igúzquiza et al., 2015: 173). استفاده از خروجی نرم‌افزارهای موجود در زمینه تخمین تابش خورشیدی می‌تواند یک داده کمکی مناسب برای کوکریجینگ باشد. پیشرفت‌های صورت گرفته در زمینه سیستم اطلاعات مکانی<sup>۱</sup> (GIS) در سال‌های گذشته و استفاده از توپوگرافی و مدل ارتفاع رقومی<sup>۲</sup> (DEM) در محاسبات تابش خورشیدی موجب شکل‌گیری ابزارهای مکانی در برآورد تابش خورشیدی شده است (Rezaei et al., 2016: 131; Gassar and Cha, 2021: 5). تأثیر توپوگرافی بر تابش خورشیدی در تحقیقات اولیه نیز مشخص شده بود؛ اما در مدل‌های اولیه برآورد تابش خورشیدی، تأثیر آن کمتر مورد توجه قرار گرفته بود (Rezaei et al., 2016: 134). ابزار محاسبه تابش خورشیدی Solar Radiation در نرم‌افزار ArcGIS یکی از ابزارهای مبتنی بر DEM برای برآورد تابش خورشیدی است. از این ابزار در منطقه آذربایجان شرقی (ولیزاده کامران، ۱۳۹۳: ۳۱۷)، بزرگراه زنجان-تبریز (Rezaei et al., 2016: 131) و همچنین تحقیقات مختلفی برای برآورد تابش خورشیدی در مناطقی با توپوگرافی متفاوت به‌صورت ماهانه استفاده شده است (Batlles et al., 2008: 336; Piedallu and Gégout, 2008: 1996). در تحقیقات پیشین روش‌های تخمین تابش خورشیدی به‌صورت جداگانه بررسی شده و تلفیق داده‌های زمینی و سایر مدل‌های تخمین تابش خورشیدی کمتر مورد توجه قرار گرفته است. از طرفی، در تحقیقاتی که از توابع آماده نرم‌افزاری برای محاسبه تابش خورشیدی استفاده شده، بیشتر هدف بررسی دقت خروجی بوده است و تلفیق داده‌های زمینی و خروجی آن‌ها در قالب روش کوکریجینگ با لحاظ همبستگی مکانی بین داده‌ها صورت نگرفته است؛ از این رو هدف اصلی این تحقیق افزایش دقت پهنه‌بندی تابش خورشیدی در



شکل ۱: منطقه مطالعاتی

تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۴۰۰

در این تحقیق از نقشه رستری DEM کشور ایران و داده‌های ۶۳ ایستگاه سینوپتیک که مقدار تابش خورشیدی را در سال ۲۰۱۶ به صورت ساعتی اندازه‌گیری کردند، استفاده شده است. مدل ارتفاعی رقومی استفاده شده با موزاییک کردن تصاویر توپوگرافی راداری شاتل ناسا<sup>۱</sup> (SRTM) با تفکیک مکانی ۳۰ متر ایجاد شده است.

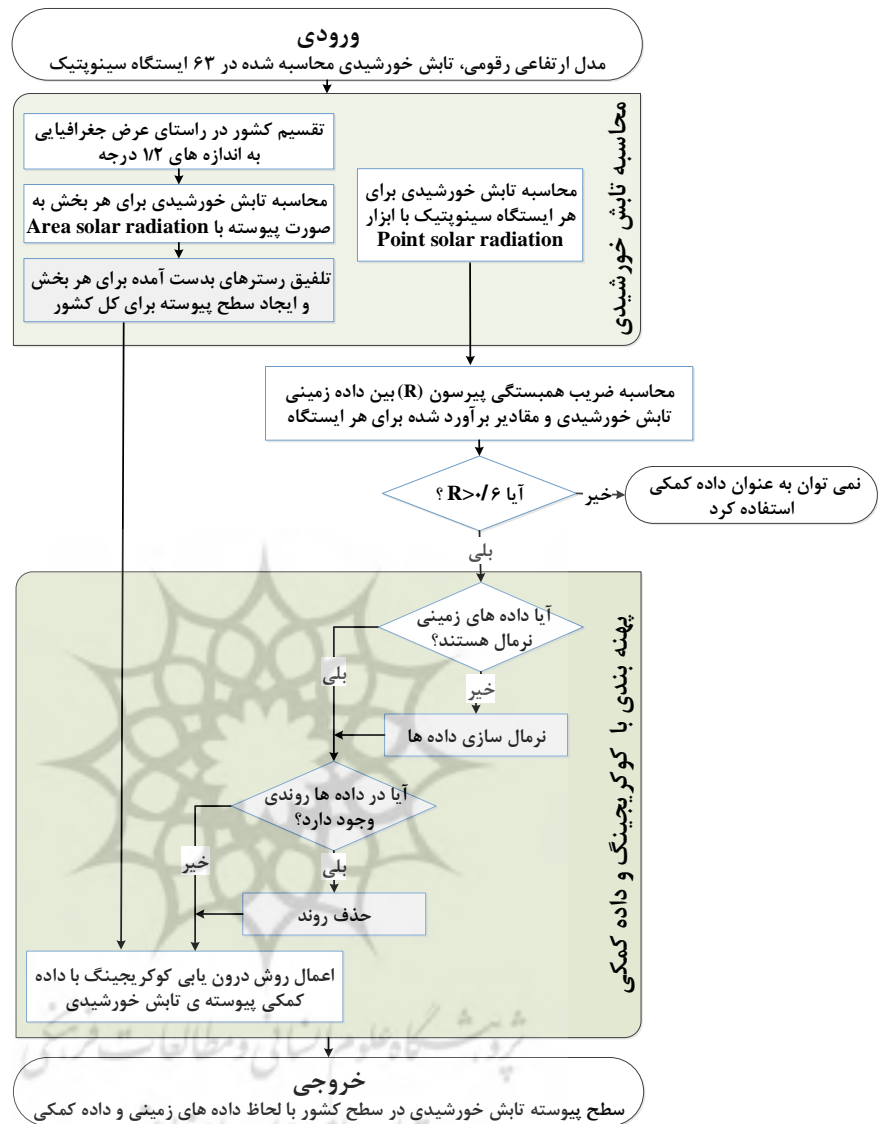
در محیط GIS محاسبه می‌شود. در مرحله دوم ضریب همبستگی مقادیر زمینی تابش خورشیدی و مقادیر به دست آمده از مرحله اول محاسبه می‌شود. در مرحله سوم با توجه به مقدار ضریب همبستگی به دست آمده، مقادیر زمینی تابش خورشیدی با روش کوکریجینگ و با استفاده از داده کمکی به دست آمده در مرحله اول با هم تلفیق شده و سطح پیوسته تابش خورشیدی برای کل کشور محاسبه می‌شود. پیاده‌سازی این تحقیق براساس شکل ۲ است. در ادامه هر مرحله تشریح می‌شود.

در این تحقیق از نقشه رستری DEM کشور ایران و داده‌های ۶۳ ایستگاه سینوپتیک که مقدار تابش خورشیدی را در سال ۲۰۱۶ به صورت ساعتی اندازه‌گیری کردند، استفاده شده است. مدل ارتفاعی رقومی استفاده شده با موزاییک کردن تصاویر توپوگرافی راداری شاتل ناسا<sup>۱</sup> (SRTM) با تفکیک مکانی ۳۰ متر ایجاد شده است.

### روش تحقیق

این تحقیق در سه مرحله اصلی اجرا می‌شود. در مرحله اول ابتدا میزان تابش خورشیدی با استفاده از مدل ارتفاع رقومی (DEM) و ابزار مکانی SolarRadiation

1. Shuttle Radar Topography Mission



شکل ۲: روند نمای پیاپی سازی تحقیق

تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۴۰۰

مقادیر تابع **Point solar radiation** برای یافتن ضریب همبستگی با داده های زمینی در مرحله دوم و خروجی تابع **Area solar radiation** در مرحله سوم در روش کوکریجینگ به عنوان داده کمکی استفاده می شود. دو تابع **Point solar radiation** و **Area solar radiation** از توپوگرافی منطقه که عامل اصلی در تعیین پراکنش مکانی تابش است، به عنوان ورودی استفاده می کنند (زندى و همکاران، ۱۳۹۸: ۷۳). این ابزار برای برآورد میزان تابش خورشیدی پارامترهای

مرحله ۱: محاسبه تابش خورشیدی با ابزار **Solar radiation** در این تحقیق ابتدا مقدار تابش خورشیدی با استفاده از دو تابع **Point solar radiation** و **Area solar radiation** از زیرمجموعه ابزار **Solar radiation** در نرم افزار ArcGIS تولید می شود. تابع **Point solar radiation** برای محاسبه مقدار تابش خورشیدی در یک نقطه (مانند ایستگاه های سینوپتیک) و تابع **Area solar radiation** برای محاسبه تابش خورشیدی در یک گستره کاربرد دارد (Esri, 2021: 1). خروجی



اثرات جوی، عرض جغرافیایی، ارتفاع محل، مقدار شیب، جهت شیب، زاویه ورودی خورشید و تأثیر سایه‌اندازی ارتفاعات در طول روز را از DEM منطقه استخراج می‌کند (ولیزاده کامران، ۱۳۹۳: ۳۱۸). میزان تابش خورشیدی در این ابزار از طریق محاسبه ایزوله در یک منظره یا برای مکان‌های خاص، براساس الگوریتم دید نیم‌کره‌ای برحسب وات‌ساعت بر مترمربع ( $WH/m^2$ ) محاسبه می‌شود (Rezaei et al., 2016: 140). ابزار Solar radiation قادر به تحلیل و به تصویر کشیدن اثر خورشید بر روی یک منطقه جغرافیایی در طول یک دوره زمانی مشخص است.

عرض جغرافیایی یکی از تأثیرگذارترین ورودی‌های این توابع است. هنگام محاسبه تابش خورشیدی برای نقاط، عرض جغرافیایی (با واحد درجه) به‌طور مستقیم محاسبه می‌شود. در محاسبه عرض‌های جغرافیایی علامت مثبت برای نیمکره شمالی و منفی برای نیمکره جنوبی درج می‌شود که در محاسباتی مانند کاهش زاویه خورشید و موقعیت خورشیدی استفاده می‌شود. هنگام محاسبه تابش خورشیدی برای یک منطقه، در فایل‌های رستری دارای سیستم مختصات (زمین مرجع شده)، میانگین عرض جغرافیایی منطقه به‌طور خودکار محاسبه و در محاسبات لحاظ می‌شود. این توابع برای مقیاس محلی<sup>۱</sup> طراحی شده‌اند؛ بنابراین استفاده از یک مقدار عرض جغرافیایی برای منطقه‌ای کوچک قابل قبول است؛ از این رو برای مجموعه داده‌های بزرگ‌تر، مانند استان، کشورها یا قاره‌ها، نتایج نوردی در عرض‌های جغرافیایی مختلف (بیشتر از ۱ درجه) متفاوت خواهد بود (Esri, 2021: 1). برای تجزیه و تحلیل مناطق جغرافیایی وسیع‌تر، منطقه مورد مطالعه باید به مناطق با عرض جغرافیایی مختلف تقسیم شود. در این تحقیق کل کشور ایران به‌صورت ۱/۲ درجه در راستای عرض جغرافیایی از جنوب کشور به‌گونه‌ای که هر بخش با بخش بالایی و پایینی ۰/۲ درجه اشتراک داشته

باشد، تقسیم‌بندی شد. دلیل در نظر گرفتن همپوشانی این است که گسسته کردن منطقه موجب می‌شود در مرزهای هر بخش محاسبات با عرض‌های جغرافیایی مختلف انجام شده و نقشه تابش خورشیدی خروجی در مرزها اختلافاتی داشته باشد. خروجی این تابع یک فایل رستری است که در هر پیکسل مقدار تابش خورشیدی محاسبه شده است.

### مرحله ۲: ضریب همبستگی

در این مرحله رابطه بین مقادیر به دست آمده در مرحله قبل و مقادیر داده‌های اندازه‌گیری شده در ایستگاه‌های زمینی با استفاده از ضریب همبستگی<sup>۲</sup> محاسبه می‌شود. همبستگی در واقع اندازه پیوند آماری بین دو پدیده را شامل می‌شود (Shboul et al., 2021: 7). روش‌های مختلفی برای محاسبه ضریب همبستگی وجود دارد که رایج‌ترین این ضرایب، ضریب همبستگی پیرسون<sup>۳</sup> است. ضریب همبستگی پیرسون تنها برای رابطه خطی بین دو متغیر معنا دارد. این ضریب از تقسیم کوواریانس دو متغیر از طریق ضرب انحراف معیارشان به دست می‌آید. فرمول ضریب همبستگی به‌صورت رابطه ۱ تعریف شده است (Shboul et al., 2021: 7).

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_i)(\hat{y}_i - \bar{\hat{y}}_i)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_i)^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{\hat{y}}_i)^2}} \quad (1)$$

که در آن  $y_i$  و  $\hat{y}_i$  به ترتیب مقادیر محاسبه شده و مقادیر واقعی بوده و  $\bar{y}_i$  و  $\bar{\hat{y}}_i$  میانگین این مقادیر برای  $n$  مشاهده است. ضریب همبستگی پیرسون برای داده‌هایی با توزیع نرمال یا تعداد داده‌های زیاد استفاده شده و مقداری بین ۱ و -۱ دارد. مقدار  $R=1$  بیانگر رابطه مستقیم کامل بین دو متغیر و  $R=-1$

2. R= Correlation Coefficient  
3. Pearson Correlation Coefficient

1. Local

خورشیدی است ( Emmendorfer and Dimuro, 2021: 2; Hirooka et al., 2018: 260; Naserpour et al., 2020: 1). در روش کریجینگ امکان استفاده از داده‌های کمکی برای افزایش دقت خروجی وجود دارد. در صورت استفاده از داده‌های جانبی در روش کریجینگ به آن کوکریجینگ<sup>۷</sup> گفته می‌شود.

کوکریجینگ (کریجینگ کمکی) روشی شبیه به رویکردهای چندمتغیره است که براساس همبستگی مکانی بین متغیرهای مختلف مقادیر را برآورد می‌کند (هوشنگی و همکاران، ۱۳۹۳: ۷). چنین متغیرهایی را هم‌منطقه‌ای<sup>۸</sup> نیز می‌نامند و از نظر مکانی به هم وابسته وابسته هستند (Liao et al., 2011: 1248). برای محاسبه اوزان و در نتیجه تخمین مقادیر مجهول نیاز به محاسبه سمی و ریوگرام متقابل است. کوکریجینگ از رابطه ۲ به منظور یافتن مقادیر مجهول استفاده می‌کند.

(۲)

$$z^*(x_i) = \sum_{j=1}^n \lambda_{ji} \times x_j = \lambda_k \times y(x_k)$$

در رابطه ۲،  $z^*(x_i)$  مقدار محاسبه شده برای نقطه  $x_i$ ، همچنین  $\lambda_k$  و  $\lambda_i$  به ترتیب وزن مربوط به متغیر اصلی و وزن متغیر کمکی و  $y$  مقدار مشاهده متغیر کمکی است. به منظور استفاده از روش کوکریجینگ ابتدا ماتریس همبستگی بین پدیده و سایر پارامترهای موجود محاسبه می‌شود. در ادامه متغیر کمکی‌ای که بیشترین ضریب همبستگی با متغیر مورد نظر را داشته باشد، برای درون‌یابی استفاده می‌شود (هوشنگی و همکاران، ۱۳۹۳: ۷). در میان عوامل مختلفی که در میزان تابش خورشیدی دخیل هستند، پارامتری که به صورت پیوسته قابل اندازه‌گیری بوده و با هزینه کمتری قابل محاسبه باشد، نسبت به بقیه ارجح خواهد بود؛ از این رو در این تحقیق از تابش خورشیدی استخراج شده از مدل ارتفاعی رقومی (DEM) به عنوان

وجود یک رابطه معکوس کامل بین دو متغیر را نشان می‌دهد (He et al., 2020: 5). هر عددی بین این مقادیر شدت همبستگی مثبت یا منفی را نشان می‌دهد. ضریب همبستگی صفر نشان می‌دهد که بین دو متغیر رابطه خطی وجود ندارد.

### مرحله ۳: درون‌یابی کریجینگ

بیشتر پدیده‌های جغرافیای به‌طور پیوسته تغییر می‌کنند. با این حال، تنها در تعداد محدودی از بی‌نهایت مکان ممکن اندازه‌گیری انجام می‌شود (Emmendorfer and Dimuro, 2021: 1)؛ از این رو محاسبه تابش خورشیدی در کل منطقه و ایجاد سطح پیوسته با استفاده از روش‌های درون‌یابی به منظور درک پدیده لازم و ضروری است (Núñez-Reyes and Ruiz, 2016: 3216). کریجینگ یکی از روش‌های رایج درون‌یابی مکانی است که از خودهمبستگی و دیگر روابط آماری بین نقاط اندازه‌گیری شده استفاده می‌کند (هوشنگی و همکاران، ۱۳۹۳: ۷). مدل همبستگی فضایی (سمی و ریوگرام) که در روش کریجینگ استخراج می‌شود، نشان‌دهنده روابط بین مقادیر اندازه‌گیری شده در اطراف محل پیش‌بینی است (Emmendorfer and Dimuro, 2021: 2). بهترین برآوردگر بی‌طرفانه خطی<sup>۱</sup> بوده و پیش‌فرض نرمال بودن داده‌ها و نبود روند<sup>۲</sup> را دارد (Zou et al., 2016: 9). کریجینگ شامل انواع مختلف ساده<sup>۳</sup>، عادی<sup>۴</sup>، جهانی<sup>۵</sup>، شاخص<sup>۶</sup> و... است. تفاوت این روش‌ها در فرضیات لحاظ شده در روش کریجینگ است. کریجینگ عادی (OK) رایج‌ترین روش در بین بسیاری از روش‌های کریجینگ بوده (Jeong et al., 2017: 71) و از روش‌های غالب استفاده شده در زمینه تابش

1. Unbiased linear estimates
2. Trend
3. Simple
4. Ordinary
5. Universal
6. Indicator

7. Cokriging
8. Coregionalized

برابر با واحد داده‌های استفاده‌شده و مقدار آن به مقدار داده‌های استفاده‌شده وابسته است. در ادامه برای درک صحیح از خروجی RMSE (بدون لحاظ دامنه اعداد) مقدار RRMSE با رابطه ۴ محاسبه می‌شود (Jamil and Bellos, 2019: 15).

$$RRMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_e - x_r)^2}{\sum_{i=1}^n x_r}} \quad (4)$$

اگر مقدار RRMSE کمتر از ۱۰ درصد باشد، دقت مدل عالی در نظر گرفته می‌شود. ارزش RRMSE بین ۱۰ تا ۲۰ درصد نشان‌دهنده قابل قبول بودن نتایج است؛ در حالی که مقادیر بین ۲۰ تا ۳۰ درصد تناسب عادلانه و مقادیر کمتر از ۳۰ درصد به‌عنوان تناسب ضعیف در نظر گرفته می‌شود (Naserpour et al., 2020: 6).

### نتایج و بحث

در مرحله اول با استفاده از مدل ارتفاع رقومی منطقه و تابع Point solar radiation در نرم‌افزار ArcGIS متوسط مقدار تابش خورشیدی برای سال ۲۰۱۶ از ۱ ژانویه (۱۳۹۴/۱۰/۱۱) تا ۳۱ دسامبر (۱۳۹۵/۱۰/۱۱) در هر ایستگاه محاسبه شد. مقدار ارتفاع هر نقطه با معرفی داده DEM محاسبه و رزولوشن متوسط<sup>۳</sup> ۲۰۰\*۲۰۰ پیکسل در نظر گرفته شد. مقادیر محاسبه‌شده تابش خورشیدی و مقادیر زمینی برای هر ایستگاه در نمودار میله‌ای شکل ۳ ارائه شده است. به‌منظور جلوگیری از شلوغ شدن و غیرقابل استفاده شدن شکل، داده‌های ۱۲ ایستگاه در بخش‌های پرتراکم شبکه در شکل نمایش داده نشد. خروجی تابع Point solar radiation برحسب وات‌ساعت بر مترمربع (wh/m<sup>2</sup>) و داده‌های زمینی برحسب وات بر مترمربع (w/m<sup>2</sup>) بودند؛ از این رو با

داده کمکی در درون‌یابی استفاده می‌شود. مدل ارتفاعی رقومی برای کل کشور ایران در مقیاس‌ها و دقت‌های مختلف و بدون هزینه قابل توجهی وجود دارد.

### ارزیابی دقت روش

برای ارزیابی دقت روش‌های درون‌یابی عموماً از اعتبارسنجی متقابل استفاده می‌شود. اعتبارسنجی متقابل با خارج کردن داده یک ایستگاه و محاسبه مقدار همان ایستگاه با استفاده از درون‌یابی داده‌های دیگر به صورت یک‌به‌یک<sup>۱</sup> انجام می‌شود (Emmendorfer and Dimuro, 2021: 7).

در ادامه اختلاف مقدار واقعی و مقدار برآوردشده در یک ایستگاه به‌عنوان معیاری از خطای درون‌یابی در آن نقطه لحاظ می‌شود. در اعتبارسنجی متقابل، تمام نقاط در مرحله درون‌یابی و ارزیابی استفاده می‌شوند. در این تحقیق از خطای جذر میانگین مربعات<sup>۲</sup> (RMSE) به‌منظور تجمیع خطاها در ایستگاه‌ها استفاده شد (رابطه ۳).

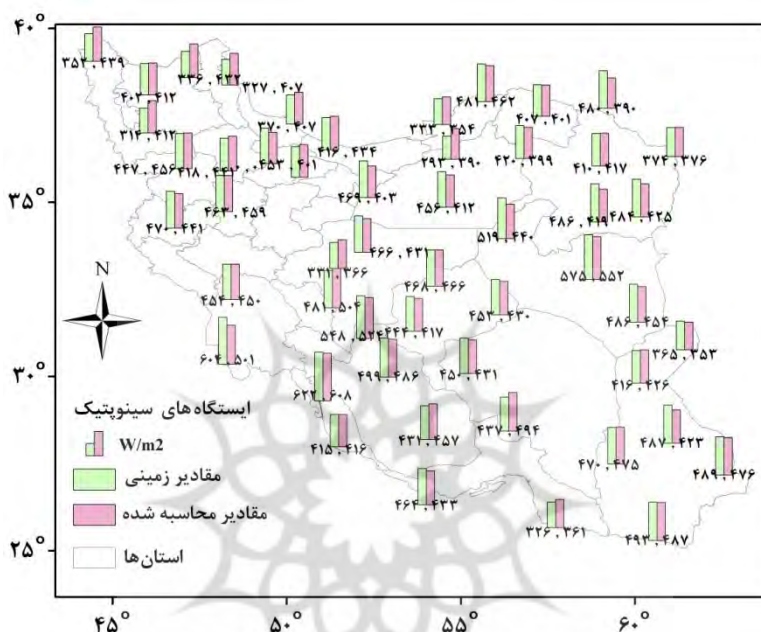
(۳)

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_e - x_r)^2}{n}}$$

در رابطه ۳،  $x_e$  مقدار برآوردشده با استفاده از درون‌یابی با داده‌های دیگر،  $x_r$  مقدار واقعی زمینی،  $n$  تعداد ایستگاه‌هاست. این کمیت یکی از پرکاربردترین پارامترهای آماری در GIS بوده (Babar et al., 2019: 401; Loghmari et al., 2018: 842) می‌تواند به‌عنوان یکی از پارامترهای تأثیرگذار در کاربردهای زمین‌آمار استفاده شود (Hirooka et al., 2018: 264, Núñez-Reyes and Ruiz-Moreno, 2020: 3220). هر چه مقدار این کمیت نزدیک به صفر باشد، خطا کمتر خواهد بود. RMSE واحدی

بوشهر و استان سمنان ثبت شده است. ایستگاه‌های سینوپتیک واقع در بخش شمالی و شمال غربی کشور به مراتب تابش کمتری از ایستگاه‌های جنوبی ثبت کرده‌اند.

تقسیم مقادیر خروجی تابع به ۳۶۰۰، واحد هر دو مجموعه داده  $w/m^2$  شد. براساس اعداد شکل ۳، حداکثر مقدار تابش خورشیدی ثبت شده در ایستگاه‌های زمینی  $w/m^2$  ۶۲۲ و حداقل مقدار آن  $w/m^2$  ۲۹۳ است که به ترتیب در بخش شمالی استان



شکل ۳: مقادیر ایستگاه‌های زمینی و خروجی تابع Point solar radiation

تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۴۰۰

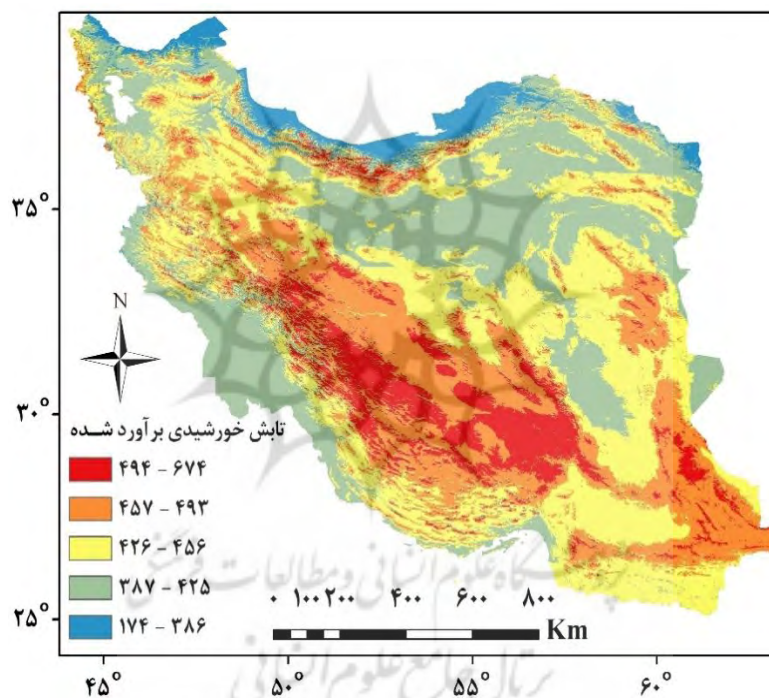
در ادامه به منظور محاسبه میزان همبستگی بین دو مجموعه داده (داده‌های زمینی و داده‌های استخراج شده از تابع Point solar radiation) از آزمون پیرسون در نرم‌افزار SPSS Statistics 19.0 استفاده شد. در اکثر تحقیقات پیشین که از ابزارهای Solar Analyst در نرم‌افزار ArcGIS استفاده شده، به دلیل کوچک بودن منطقه مطالعاتی و نبود ایستگاه زمینی برداشت تابش خورشیدی، مقایسه با داده‌های زمینی انجام نشده است (Rezai et al., 2016: 148). در تحقیقات محدودی همبستگی بین داده‌های زمینی و خروجی تابع solar radiation محاسبه شده که از جمله این موارد توسط پیدالو و گگوت (۲۰۰۸) بوده که مقدار همبستگی در زمان‌های مختلف بین ۰/۴۲ تا ۰/۷۸ برآورد شده است. مقدار همبستگی محاسبه شده در تحقیق ما برابر با

۰/۷۱۳ است که در سطح ۰/۰۱ معنی دار است. مقایسه همبستگی به دست آمده در این تحقیق با مطالعات پیشین نشان می‌دهد که مقدار به دست آمده جزء مقادیر بالا در این زمینه است. مقدار  $R=0/713$  نشان‌دهنده این است که بدون صرف هزینه در تخمین تابش خورشیدی می‌توان مقادیر با مشابهت تقریبی به داده‌های زمینی تخمین زد؛ اما این مقادیر دقت کافی و لازم را نخواهند داشت (Piedallu & Gégout, 2008). به منظور استفاده از این داده در کوکریجینگ به این نکته باید توجه کرد که در تحقیقات پیشین عموماً همبستگی بالای ۰/۶ به عنوان همبستگی بالا بین دو مجموعه داده معرفی شده است (Hooshangi & Alesheikh, 2015: 191). در اکثر موارد داده‌های استفاده شده در کوکریجینگ داده‌های نقطه‌ای هستند،



اشتراک داشته باشد. در ادامه با استفاده از تابع Area solar radiation تابش خورشیدی هر بخش به صورت جداگانه محاسبه شد. با توجه به اینکه کشور ایران در عرض جغرافیایی ۲۵ تا ۴۰ درجه است، ۱۵ بار این تابع اجرا شد. در ادامه این ۱۵ سطح با هم تلفیق و در مناطقی که سطوح همپوشانی داشتند، برای حفظ یکپارچگی تابش خورشیدی میانگین‌گیری انجام شد. سطح پیوسته ایجادشده در شکل ۴ نمایش داده شده است.

مثلاً از ساعات آفتابی در کوکریجینگ استفاده شده است. مقدار بالای ضریب همبستگی ۰/۷۱۳ ضمن اینکه رابطه قوی بین داده‌های زمینی و مقادیر برآوردشده را نشان می‌دهد، مزیت اصلی آن این است که می‌توان به صورت پیوسته برای کل کشور محاسبه کرد؛ از این رو داده مناسبی برای استفاده در کوکریجینگ است. در این مرحله برای محاسبه سطح پیوسته از تابش خورشیدی، DEM کشور ایران به بخش‌های ۱/۲ درجه‌ای تقسیم شد؛ به گونه‌ای که هر بخش با بخش مجاور خود ۰/۲



شکل ۴: سطح خروجی تابع Area solar radiation

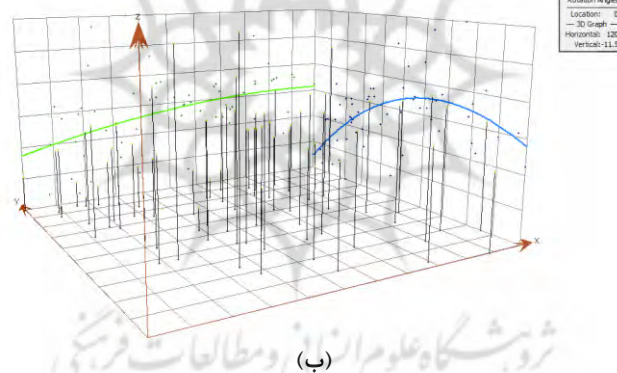
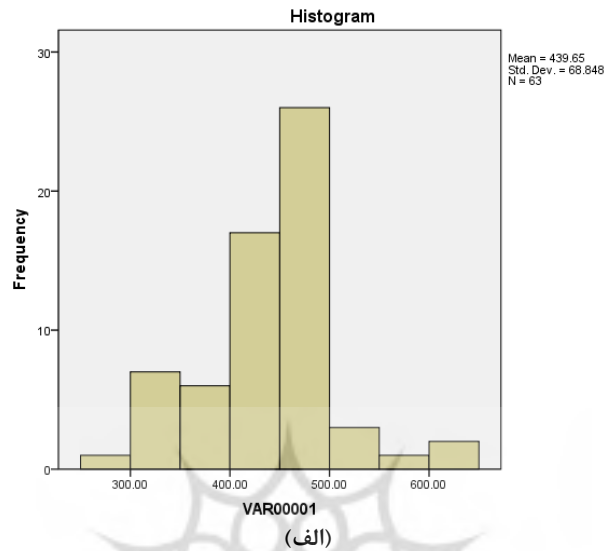
تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۴۰۰

تابع Area solar radiation با توجه به ماهیت آن که از DEM منطقه استفاده می‌کند، به صورت بارز تصویرکننده تأثیر توپوگرافی در مقدار تابش خورشیدی است. تأثیر توپوگرافی در میزان تابش خورشیدی در بخش‌های شمالی در رشته‌کوه البرز و در کوه‌های سهند و سبلان در بخش شمال غربی کشور نیز مشاهده می‌شود. به منظور انجام درون‌یابی کوکریجینگ ابتدا باید نرمال بودن داده‌ها و وجود روند در داده‌ها بررسی شود.

همان‌گونه که در شکل ۴ مشخص است، در نقشه خروجی تأثیر جزئیات توپوگرافی در محاسبه تابش خورشیدی به‌ویژه در اطراف رشته‌کوه‌های کشور مانند رشته‌کوه زاگرس مشاهده می‌شود. در تحقیقات مختلفی به تأثیر توپوگرافی در مقدار تابش خورشیدی اشاره شده (Rezaei et al., 2016: 133). حتی مشخص شده که تأثیرپذیری تابش کل از ارتفاع به مراتب بیشتر از میزان ساعات آفتابی است (زندى و همکاران، ۱۳۹۸: ۸۱). خروجی

داده‌ها نیز در نرم‌افزار ArcGIS بررسی شده که خروجی آن در شکل ۵-ب نمایش داده شده است.

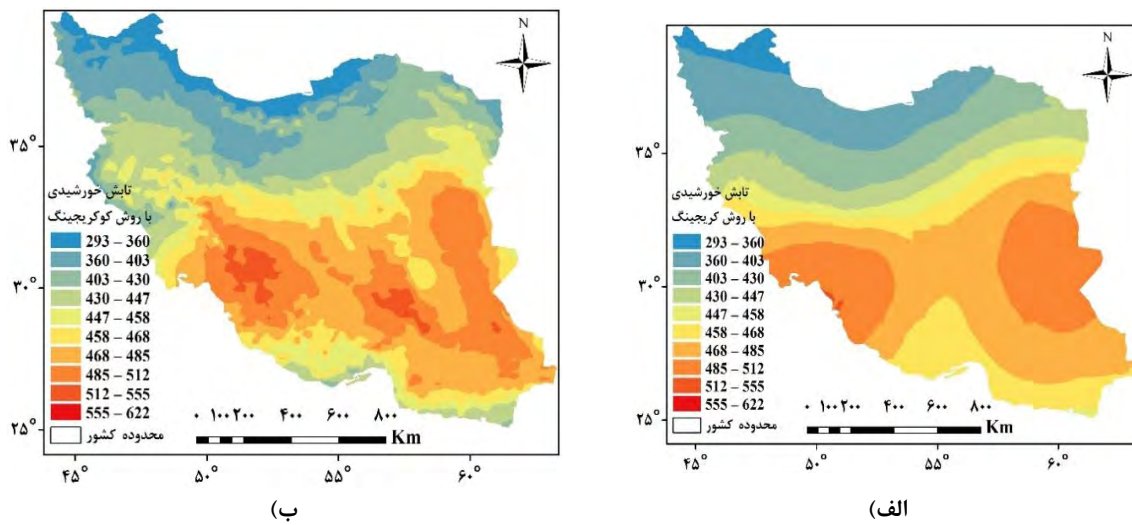
منحنی فراوانی مقادیر برای ۶۳ ایستگاه در نرم‌افزار SPSS به صورت شکل ۵-الف است. روند موجود در



شکل ۵: ویژگی‌های داده‌های استفاده‌شده: (الف) نمودار فراوانی داده‌های تابش خورشیدی (ب) نمایش روند موجود در داده‌ها تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۴۰۰

از نرم‌افزار ArcGIS استفاده شد. در این سربرگ حذف روند با استفاده از تابع درجه دوم<sup>۲</sup> انجام گرفت. در این مرحله ابتدا درون‌یابی بدون استفاده از داده کمکی انجام شد که خروجی آن در شکل ۶-الف نمایش داده شده است. در ادامه درون‌یابی کریجینگ با استفاده از فایل رستری حاصل از تابع Area solar radiation به‌عنوان داده کمکی انجام شد. سطح ایجادشده با روش کوکریجینگ در شکل ۶-ب نمایش داده شده است.

براساس نمودار فراوانی مشخص است که داده‌ها، توزیعی نزدیک به نرمال دارند. همچنین مقدار معنی‌داری (Sig) به‌دست‌آمده در آزمون کولموگروف-اسمیرنوف<sup>۱</sup> نیز برابر با ۰/۲ است که با توجه به حداقل مقدار ۰/۰۵ ارائه‌شده به‌عنوان معیار نرمال‌بودن، داده‌ها نرمال هستند. نمودار روند حاصل نیز نشان می‌دهد که داده‌ها روی صفحه ZOY دارای روندی از نوع درجه دو است؛ از این رو در فرایند درون‌یابی باید عملیات حذف روند روی داده‌ها انجام‌شود. برای انجام فرایند درون‌یابی



شکل ۶: خروجی پهنه‌بندی با روش کریجینگ عادی (OK): الف) بدون استفاده از داده کمکی

ب) با استفاده از داده کمکی فایل رستری حاصل از تابع Area solar radiation

تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۴۰۰

همکاران (۲۰۲۰: ۱۱) و همچنین نقشه خروجی علمداری و همکاران (۲۰۱۳: ۱۷۸۵) نشان می‌دهد که خروجی روش‌های درون‌یابی بدون داده کمکی، یک سطح پیوسته بدون لحاظ جزئیات مربوط به توپوگرافی است. کلیات سطوح تابش خورشیدی این مطالعات شبیه به هم است که براساس آن‌ها میزان تابش در مناطق جنوبی و مرکزی کشور بیشترین مقدار بوده است و به‌صورت نرم و آهسته هر چه به سمت شمال کشور حرکت کنیم، میزان تابش کمتر می‌شود. این سطوح نشان می‌دهند که عرض جغرافیایی، عامل اصلی تغییر مقدار تابش خورشیدی است؛ اما در روش کوکریجینگ نقشه تابش خورشیدی با جزئیاتی ایجاد شده که منعکس‌کننده توپوگرافی است؛ مثلاً در منطقه رشته‌کوه زاگرس، مناطق جنگلی شمال کشور و مناطق جنگلی ارسباران (شمال غربی کشور) سطح ایجادشده دارای جزئیاتی هم‌راستا با DEM منطقه است؛ بنابراین در مقایسه با خروجی ایجادشده در تحقیقات پیشین که در آن صرفاً از درون‌یابی استفاده شده است، روش پیشنهادی در این تحقیق می‌تواند منعکس‌کننده جزئیات توپوگرافی نیز باشد

(Naserpour et al., 2020: 11, Alamdari et al., 2013: 786).

مقدار خطای محاسبه‌شده در اعتبارسنجی متقابل درون‌یابی داده‌های زمینی بدون استفاده از داده کمکی برابر با  $RMSE=32/2 \text{ w/m}^2$  است. این مقدار خطا در کوکریجینگ با استفاده از داده کمکی برابر با  $RMSE=28/7 \text{ w/m}^2$  است. با تقسیم مقدار  $RMSE$  به مجموع داده‌ها (به‌منظور بی‌مقیاس کردن  $RMSE$ )، مقدار  $RRMSE$  برای هر دو حالت محاسبه شد که برای کریجینگ بدون داده کمکی  $7/3$  درصد و برای کوکریجینگ  $6/5$  درصد بود که در محدوده خطای قابل قبول است. از طرفی مقدار خطای تخمین تابش خورشیدی (مقدار  $RMSE$ ) در تحقیق انجام‌شده توسط اماندورفر و دیمورو (۲۰۲۱: ۱۲) در بخش کوچکی از منطقه آمازون در حدود ۹ تا ۲۰ وات بر مترمربع و در تحقیق هیروکا و همکاران (۲۰۱۸: ۲۶۵) دقت درون‌یابی بین ۲۰ تا ۳۰ وات بر مترمربع گزارش شده که در مقایسه با تحقیق حاضر نشان می‌دهد که نتایج درون‌یابی قابل قبول است. البته باید در نظر داشت که مقدار خطا در روش‌های درون‌یابی به عوامل متعددی از جمله تراکم، نحوه پراکندگی ایستگاه‌ها، نوع توزیع داده‌ها و... وابسته است. بررسی و مقایسه نقشه تابش خورشیدی ایجادشده بدون استفاده از داده کمکی در این تحقیق با نقشه خروجی ناصرپور و

استفاده از تابع Area solar radiation برای کل کشور ایجاد و با داده‌های ۶۳ ایستگاه سینوپتیک اندازه‌گیری شده در سال ۲۰۱۶ پهنه‌بندی شد. نتایج پهنه‌بندی با استفاده از روش کریجینگ عادی با داده کمی نشان داد که با استفاده از داده کمی دقت سطح ایجاد شده ۱۱ درصد بهتر شده است و به مقدار  $w/m^2$   $RMSE=28/7$  می‌رسد که در مقایسه با تحقیقات پیشین دقت قابل‌قبولی است. بررسی انجام‌شده نشان می‌دهند که استفاده از داده کمی پیوسته حاصل از تابع‌های آماده می‌تواند دقت درون‌یابی تابش خورشیدی را تا حد قابل‌قبولی افزایش دهد. این داده‌های کمی می‌تواند از منابع مختلفی تهیه شده باشد. براساس خروجی این تحقیق با استفاده از روش کوکریجینگ می‌توان داده‌های مختلف را در فرایند درون‌یابی تلفیق و بدون صرف هزینه‌ای با لحاظ همبستگی مکانی میان داده‌ها موجب افزایش دقت درون‌یابی شد. نقشه نهایی خروجی برای تابش خورشیدی نشان داد که استفاده از خروجی تابع Area solar radiation موجب می‌شود نقشه تابش خورشیدی تغییرات توپوگرافی زمین را نشان دهد. مزیت اصلی استفاده از این تابع سطحی است که به‌صورت پیوسته در گستره منطقه نتیجه می‌دهد. براساس این نقشه مشاهده شده که بخش‌های جنوبی و مرکزی کشور (به‌ویژه مناطق در راستای رشته‌کوه زاگرس) تابش خورشیدی بالایی دریافت می‌کنند.

برای تحقیقات آتی پیشنهاد می‌شود خروجی تابش خورشیدی حاصل از تصاویر ماهواره‌ای و مدل آنگستروم با داده‌های زمینی با روش کوکریجینگ تلفیق شوند. همچنین توصیه می‌شود روش پیشنهادی در این تحقیق در مناطق شهری با مدل سطحی رقومی (DSM) نیز بررسی شده و خروجی آن مستقیماً در پتانسیل‌سنجی مناطق شهری از نظر دریافت انرژی خورشیدی و مکان‌یابی پنل‌های خورشیدی استفاده شود.

متوسط تابش خورشیدی در کل دنیا  $340 w/m^2$  مقدار است. براساس شکل ۶-ب مقدار متوسط سالیانه تابش خورشیدی در کل کشور ایران به غیر از مناطق محدود، عددی بالاتر از  $340 w/m^2$  است که نشان‌دهنده پتانسیل بالای کشور در قیاس با کل دنیاست. در این بین بخش‌های جنوبی و مرکزی (مناطق با رنگ قرمز و نارنجی) تابش بالاتری دریافت می‌کنند. مناطق با تابش پایین‌تر در بخش‌ها با عرض جغرافیایی بالاتر و به‌ویژه در مناطق شمالی و جنگلی کشور قرار دارند. بر این اساس اکثر مناطق کشور به غیر از مناطق شمالی کشور، پتانسیل بالایی در جذب تابش خورشیدی دارند. نقشه تابش خورشیدی پتانسیل بالای استان‌های سیستان و بلوچستان، کرمان، فارس، بوشهر و خوزستان را در بهره‌گیری از انرژی خورشیدی نشان می‌دهد.

### نتیجه

برنامه‌ریزی‌های مختلف در زمینه کشاورزی، آب‌شناسی، معماری و انرژی تا حد زیادی وابسته به برآورد صحیح مقدار تابش خورشیدی است. توزیع فضایی و شدت تابش خورشیدی دو عامل مهم در توسعه انرژی خورشیدی هستند. در این تحقیق از روش کوکریجینگ و داده کمی حاصل از ابزار Solar radiation در نرم‌افزار ArcGIS برای افزایش دقت پهنه‌بندی تابش خورشیدی در گستره کشور ایران استفاده شد. مقادیر اولیه خروجی تابع Point solar radiation نشان داد که همبستگی بالایی با داده‌های زمینی داشته و بدون صرف هزینه‌ای و صرفاً با استفاده از DEM منطقه می‌توان با همبستگی  $71/3$  درصد مقادیر متوسط تابش خورشیدی سالیانه را به دست آورد. دقت حاصل از تابع کافی نبود؛ اما این داده با توجه به همبستگی مناسب آن می‌تواند در پهنه‌بندی مقادیر تابش خورشیدی اندازه‌گیری‌شده در ایستگاه‌های زمینی استفاده شود؛ بنابراین ابتدا سطح پیوسته از تابش خورشیدی با



## منابع

اصغری سراسکانرود، صیاد؛ ایمانعلی بلواسی (۱۳۹۹). امکان‌سنجی استفاده از انرژی تابشی خورشید با استفاده از سنجش از دور و الگوریتم سبال (مطالعه موردی: شهرستان الشتر)، فصلنامه علمی- پژوهشی اطلاعات جغرافیایی «سپهر». دوره ۲۹، شماره ۱۱۳. صفحات ۱۸۴-۱۶۹.

[http://www.sepehr.org/article\\_40478.html](http://www.sepehr.org/article_40478.html)

زندى، رحمان؛ محمدجواد صفایی؛ مریم خسرویان (۱۳۹۸). پتانسیل‌سنجی استفاده از انرژی خورشیدی در مناطق روستایی (مطالعه موردی: شهرستان سبزوار)، فصلنامه جغرافیا و توسعه. دوره ۱۷، شماره ۵۷. صفحات ۹۴-۶۹.

[https://gdij.usb.ac.ir/article\\_4983.html](https://gdij.usb.ac.ir/article_4983.html)

مؤمنی، حسن؛ حجت‌الله محمدقلیان (۱۳۹۹). سیاست بهره‌گیری از انرژی تابش خورشیدی در پراکنش پهنه‌های جغرافیایی با استفاده از برنامه‌های ArcGIS. جغرافیا و روابط انسانی. دوره ۳، شماره ۲. صفحات ۸۴-۶۱.

[http://www.gahr.ir/article\\_114593.html](http://www.gahr.ir/article_114593.html)

هوشنگی، نوید؛ علی‌اصغر آل‌شیخ؛ حسین هلالی (۱۳۹۳). بررسی منطقه‌ای پتانسیل تابش خورشیدی با ارزیابی و بهینه‌سازی روش‌های درون‌یابی در سطح کشور ایران. فصلنامه علمی- پژوهشی برنامه‌ریزی منطقه‌ای، دوره ۴، شماره ۱۶. صفحات ۱-۱۶.

[http://jzpm.miau.ac.ir/article\\_661.html](http://jzpm.miau.ac.ir/article_661.html)

ولیزاده‌کامران، خلیل (۱۳۹۳). برآورد تبخیر- تعرق پتانسیل در آذربایجان شرقی به روش استفنز با استفاده از GIS. نشریه علمی جغرافیا و برنامه‌ریزی. دوره ۱۸، شماره ۴۹. صفحات ۳۳۴-۳۱۷.

[https://geoplanning.tabrizu.ac.ir/article\\_2217.html](https://geoplanning.tabrizu.ac.ir/article_2217.html)

## References

- Alamdari, P., Nematollahi, O. and Alemrajabi, A. A. (2013). Solar energy potentials in Iran: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 21, 778-788.  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032113000087>
- Babar, B., Graversen, R. and Boström, T. (2019). Solar radiation estimation at high latitudes: Assessment of the CMSAF databases, ASR and ERA5. *Solar Energy*, 182, 397-411.  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X19301847>
- Batlles, F. J., Bosch, J. L., Tovar-Pescador, J., Martinez-Durban, M., Ortega, R. and Miralles, I. (2008). Determination of atmospheric parameters to estimate global radiation in areas of complex topography: Generation of global irradiation map. *Energy Conversion and Management*, 49(2), 336-345.  
[http://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig\\_q=RN:39094064](http://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig_q=RN:39094064)
- Bellaoui, M., Bouchouicha, K. and Oulimar, I. (2021). Estimation of daily global solar radiation based on MODIS satellite measurements: The case study of Adrar region (Algeria). *Measurement*, 183, 109.  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263224121007545>
- Chelbi, M., Gagnon, Y. and Waewsak, J. (2015). Solar radiation mapping using sunshine duration-based models and interpolation techniques: Application to Tunisia. *Energy Conversion and Management*, 101, 203-215. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890415004069>
- Emmendorfer, L. R. and Dimuro, G. P. (2021). A point interpolation algorithm resulting from weighted linear regression. *Journal of Computational Science*, 50, 101304.  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877750321000053>

- Esri (2021). Area Solar Radiation [Online]. Environmental Systems Research Institute. Available: <https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.3/tools/spatial-analyst-toolbox/area-solar-radiation.htm> [Accessed 2021].
- Feng, Y., Zhang, X., Jia, Y., Cui, N., Hao, W., Li, H. and Gong, D. (2021). High-resolution assessment of solar radiation and energy potential in China. *Energy Conversion and Management*, 240, 114265. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890421004416>
- Gassar, A. a. A. and Cha, S. H. (2021). Review of geographic information systems-based rooftop solar photovoltaic potential estimation approaches at urban scales. *Applied Energy*, 291, 116817. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261921003184>
- He, C., Liu, J., Xu, F., Zhang, T., Chen, S., Sun, Z., Zheng, W., Wang, R., He, L., Feng, H., Yu, Q. and He, J. (2020). Improving solar radiation estimation in China based on regional optimal combination of meteorological factors with machine learning methods. *Energy Conversion and Management*, 220, 113111. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890420306555>
- Hirooka, D., Murata, N., Fujimoto, Y. and Hayashi, Y. (2018). Temporal Interpolation of Gridded Solar Radiation Data for Evaluation of PV Fluctuations. *Energy Procedia*, 155, 259-268. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610218310063>
- Hooshangi, N. and Alesheikh, A. A. (2015). Evaluation of ANN, ANFIS and fuzzy systems in estimation of solar radiation in Iran. *ISSGE*, 4(3), 187-200. <http://jgst.issge.ir/article-1-109-fa.html>
- Jamil, B. and Bellos, E. (2019). Development of empirical models for estimation of global solar radiation exergy in India. *Journal of Cleaner Production*, 207, 1-16. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652618329858>
- Jeong, D. I., St-Hilaire, A., Gratton, Y., Bélanger, C. and Saad, C. (2017). A guideline to select an estimation model of daily global solar radiation between geostatistical interpolation and stochastic simulation approaches. *Renewable Energy*, 103, 70-80. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148116309855>
- Karaman, Ö. A., Tanyıldızı Ağır, T. and Arsel, İ. (2021). Estimation of solar radiation using modern methods. *Alexandria Engineering Journal*, 60(2), 2447-2455. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1110016820306979>
- Koo, C., Li, W., Cha, S. H. and Zhang, S. (2019). A novel estimation approach for the solar radiation potential with its complex spatial pattern via machine-learning techniques. *Renewable Energy*, 133, 575-592. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148118312503>
- Liao, K.-H., Xu, S.-H., Wu, J.-C., Ji, S.-H. and Lin, Q. (2011). Cokriging of Soil Cation Exchange Capacity Using the First Principal Component Derived from Soil Physico-Chemical Properties. *Agricultural Sciences in China*, 10(8), 1246-1253. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1671292711601168>
- Loghmani, I., Timoumi, Y. and Messadi, A. (2018). Performance comparison of two global solar radiation models for spatial interpolation purposes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 837-844. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032117313448>
- Makade, R. G., Chakrabarti, S., Jamil, B. and Sakhale, C. N. (2020). Estimation of global solar radiation for the tropical wet climatic region of India: A theory of experimentation approach. *Renewable Energy*, 146, 2044-2059. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148119312418>

- Naserpour, S., Zolfaghari, H. and Zeaiean Firouzabadi, P. (2020). Calibration and evaluation of sunshine-based empirical models for estimating daily solar radiation in Iran. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 42, 100855. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2213138820312820>
- Núñez-Reyes, A. and Ruiz-Moreno, S. (2020). Spatial Estimation of Solar Radiation Using Geostatistics and Machine Learning Techniques. *IFAC-PapersOnLine*, 53(2), 3216-3222. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405896320314683>
- Pardo-Igúzquiza, E., Chica-Olmo, M., Luque-Espinar, J. A. and Rodríguez-Galiano, V. (2015). Compositional cokriging for mapping the probability risk of groundwater contamination by nitrates. *Science of The Total Environment*, 532, 162-175. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969715302023>
- Piedallu, C. and Gégout, J.-C. (2008). Efficient assessment of topographic solar radiation to improve plant distribution models. *Agricultural and Forest Meteorology*, 148(11), 1696-1706. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168192308001767>
- Rezaei, M., Mohammad, H., Hatefi, A. and Graduated, M. (2016). Assessment of energy supply for photovoltaic systems based on solar energy analyst function (area: highway Zanjan – Tabriz). *mdrsjrns*, 20(3), 131-155. <http://hsmasp.modares.ac.ir/article-21-10474-fa.html>
- Shboul, B., Al-Arfi, I., Michailos, S., Ingham, D., Ma, L., Hughes, K. J. and Pourkashanian, M. (2021). A new ANN model for hourly solar radiation and wind speed prediction: A case study over the north & south of the Arabian Peninsula. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 46, 101248. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2213138821002587>
- Zhou, Y., Liu, Y., Wang, D., Liu, X. and Wang, Y. (2021). A review on global solar radiation prediction with machine learning models in a comprehensive perspective. *Energy Conversion and Management*, 235, 113960. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890421001369>
- Zou, L., Wang, L., Lin, A., Zhu, H., Peng, Y. and Zhao, Z. (2016). Estimation of global solar radiation using an artificial neural network based on an interpolation technique in southeast China. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 146, 110-122. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364682616301390>