



Research Paper

Evaluation of Spatiotemporal Variations of Incoming Shortwave Radiation in Western Iran

Mahmoud Ahmadi^{*1}, Mohammad Kamangar², Zahra Ahmadi Moghaddam³

1. Associate Professor, Department of Meteorology, Faculty of Earth Sciences, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

2. PhD, Department of Meteorology, Faculty of Humanities, University of Zanjan, Zanjan, Iran

3 M.A., Department of Meteorology, Faculty of Earth Sciences, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

Received: 29/12/2025

Revised: 31/05/2026

Accepted: 20/06/2026

ABSTRACT

Shortwave radiation (SWR) as one of the fundamental components of the Earth's climate system plays a key role in regulating the surface energy balance, controlling ecological processes, and shaping patterns of human activities. The present study aims to investigate the spatiotemporal variability of shortwave radiation in western Iran over the 2000–2022 period using satellite data and products, focusing on spatial and seasonal patterns across the provinces of Kurdistan, Kermanshah, Ilam, Hamedan, and Lorestan. In this research, MODIS sensor data were used to estimate net surface incoming radiation, and regional-scale spatiotemporal analyses were performed. The results indicate that western Iran has a high potential for solar energy reception, with an estimated annual mean radiation of approximately 1800 to 2200 kWh per square meter and more than 280 sunny days per year. Spatially, the highest radiation values were observed in the elevated and low-cloud regions of northwestern areas, while lower values were recorded in southern and southwestern regions due to higher humidity and cloud cover. Temporally, the seasonal pattern shows maximum radiation in summer and minimum in winter. This pattern is primarily driven by variations in solar zenith angle, day length, cloud conditions, humidity, and topographic characteristics. Overall, the findings suggest that western Iran, particularly the Zagros highlands, has considerable potential for solar energy development, and the results can support strategic planning for renewable energy expansion and sustainable resource management

Keywords:

Solar radiation, shortwave, MODIS, western Iran

*Corresponding Author: ma_ahmadi@sbu.ac.ir



Copyright© 2026, TMU Press. This open-access article is published under the terms of the Creative Commons Attribution- NonCommercial 4.0 International License which permits Share (copy and redistribute the material in any medium or format) and Adapt (remix, transform, and build upon the material) under the Attribution-NonCommercial terms.

S

Extended Abstract**Introduction**

Solar radiation is one of the fundamental components of the Earth's climate system, playing a key role in energy balance, atmospheric circulation, agricultural productivity, and renewable energy potential. Incoming shortwave radiation (SWR), covering the wavelength range of 0.2–4 μm , constitutes the major portion of the Earth's received solar energy. Temporal and spatial variations in SWR arise from factors such as the Earth's elliptical orbit, axial tilt, latitude, elevation, and atmospheric conditions. Iran, with an annual average solar radiation of 1,800–2,200 kWh/m^2 and more than 280 sunny days per year, ranks among the countries with the highest solar energy potential globally. This study aims to analyze the spatiotemporal variability of incoming shortwave radiation across western Iran and to identify regions with the greatest potential for solar energy development.

Methodology

In this study, MODIS satellite imagery was utilized to estimate and evaluate the amount, variation, and distribution of incoming shortwave solar radiation across five western provinces of Iran: Kurdistan, Kermanshah, Ilam, Hamedan, and Lorestan. Data were processed through quality control procedures, including outlier removal and homogeneity testing (using the Grubbs test and Standard Normal Homogeneity Test). Spatial and seasonal analyses were then conducted to determine the influence of environmental factors such as albedo, humidity, cloud cover, and topography on radiation distribution.

Results and Discussion

The findings indicate that the annual net shortwave radiation in western Iran varies between 665.03 and 728.45 kWh/m^2 . The highest radiation values were observed in elevated and low-cloud regions of the northwest—particularly around Saqqez, Baneh, and Kanisur—owing to high altitude, clear skies, and low surface albedo. In contrast, southern areas such as Ilam and Abadan received less radiation due to higher humidity and denser vegetation cover.

Seasonal analysis revealed that summer experiences the maximum radiation levels, especially in July and August when solar angles are at their peak and cloudiness is minimal. Spring shows an increasing trend in radiation but is still influenced by cloud formation and precipitation. Autumn radiation decreases with the arrival of Mediterranean frontal systems and increased cloudiness, while winter exhibits the lowest levels of solar radiation due to low solar angles, high albedo, and shorter daylight hours.

Overall, altitude, solar angle, relative humidity, and cloud cover were identified as the most influential factors controlling spatial variability in solar radiation. The topographic complexity of the Zagros Mountains and the influence of Mediterranean weather systems create significant spatial heterogeneity in radiation patterns across the region.

Conclusion

This research demonstrates that western Iran—particularly the elevated and cloud-free regions in the northwest—possesses substantial potential for solar power development. Conversely, southern parts of the study area require more detailed seasonal and climatic assessments due to higher humidity and cloudiness. The spatiotemporal analysis of incoming shortwave radiation provides valuable insights into the climatic dynamics of the

region and offers a scientific foundation for planning renewable energy development, managing natural resources, and mitigating climate change impacts. The integration of high-resolution satellite data with statistical homogeneity tests can further enhance the detection of long-term solar radiation trends and support sustainable energy planning in Iran.



ارزیابی تغییرات زمانی - مکانی تابش ورودی طول کوتاه در غرب ایران

محمود احمدی^{۱*}، محمد کمانگر^۲، زهرا احمدی مقدم^۳

۱. گروه دانشیار گروه آب و هواشناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

۲. دکتری گروه آب و هواشناسی، دانشکده علوم انسانی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

۳. کارشناس ارشد آب و هواشناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

چکیده

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۰/۰۸

آخرین ویرایش: ۱۴۰۵/۰۳/۱۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۳/۳۰

تابش ورودی طول کوتاه (SWR) به عنوان یکی از مؤلفه‌های بنیادی سامانه اقلیم زمین، نقش کلیدی در تنظیم تراز انرژی سطح زمین، کنترل فرایندهای اکولوژیکی و شکل‌دهی به الگوهای فعالیت‌های انسانی دارد. پژوهش حاضر با هدف بررسی تغییرات زمانی-مکانی این متغیر در غرب ایران طی دوره آماری ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۲ و با بهره‌گیری از داده‌ها و محصولات ماهواره‌ای، به تحلیل الگوهای فضایی و فصلی آن در استان‌های کردستان، کرمانشاه، ایلام، همدان و لرستان می‌پردازد. در این تحقیق از داده‌های سنجنده MODIS برای برآورد تابش خالص رسیده به سطح زمین استفاده شد و تحلیل‌های مکانی-زمانی در مقیاس منطقه‌ای انجام گرفت. نتایج نشان داد غرب ایران از نظر دریافت انرژی خورشیدی دارای ظرفیت بالایی است، به گونه‌ای که میانگین سالانه تابش در حدود ۱۸۰۰ تا ۲۲۰۰ کیلووات-ساعت بر متر مربع و بیش از ۲۸۰ روز آفتابی در سال برآورد می‌شود. از نظر توزیع مکانی، بیشینه مقادیر تابش در نواحی مرتفع و کم‌ابر شمال غرب کشور مشاهده شد، در حالی که نواحی جنوبی و جنوب غربی به دلیل رطوبت و پوشش ابری بیشتر، مقادیر پایین‌تری از تابش خالص را دریافت کردند. از منظر زمانی، الگوی فصلی نشان داد بیشترین تابش در تابستان و کمترین آن در زمستان رخ می‌دهد. این الگو عمدتاً ناشی از تغییرات زاویه تابش خورشید، طول روز، شرایط ابری، رطوبت و ناهمواری‌های توپوگرافی است. در مجموع، غرب ایران به ویژه ارتفاعات زاگرس دارای ظرفیت قابل توجهی برای توسعه انرژی خورشیدی بوده و نتایج این مطالعه می‌تواند در برنامه‌ریزی توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر و مدیریت پایدار منابع انرژی مورد استفاده قرار گیرد.

واژگان کلیدی:

تابش خورشیدی، موج کوتاه، مادیس، غرب ایران

maliheerfani@uoz.ac.ir

* نویسنده مسئول



کپی‌رایت © ۲۰۲۶، انتشارات دانشگاه تربیت مدرس (TMU Press). این مقاله به صورت دسترسی آزاد منتشر شده است و تحت مجوز بین‌المللی Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 قرار دارد. براساس این مجوز، شما می‌توانید این مطلب را در هر قالب و رسانه‌ای کپی، بازنشر و بازآفرینی کنید و یا آن را ویرایش و بازسازی نمایید، به شرط آنکه نام نویسنده را بیاورید و از آن برای مقاصد غیر تجاری استفاده کنید.

۱. مقدمه

تابش ورودی طول موج کوتاه (Shortwave Radiation - SWR) یکی از مهم‌ترین اجزای بودجه انرژی سطح زمین محسوب می‌شود و نقش کلیدی در تنظیم تعادل انرژی، کنترل فرآیندهای اقلیمی، چرخه‌های هیدرولوژیکی، بهره‌وری اکوسیستم‌ها، کشاورزی و حتی تقاضای انرژی ایفا می‌کند (Wang et al., 2025). این مؤلفه بنیادی از سیستم اقلیم زمین، عامل اصلی تبادل انرژی بین خورشید و سطح زمین است و تغییرات آن می‌تواند به‌طور مستقیم بر دمای سطح، تبخیر و تعرق، رطوبت خاک و الگوهای بارش اثرگذار باشد. تغییرات زمانی و مکانی SWR نتیجه برهم‌کنش پیچیده‌ای از عوامل طبیعی مانند چرخه‌های خورشیدی، هندسه زمین-خورشید، زاویه تابش و شرایط ابری، و همچنین عوامل انسانی نظیر تغییر کاربری اراضی، تغییر آلودگی، انتشار ذرات معلق و تغییرات اقلیمی است (Kefayat Motlagh et al., 2024; Stamatis et al., 2024). در دهه‌های اخیر، افزایش تقاضای جهانی انرژی و نگرانی‌های زیست‌محیطی ناشی از مصرف سوخت‌های فسیلی، توجه پژوهشگران و سیاست‌گذاران را به سمت انرژی‌های تجدیدپذیر به‌ویژه انرژی خورشیدی معطوف کرده است. انرژی خورشیدی به عنوان پاک‌ترین و در دسترس‌ترین منبع انرژی، نقش مهمی در کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و دستیابی به توسعه پایدار دارد. ایران به دلیل موقعیت جغرافیایی خاص، قرارگیری در کمربند خشک و نیمه‌خشک جهان، برخورداری از بیش از ۲۸۰ روز آفتابی در سال و میانگین تابش سالانه بین ۱۸۰۰ تا ۲۲۰۰ کیلووات‌ساعت بر مترمربع، یکی از کشورهای دارای پتانسیل بسیار بالا در بهره‌برداری از انرژی خورشیدی محسوب می‌شود (Kazemi et al., 2024). این ویژگی‌ها اهمیت بررسی دقیق الگوهای تابشی در مقیاس‌های مکانی و زمانی را دوچندان می‌کند.

از منظر فیزیکی، تابش خورشیدی ورودی شامل طیفی از امواج الکترومغناطیسی با طول موج تقریباً ۰.۲ تا ۴ میکرومتر است که شامل بخش‌های فرابنفش، مرئی و فروسرخ نزدیک می‌باشد (Ávila et al., 2010). این تابش در سطح زمین ثابت نیست و در مقیاس‌های زمانی روزانه، فصلی و سالانه و همچنین در مقیاس مکانی، تغییرات قابل توجهی نشان می‌دهد. مهم‌ترین عامل این تغییرات، هندسه حرکت زمین به دور خورشید و انحراف محوری آن است که موجب ایجاد چرخه‌های فصلی در توزیع انرژی خورشیدی می‌شود (Zhou et al., 2021). در نتیجه، میزان تابش در تابستان در هر نیمکره به حداکثر و در زمستان به حداقل می‌رسد (Kaufmann & Williamson, 2022). علاوه بر تغییرات زمانی، تابش ورودی طول موج کوتاه دارای ناهمگونی مکانی قابل توجهی است که تحت تأثیر عرض جغرافیایی، ارتفاع، شرایط توپوگرافی، ویژگی‌های سطح زمین و شرایط جوی قرار دارد (Tikhomirov et al., 2005). این ناهمگونی‌ها پیامدهای مهمی برای سیستم‌های اقلیمی، تولیدات کشاورزی و الگوهای مصرف انرژی دارند (Scaife & Haigh, 2021). بنابراین، شناخت دقیق رفتار این متغیر برای مدل‌سازی اقلیمی، برنامه‌ریزی انرژی خورشیدی و مدیریت منابع طبیعی ضروری است. مطالعات جهانی نشان می‌دهند که تغییرات تابش خورشیدی نقش مهمی در نوسانات اقلیمی دارد (Shapiro et al., 2005). نشان دادند که تغییرات خورشیدی می‌تواند سهم قابل توجهی در گرمایش مشاهده‌شده قرن اخیر داشته باشد. همچنین Hay et al. (2010) در یک مرور جامع، علل تغییرپذیری تابش خورشیدی شامل تغییرات خروجی خورشید، شرایط

مداری زمین و ویژگی‌های جو را بررسی کردند. در مناطق قطبی، Shapiro et al. (۲۰۱۱) نشان دادند که تغییرات تابش بسیار شدیدتر از سایر مناطق است، به‌ویژه در فصل زمستان. در مناطق مرتفع مانند فلات تبت نیز، Li et al. (۲۰۱۵) تغییرات شدید مکانی تابش را ناشی از پیچیدگی توپوگرافی گزارش کردند. در ارتباط با پیامدهای کاربردی، Zhao et al. (۲۰۲۱) نشان دادند که افزایش تابش ورودی می‌تواند الگوهای مصرف انرژی را در بخش‌های مختلف اقتصادی تغییر دهد. در سطح جهانی نیز Aghaee et al. (۲۰۲۳) روند افزایشی تابش ورودی طول موج کوتاه را طی دوره ۱۹۸۰ تا ۲۰۲۰ گزارش کردند که با تغییرات اقلیمی، کاهش ابرناکی و تغییر در آئروسول‌های جوی مرتبط است. این روند می‌تواند پیامدهایی همچون افزایش دمای سطح زمین، تشدید خشکسالی و تغییر در چرخه‌های هیدرولوژیکی به همراه داشته باشد. در ایران، مطالعات متعددی به بررسی تابش خورشیدی پرداخته‌اند. نتایج نشان می‌دهد که تغییرات تابش به شدت تحت تأثیر عوامل جغرافیایی مانند ارتفاع، عرض جغرافیایی و ناهمواری‌ها قرار دارد (Ahmadi, 2012). در مناطق کوهستانی غرب ایران، به دلیل پیچیدگی توپوگرافی و تنوع پوشش زمین، نوسانات مکانی و زمانی تابش بیشتر مشاهده می‌شود. توسعه داده‌های ماهواره‌ای مانند MODIS و سایر محصولات سنجنش از دور، امکان تحلیل دقیق‌تر این تغییرات را فراهم کرده است (Karimi, 2021). همچنین تغییرات اقلیمی با اثرگذاری بر پوشش ابری و ویژگی‌های سطح زمین، نقش مهمی در تغییرات تابش دارد (Soltani, 2016).

مطالعات اخیر در ایران نشان داده‌اند که روند تابش ورودی در بسیاری از مناطق کشور افزایشی بوده است. برای مثال، Shayeesteh et al. (۲۰۱۸) گزارش کردند که تابش خورشیدی در دوره ۱۹۵۱ تا ۲۰۱۶ به‌طور متوسط حدود ۲.۲ درصد افزایش یافته است، به‌ویژه در مناطق غربی و جنوب‌غربی کشور. این روند احتمالاً ناشی از کاهش پوشش ابری، تغییرات گردش جوی و ویژگی‌های توپوگرافی منطقه است. همچنین Ghanqarameh et al. (۲۰۲۲) تغییرات مدت ساعات آفتابی را تحت سناریوهای تغییر اقلیم بررسی کردند و اهمیت تابش خورشیدی را در برنامه‌ریزی انرژی برجسته ساختند. Motamedi et al. (۲۰۲۳) نیز ارتباط بین چرخه‌های خشک و مرطوب و تابش ورودی را در سطح کشور مورد بررسی قرار دادند و ناهمگونی مکانی قابل توجهی را گزارش کردند.

با وجود این مطالعات، هنوز شکاف‌های تحقیقاتی مهمی در زمینه تحلیل دقیق تغییرات زمانی-مکانی تابش ورودی در مقیاس منطقه‌ای، به‌ویژه در غرب ایران وجود دارد. منطقه زاگرس به دلیل شرایط پیچیده توپوگرافی، اقلیم مدیترانه‌ای و حساسیت بالا به تغییرات اقلیمی، یکی از مناطق کلیدی برای بررسی دقیق تغییرات تابشی محسوب می‌شود. با این حال، مطالعات موجود اغلب در مقیاس ملی انجام شده‌اند و جزئیات مکانی کافی برای تحلیل‌های کاربردی ارائه نمی‌دهند (Kazemi et al., 2024). از سوی دیگر، مطالعات جدید نشان داده‌اند که کاهش آلودگی سطح زمین نقش مهمی در افزایش جذب تابش و تشدید گرمایش منطقه‌ای دارد (Kefayat Motlagh et al., 2024). همچنین Stamatis et al. (۲۰۲۴) بیان کردند که پدیده brightening جهانی در دهه‌های اخیر ناشی از تغییرات آئروسول‌ها و کاهش آلودگی جوی

آمایش فضا و ژئوماتیک

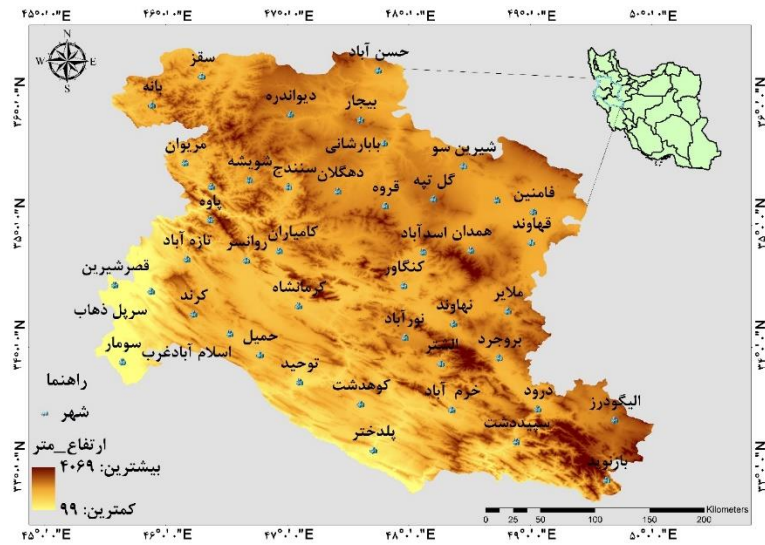
است. Haywood et al. (۲۰۲۵) نیز بر وجود عدم قطعیت‌های مهم در تغییرات تابش و نقش آن در مداخلات اقلیمی تأکید کرده‌اند.

بنابراین، هدف این پژوهش بررسی تغییرات زمانی- مکانی تابش ورودی طول موج کوتاه در غرب ایران با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای MODIS است. اهداف اصلی شامل: (۱) ترسیم توزیع مکانی تابش خالص، (۲) تحلیل تغییرات فصلی، (۳) شناسایی مناطق مستعد برای توسعه انرژی خورشیدی، می‌باشد. در مجموع، این پژوهش با تمرکز بر یکی از مناطق حساس اقلیمی ایران، تلاش می‌کند شکاف موجود در مطالعات منطقه‌ای تابش خورشیدی را پر کرده و زمینه‌ای برای بهبود برنامه‌ریزی انرژی‌های تجدیدپذیر، مدیریت منابع آب و سازگاری با تغییرات اقلیمی فراهم سازد.

داده و روش تحقیق

معرفی محدوده مورد مطالعه

محدوده مطالعه شامل استان‌های کردستان، کرمانشاه، ایلام، همدان و لرستان با مساحتی در حدود ۶۶۶,۱۲۱ کیلومتر مربع است که بین عرض‌های جغرافیایی ۳۶°۵۱'۳۱" تا ۴۵°۴۹'۳۶" شمالی و طول‌های ۴۵°۲۷'۱۸" تا ۴۵°۰۴'۲۶" شرقی واقع شده است. این منطقه به‌عنوان بخش مهمی از زاگرس، از نظر دریافت و توزیع تابش ورودی طول موج کوتاه (Shortwave Radiation - SWR) دارای ناهمگونی مکانی قابل توجهی است که عمدتاً ناشی از تنوع شدید توپوگرافی، اختلاف ارتفاع و تغییرات کاربری اراضی می‌باشد. از نظر اقلیمی، بر اساس طبقه‌بندی کوپن- گایگر، بخش‌های مرتفع شمالی و مرکزی منطقه دارای اقلیم مدیترانه‌ای هستند، در حالی که نواحی جنوبی و جنوب‌غربی به اقلیم نیمه‌خشک و گرم تعلق دارند. این تنوع اقلیمی موجب ایجاد الگوهای متفاوت در میزان دریافت تابش خورشیدی در سطح زمین شده است، به‌گونه‌ای که در مناطق مرتفع به دلیل دمای پایین‌تر، آلبیدوی سطحی و پوشش ابری بیشتر، بخشی از تابش ورودی بازتاب یا تضعیف می‌شود، در حالی که در نواحی کم‌ارتفاع و خشک، به دلیل آسمان صاف‌تر، شدت تابش ورودی طول موج کوتاه بالاتر است. از منظر دینامیک جوی، اقلیم منطقه تحت تأثیر سامانه‌های جوی مدیترانه‌ای و جریان‌های غربی اقیانوس اطلس قرار دارد. این سامانه‌ها در فصل سرد سال با عبور از روی ارتفاعات زاگرس باعث افزایش ابرناکی و بارش می‌شوند، که این امر به‌طور مستقیم موجب کاهش تابش خالص ورودی (Net SWR) از طریق افزایش بازتاب و کاهش عبور تابش خورشیدی می‌گردد. در مقابل، در فصل گرم سال، استقرار پرفشار جنب‌حاره‌ای آזור و کاهش فعالیت سامانه‌های بارشی، شرایط آسمان صاف را غالب کرده و موجب افزایش قابل توجه تابش ورودی طول موج کوتاه در سطح زمین می‌شود. توپوگرافی پیچیده زاگرس شامل چین‌خوردگی‌های تاقدیسی و ناودیسی، دشت‌های میان‌کوهی و ارتفاعات متغیر است که نقش مهمی در تنظیم الگوهای مکانی تابش خورشیدی ایفا می‌کند. تغییرات ارتفاعی باعث تغییر در ضخامت جو، مسیر عبور تابش و میزان پراکندگی و جذب آن می‌شود، به‌طوری‌که مناطق مرتفع‌تر معمولاً تابش مستقیم بیشتری دریافت می‌کنند، اما به دلیل افزایش پوشش ابری و اثرات توپوگرافی، نوسانات مکانی بیشتری نیز تجربه می‌کنند. در مجموع، ترکیب عوامل اقلیمی (سامانه‌های مدیترانه‌ای و جنب‌حاره‌ای)، عوامل توپوگرافی (ارتفاع و ناهمواری)، و شرایط سطح زمین (آلبیدو و کاربری اراضی) موجب شده است که این منطقه یکی از مناطق کلیدی برای مطالعه تغییرات زمانی- مکانی تابش ورودی طول موج کوتاه در ایران محسوب شود.



شکل ۱- موقعیت محدوده مورد مطالعه در ایران.

Figure 1. Location of the study area in Iran

در این پژوهش، از محصولات سنجنده MODIS به عنوان داده‌های پایه برای تحلیل تابش ورودی طول موج کوتاه (SWR) استفاده شد. این داده‌ها به صورت سری زمانی ماهواره‌ای و با توان تفکیک مکانی مناسب، امکان بررسی تغییرات مکانی-زمانی تابش خورشیدی را در مقیاس منطقه‌ای فراهم می‌کنند. پیش‌پردازش، استخراج و تحلیل داده‌های MODIS در محیط Google Earth Engine (GEE) انجام شد. در این چارچوب، ابتدا مجموعه تصاویر ماهواره‌ای انتخاب و بر اساس محدوده مطالعه برش داده شد. سپس عملیات پردازش سری زمانی شامل تجمیع زمانی (temporal accumulation) و محاسبه مقادیر تجمعی تابش با استفاده از الگوریتم‌های مبتنی بر تکرار (iteration) بر روی تصاویر انجام گرفت. خروجی‌ها شامل سری زمانی تابش و نقشه‌های تجمعی تولیدشده از تصاویر ماهواره‌ای بود.

در این چارچوب، ابتدا مجموعه تصاویر MODIS انتخاب و بر اساس محدوده مطالعه برش مکانی داده شد. برای تجمیع زمانی و محاسبه تابش تجمعی، از رابطه یک استفاده شد:

$$S_{cum}(t) = \sum_{i=1}^t S_i \quad (1)$$

که در آن S_i مقدار تابش در زمان t و $S_{cum}(t)$ تابش تجمعی تا زمان t است (Li et al., 2014). همچنین میانگین زمانی تابش برای هر پیکسل به صورت رابطه ۲ محاسبه شد:

$$\bar{S} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n S_i \quad (2)$$

که در آن n تعداد مشاهدات در دوره مطالعه است. برای تحلیل روند تغییرات زمانی از شیب خط روند خطی استفاده شد:

$$S(t) = a + bt \quad (3)$$

آمایش فضا و ژئوماتیک

که در آن b نشان‌دهنده نرخ تغییر تابش در طول زمان است. (Hulme et al., 1992)
به منظور کنترل کیفیت داده‌ها نیز، آزمون داده‌های پرت با استفاده از آزمون گرابس طبق رابطه ۴ انجام شد:

$$G = \frac{\max|x_i - \bar{x}|}{s} \quad (۴)$$

که در آن \bar{x} میانگین و S انحراف معیار داده‌ها است. (Grubbs, 1968)
همچنین برای بررسی همگنی سری‌های زمانی از آزمون همگنی نرمال استاندارد (SNHT) استفاده شد که آماره آن به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$T_0 = \max_{1 \leq a < n} [a\bar{Z}_1^2 + (n-a)\bar{Z}_2^2] \quad (۵)$$

که در آن \bar{Z}_1 و \bar{Z}_2 میانگین‌های استاندارد شده در دو زیر دوره زمانی هستند. (Alexandersson, 1986)

در این پژوهش، جهت تحلیل فصلی تابش در تقسیم‌بندی فصول بر اساس تقویم استاندارد اقلیمی و سازگار با الگوی گردش سالانه انرژی خورشیدی انجام شد. بر این اساس، فصل بهار شامل ماه‌های مارس، آوریل و می (March-May)، فصل تابستان شامل ژوئن، جولای و آگوست (June-August)، فصل پاییز شامل سپتامبر، اکتبر و نوامبر (September-November) و فصل زمستان شامل دسامبر، ژانویه و فوریه (December-February) در نظر گرفته شد. این طبقه‌بندی به دلیل همخوانی با چرخه سالانه تغییرات زاویه تابش خورشید و الگوهای غالب گردش عمومی جو، به‌طور گسترده در مطالعات اقلیمی و انرژی‌های خورشیدی مورد استفاده قرار گرفته و امکان مقایسه‌پذیری نتایج با مطالعات مشابه در سطح منطقه‌ای و جهانی را فراهم ساخت.

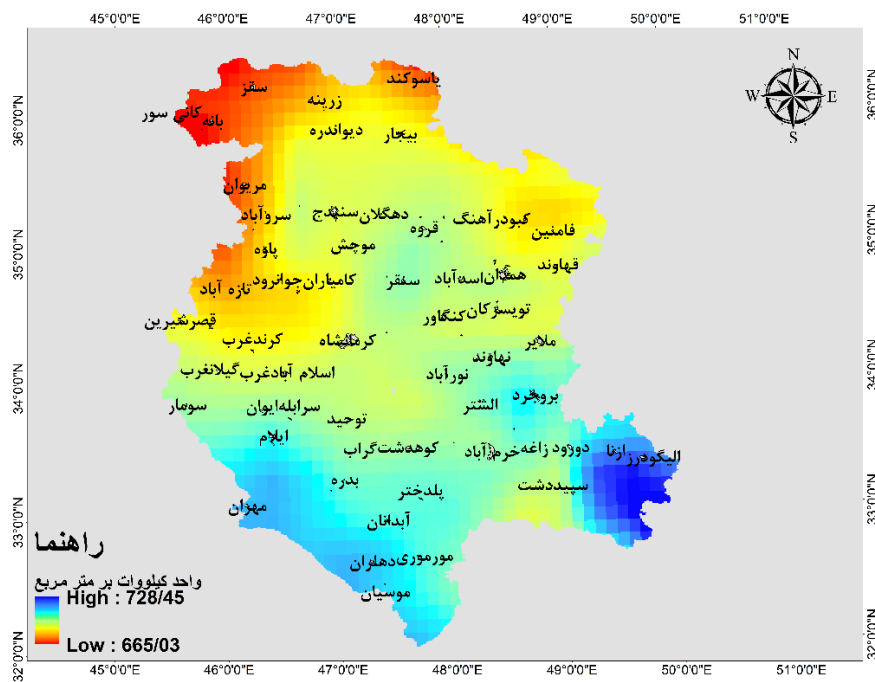
نتایج و بحث

نقشه میانگین کل مقدار خالص انرژی تابش خورشیدی رسیده به سطح زمین در شکل (۲) آورده شده است. این متغیر تابش خورشیدی خالص را محاسبه می‌کند، یعنی مقدار تابش خورشیدی ورودی (هم تابش مستقیم و هم پخش شده) منهای مقدار بازتابی که توسط سطح زمین برگردانده می‌شود (وابسته به آلبدو).

میزان تابش خورشیدی در ایران بین ۱۸۰۰ تا ۲۲۰۰ کیلو وات ساعت بر متر مربع در سال تخمین زده شده است، که البته بالاتر از میزان متوسط جهانی است. روزانه ۴/۵ تا ۵/۵ کیلو وات ساعت انرژی خورشیدی بر هر متر مربع در روز بر آورد شده است. به طور متوسط سالیانه بین ۲۸۰ تا ۳۰۰ روز آفتابی است. حدوداً ۱۰ ماه (ابر مهندسی، ۱۳۹۹). میزان کل تابش خورشید در ایران در طول روز در ایران تقریباً برابر با ۹ میلیارد مگا وات ساعت است که اگر تنها از یک درصد از مساحت ایران با استفاده از سیستمی با راندمان ۱۰ درصد، انرژی خورشیدی جذب کنیم باز هم می‌توانیم روزانه ۹ میلیون مگا وات ساعت انرژی خورشیدی دریافت کنیم (دهقان، ۱۳۹۶). انرژی حاصل از یک ساعت تابش خورشید معادل مصرف یک سال برق در جهان است (ابر مهندسی، ۱۳۹۹). مقادیر تابش خورشیدی سالانه بین ۶۶۵.۰۳ تا ۷۲۸.۴۵ کیلووات بر متر مربع قرار دارد. این بازه مقادیر، برای تحلیل‌های آب و هوایی و ارزیابی پتانسیل استفاده از انرژی خورشیدی مفید است. مقادیر بالاتر تابش در مناطق قرمز نشان‌دهنده امکان استفاده موثر از پنل‌های خورشیدی است.

بر اساس الگوی توزیع تابش خورشیدی، مناطق شمال غربی ایران مانند بانه، سقز، و پایانه کانی‌سور بالاترین مقادیر تابش خورشیدی را دارند که با رنگ‌های قرمز و نارنجی در نقشه مشخص شده‌اند. این مناطق به دلیل موقعیت جغرافیایی، کمترین میزان ابر و رطوبت را تجربه می‌کنند. همچنین این مناطق در فصل‌های مختلف سال ممکن است تابش بیشتری

دریافت کنند، به ویژه در تابستان که زاویه تابش خورشید بیشتر است و روزها طولانی ترند. مناطق جنوبی تر مثل ایلام، آبادان، دهلران، و مهران مقادیر تابش خورشیدی کمتری را تجربه می کنند که با رنگ های آبی و سبز نشان داده شده اند. این مناطق معمولاً با پوشش گیاهی بیشتر، رطوبت و حتی احتمال بارش های بیشتر روبرو هستند. از طرف دیگر، شرایط جغرافیایی و ارتفاعات کمتر نسبت به مناطق کوهستانی شمال غرب می تواند تابش خورشیدی را کاهش دهد. ارتفاعات بالاتر مانند مناطق کوهستانی در شمال غربی ایران (نواحی سقز و بانه) به دلیل ارتفاع بیشتر از سطح دریا، تابش خورشیدی بیشتری دریافت می کنند. در این مناطق، لایه های جوی نازک تر هستند و احتمالاً ابرهای کمتری در آسمان وجود دارد، که باعث افزایش میزان تابش خورشیدی می شود. همانطور که به سمت جنوب نقشه حرکت می کنیم، به دلیل نزدیکی به خط استوا، تابش خورشیدی به صورت معمولی باید بیشتر باشد. با این حال، شرایط محیطی و اقلیمی، مانند رطوبت بیشتر، پوشش ابری و پدیده های جوی خاص در این مناطق، مقدار تابش خورشیدی خالص را کاهش داده اند. به عنوان مثال، مناطقی مانند ایلام و آبادان به دلیل داشتن رطوبت بالا، احتمالاً بازتاب بیشتری از تابش خورشیدی دارند.



شکل ۲- نقشه میانگین کل مقدار خالص انرژی تابش خورشیدی رسیده به سطح زمین.

Figure 2. Map of the average total net amount of solar radiation energy reaching the Earth's surface.

آمایش فضا و ژئوماتیک

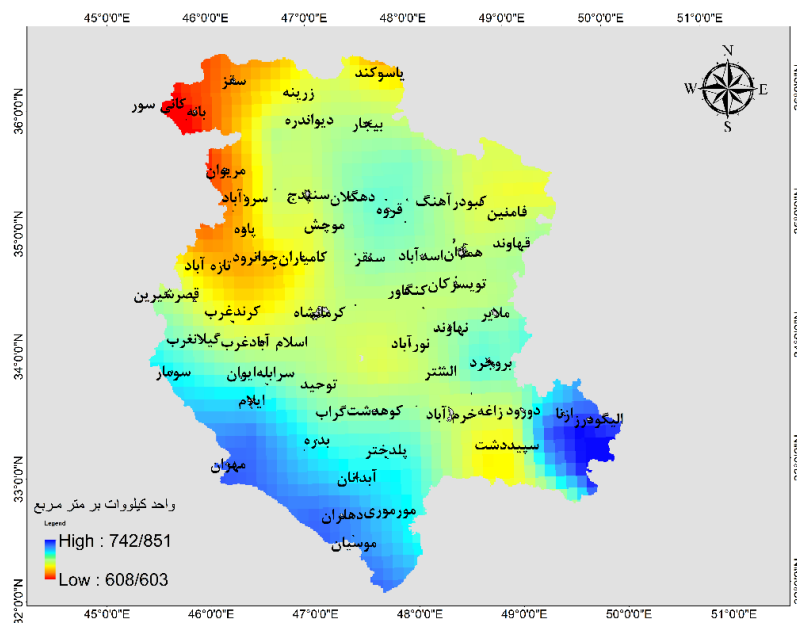
آلبیدو (ضریب بازتاب سطح زمین) در تعیین مقدار تابش خورشیدی نقش مهمی دارد. مناطق با پوشش گیاهی کمتر، مانند نواحی کوهستانی و دشت‌های بیابانی، معمولاً تابش خورشیدی بیشتری جذب می‌کنند و آلبیدوی پایین‌تری دارند. این می‌تواند یکی از دلایل تابش بالاتر در مناطق غربی و شمال غربی ایران باشد. از سوی دیگر، در مناطقی با پوشش گیاهی بیشتر و رطوبت بالا، مثل نواحی جنوبی و جنوب غربی، آلبیدوی بیشتری وجود دارد که به دلیل بازتاب بیشتر تابش خورشیدی، مقادیر تابش خالص را کاهش می‌دهد. نواحی شمال غربی ایران مانند سقز و بانه به دلیل تابش خورشیدی بالاتر، پتانسیل بیشتری برای نیروگاه‌های خورشیدی دارند، در حالی که نواحی جنوبی مانند ایلام و مهران ممکن است نیاز به تجزیه و تحلیل دقیق‌تر برای استفاده از انرژی خورشیدی داشته باشند. مطالعات بیشتر در خصوص تغییرات فصلی تابش خورشیدی در این مناطق می‌تواند دید بهتری نسبت به پتانسیل استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر و تأثیرات تغییرات اقلیمی در این منطقه ارائه دهد. در ادامه به بررسی وضعیت تابش خورشیدی به صورت فصلی در غرب ایران پرداخته می‌شود.

مقادیر تابش خورشیدی در غرب ایران، به‌ویژه در فصل بهار، بسته به شرایط اقلیمی متغیر است، اما به‌طور کلی در این فصل تابش متوسطی دریافت می‌شود. در فصل بهار به ویژه در ماه‌های ابتدایی (فروردین و اردیبهشت)، همچنان بارندگی و ابرناکی در برخی از مناطق غربی مشاهده می‌شود که می‌تواند بر کاهش تابش خورشیدی تأثیر بگذارد. در طول بهار، روزها به تدریج طولانی‌تر می‌شوند و این موضوع باعث افزایش کل تابش خورشیدی دریافتی می‌شود. زاویه تابش خورشید در فصل بهار نسبت به زمستان بیشتر است و این امر باعث افزایش مقدار انرژی خورشیدی دریافتی می‌شود. مناطقی که در ارتفاع بالاتری قرار دارند، مانند سنندج و همدان، به دلیل رقیق‌تر بودن هوا تابش خورشیدی بیشتری دریافت می‌کنند. در استان کرمانشاه در فصل بهار با افزایش ارتفاع خورشید، میزان تابش بیشتری به سطح زمین می‌رسد. بیشترین مقدار تابش دریافتی در ماه خرداد به ۴۲ مگا ژول بر متر مربع در ایستگاه‌های کنگاور (با ارتفاع ۱۶۶۸ متر) و روانسر (با ارتفاع ۱۳۷۹ متر) می‌رسد. کمترین مقدار همین ماه، یعنی ماه خرداد مربوط به ایستگاه اسلام آباد غرب به مقدار ۳۲ مگا ژول است. دلیل وقوع بیشینه‌ی تابش در حوالی کنگاور و روانسر، ارتفاع بیشتر این مناطق در مقایسه با مناطق اطراف است که موجب افزایش تابش مستقیم می‌شود (مجرد و همکاران، ۱۳۹۴). در استان کردستان در فصل بهار با افزایش ارتفاع خورشید، میزان تابش بیشتری به سطح زمین می‌رسد. بیشترین مقدار تابش دریافتی در فصل بهار در شهرهای قروه (با ارتفاع ۱۹۰۰ متر) ۶۲۴ و کامیاران (با ارتفاع ۱۶۴۹ متر) ۶۱۷ مگا ژول بر متر مربع است. کمترین مقادیر انرژی دریافتی هم مربوط به شمال استان و به خصوص شهر بانه (با ارتفاع ۱۵۴۰ متر) به مقدار ۵۶۶ مگا ژول بر متر مربع می‌باشد (قمرنیا و یگانه مقدم، ۱۳۹۸).

در استان ایلام با افزایش دما و طول روزها، تابش خورشیدی در این استان به تدریج به حداکثر خود نزدیک می‌شود. در استان لرستان متوسط تابش فصل بهار ۸۲۵۳.۴ وات بر متر مربع می‌باشد. در پهنه بندی انرژی تابشی رسیده به سطح زمین، مناطق مختلف استان به ۴ ناحیه تقسیم شده است. کمترین تابش رسیده مربوط به ناحیه ۱ شامل مناطقی از مرکز خرم آباد و شهر نورآباد با ۷.۶ درصد می‌باشند. در این ناحیه حداکثر تابش رسیده ۸۰۹۷.۸ و کمترین ۷۹۴۲.۱ وات بر متر مربع با دامنه تغییرات ۱۵۵.۷ است (شکل ۳). بیشترین سهم انرژی تابشی رسیده به سطح زمین را ناحیه ۴ در بر می‌گیرد که ۳۶.۴ درصد از مساحت کل استان را پوشش داده و شامل شهرهای ازنا، الگودرز و کوهدشت است (اکبری و همکاران، ۱۳۹۷).

در استان همدان به دلیل ارتفاع بالا و شرایط جوی کوهستانی، روزهای آفتابی بهاری این منطقه با تابش خورشیدی

مناسبی همراه است. در غرب ایران، به‌ویژه در بهار، میزان ابرناکی و بارندگی‌ها می‌تواند به‌طور چشمگیری تابش خورشیدی را کاهش دهد. ابرها با جلوگیری از رسیدن مستقیم پرتوها به سطح زمین، مقادیر تابش را تحت تأثیر قرار می‌دهند. میزان رطوبت و بارندگی نیز از دیگر عوامل کلیدی هستند که به تغییرات تابش خورشیدی کمک می‌کنند. در فصول بارانی، با افزایش رطوبت و ابری بودن هوا، تابش کاهش می‌یابد. در فصل بهار، به دلیل زاویه پایین‌تر خورشید در افق نسبت به تابستان، میزان تابش نسبتاً کمتر است، اما با نزدیک شدن به تابستان، زاویه تابش بهینه‌تر می‌شود. عوامل تأثیرگذار بر تابش خورشیدی در بهار شامل میزان ابر، جهت‌گیری زمین، و نزدیکی به رشته کوه‌های زاگرس است. در این فصل، با افزایش دما و کاهش رطوبت، مقادیر تابش خورشیدی به تدریج افزایش می‌یابد. مناطق با ارتفاعات بالاتر، مانند برخی نقاط در استان کردستان، ممکن است مقادیر بیشتری از تابش خورشیدی دریافت کنند. استان‌های کرمانشاه و ایلام به دلیل موقعیت جغرافیایی و اقلیمی خود، تابش متوسطی را در بهار تجربه می‌کنند. این شرایط باعث می‌شود که ظرفیت تولید انرژی خورشیدی در این مناطق نسبت به فصول گرم‌تر، کمی محدودتر باشد. اما با وجود این عوامل، باز هم انرژی خورشیدی در غرب ایران قابل توجه است و قابل بهره‌برداری برای پروژه‌های انرژی تجدیدپذیر می‌باشد (شکل ۳).

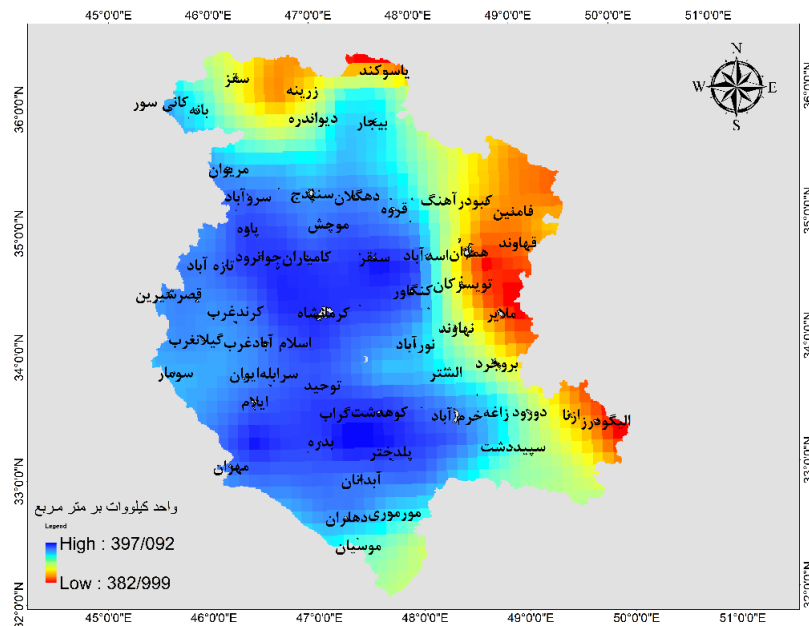


شکل ۳- مقادیر تابش خورشیدی در غرب ایران در فصل بهار.

Figure 3. Solar radiation values in western Iran in spring

آمایش فضا و ژئوماتیک

در تابستان، میزان تابش خورشیدی در غرب ایران نسبت به فصل‌های دیگر بسیار بالا است (شکل ۴). این افزایش تابش به دلیل آسمان بدون ابر در این منطقه رخ می‌دهد. به‌طور کلی، مناطقی که ارتفاع بیشتری دارند، به دلیل زاویه تابش خورشید، تابش بیشتری دریافت می‌کنند، اما ابرناکی کمتر، نقش اصلی در افزایش تابش تابستانی دارد. مطالعات نشان می‌دهد که در غرب ایران به دلیل کاهش میزان ابر و عدم وجود بارش، تابش خورشیدی به حداکثر مقدار خود می‌رسد، به ویژه در ماه‌های تیر و مرداد که زاویه تابش خورشید در حداکثر حالت است. در تابستان، مقادیر تابش خورشیدی در مناطق خاصی از غرب ایران متفاوت است. در استان کرمانشاه تابش خورشیدی به دلیل ارتفاعات بالا و قرارگیری در زاگرس، مقدار قابل توجهی دریافت می‌شود. در فصل تابستان و پس از حداکثر ارتفاع خورشید در اول تیرماه، ارتفاع خورشید و مقدار تابش دریافتی رفته رفته کاهش می‌یابد، تا اینکه در ماه مرداد بیشترین مقدار تابش دریافتی سطح زمین به مانند ماه خرداد در ایستگاه‌های کنگاور و روانسر به مقدار ۴۲ مگا ژول بر متر مربع رخ می‌دهد که علت آن دریافت تابش مستقیم در این ایستگاه‌هاست. کمترین مقدار تابش این ماه در اسلام‌آباد غرب به ۳۲ مگا ژول بر متر مربع می‌رسد (مجرد و همکاران، ۱۳۹۴). در استان ایلام به دلیل نزدیکی به عرض‌های جغرافیایی جنوبی‌تر و ارتفاعات متوسط، ایلام نیز تابش خورشیدی بالایی دارد. شرایط نیمه‌خشک منطقه باعث افزایش جذب تابش خورشیدی می‌شود. در استان کردستان: کردستان که به ارتفاعات زاگرس نزدیک است، تابش نسبتاً کمتری دارد، اما همچنان مقادیر قابل توجهی از تابش خورشیدی در ماه‌های تابستان دریافت می‌کند. در فصل تابستان قسمتی از شمال غربی استان در شهرستان بانه و شهرستان قروه در جنوب استان بیشترین مقدار انرژی تابشی خورشید را دریافت می‌کنند (شکل ۴). کمترین مقدار انرژی دریافتی در شهرستان بیجار است (قمرنیا و یگانه مقدم، ۱۳۹۸). در استان لرستان در فصل تابستان متوسط تابش رسیده به سطح زمین ۹۳۵۰.۶ وات بر متر مربع می‌باشد. کمترین تابش مربوط به ناحیه ۱ با مساحت پوششی ۶.۳ می‌باشد که تنها نیمه شمالی شهر نورآباد (طبق پهنه بندی مقاله مذکور) بر طبق پهنه بندی شامل این ناحیه است. که یکی از دلایل آن را می‌توان به بیشترین درصد پوشش ابرناکی آسمان در این فصل دانست. ناحیه ۴ با ۱۸۸ درصد تنها شامل کوه‌دشت و شمال بروجرد با متوسط تابش ۹۵۸۷.۶ وات بر متر مربع است و در این فصل مترین میزان پوشش ابرناکی را داراست (اکبری و همکاران، ۱۳۹۷). در استان همدان تابش خورشیدی در همدان در تابستان به دلیل ارتفاع بالای این شهر نسبتاً زیاد است. به دلیل آب و هوای نسبتاً خنک‌تر نسبت به سایر مناطق غربی، مقادیر تابش خورشیدی کمی پایین‌تر است.



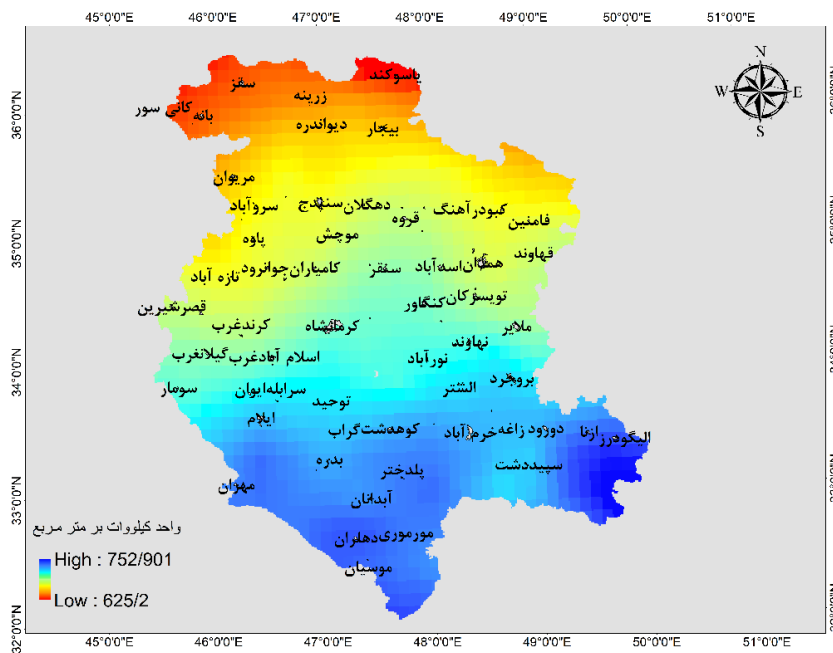
شکل ۴- مقادیر تابش خورشیدی در غرب ایران در فصل تابستان.

Figure 4. Solar radiation values in western Iran in the summer

عوامل اصلی تأثیرگذار بر تابش خورشیدی در پایین شامل تغییرات زاویه تابش خورشید، افزایش ابرناکی و سیستم‌های جوی حاکم نظیر فعالیت‌های مدیترانه‌ای و بادهای غربی، حضور سامانه‌های کم فشار و افزایش ابرناکی به ویژه در مناطق غربی، سبب کاهش میزان تابش خورشیدی می‌شود. همچنین، سامانه‌های بارشی و جبهه‌های سرد که از سمت دریای مدیترانه وارد می‌شوند، تابش را تحت تأثیر قرار می‌دهند. در فصل پاییز، مقادیر تابش خورشیدی در غرب ایران به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد، اما همچنان در برخی مناطق خاص مثل کرمانشاه، ایلام، و کردستان تفاوت‌هایی وجود دارد. تابش خورشیدی در این مناطق به دلیل شرایط اقلیمی و جغرافیایی متغیر است (شکل ۵). در استان کرمانشاه این منطقه به دلیل ارتفاعات زاگرس، در پاییز تابش خورشیدی متوسطی در روز دارد. سیستم‌های کم‌فشار مدیترانه‌ای و افزایش ابرناکی از دلایل اصلی کاهش تابش هستند. در استان ایلام این استان به دلیل مجاورت با مرزهای غربی و تحت تأثیر سیستم‌های بارشی از دریای مدیترانه، تابش خورشیدی کمتری نسبت به سایر مناطق دریافت می‌کند. در استان کردستان به دلیل ارتفاعات بالاتر و تأثیر بادهای غربی، کردستان نیز در پاییز مقادیر تابش خورشیدی کمتری نسبت به تابستان دارد. استان کردستان در فصل پاییز بیشترین مقدار انرژی خورشیدی در شهرستان‌های قروه و کامیاران و کمترین مقدار را در نواحی شمالی استان دریافت می‌کند (قمرنیا و یگانه مقدم، ۱۳۹۸).

آمایش فضا و ژئوماتیک

در استان لرستان متوسط تابش در فصل پاییز ۵۱۲۸ وات بر متر مربع می‌باشد. ناحیه ۱ شامل شهرهای بروجرد و دورود است که ۱۸.۲ درصد از مساحت تابش دریافتی با مقدار متوسط ۶۶۹۰ وات بر متر مربع کمترین و ناحیه ۴ که کوچکترین ناحیه در این پهنه بندی که تنها ۱ درصد از مساحت کل استان را شامل می‌شود که باریکه کوچکی از مرز شرقی استان است بیشترین مقدار تابش دریافتی به متوسط ۵۵۶۶ را داراست (اکبری و همکاران، ۱۳۹۷). در استان همدان به دلیل ارتفاع بالا و شرایط خاص جوی در پاییز تابش خورشیدی کمتری نسبت به دیگر مناطق غربی ایران دارد (شکل ۵).

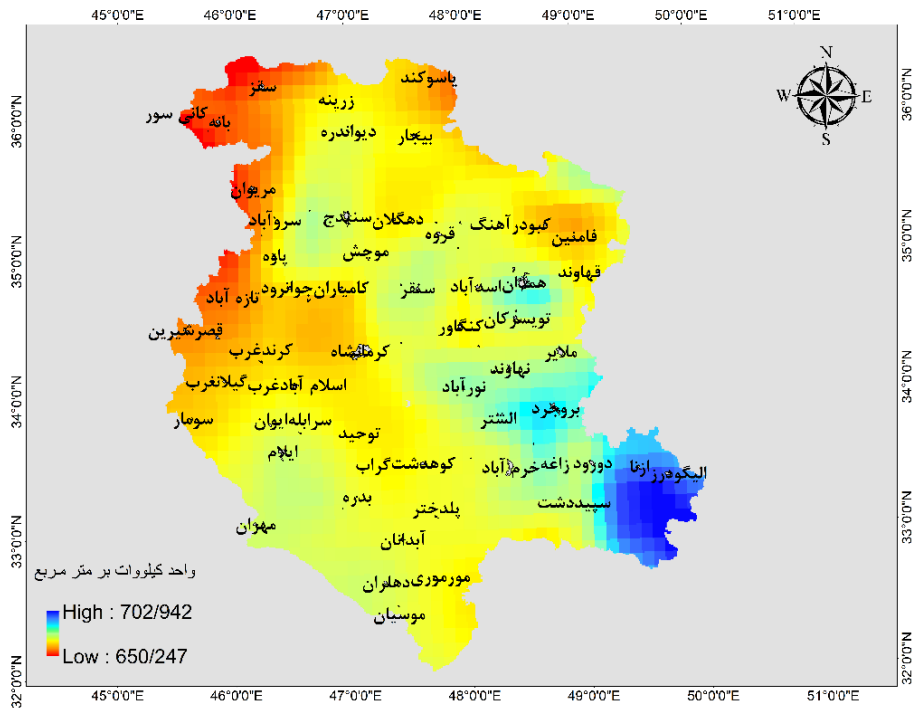


شکل ۵- مقادیر تابش خورشیدی در غرب ایران در فصل پاییز.

Figure 5. Solar radiation values in western Iran in autumn.

عواملی چون پوشش ابر، ارتفاع از سطح دریا، زاویه تابش خورشید، بارش، آلبیدو و طول روز در فصل زمستان بر میزان تابش خورشیدی دریافتی در سطح زمین اثر گذارند. در استان کرمانشاه کمترین مقدار تابش دریافتی سطح زمین منطقه در ماه‌های دی و بهمن در ایستگاه اسلام آباد غرب (با ارتفاع ۱۳۴۸ متر) و نیز در مناطق شمالی استان به مقدار ۹ مگا ژول بر متر مربع، و بیشترین آن در ایستگاه سرپل ذهاب (با ارتفاع ۵۴۵ متر) به مقدار ۱۳ مگا ژول بر متر مربع در روز رخ می‌دهد (مجرد و همکاران، ۱۳۹۴). در استان کردستان در فصل زمستان، کمترین مقدار تابش خورشیدی در قسمت‌های شمالی و غرب استان و بیشترین مقدار در مناطق جنوبی و جنوب شرق استان دریافت می‌شود (قمرنیا و یگانه مقدم، ۱۳۹۸). در استان ایلام به دلیل موقعیت جغرافیایی این استان و وجود کوه‌های زاگرس، شرایط جوی متغیر است و در روزهای ابری یا بارش برف، تابش خورشیدی کاهش می‌یابد. در استان لرستان در فصل زمستان بیشترین دریافت در ناحیه ۴ با ۴.۶ درصد از مساحت استان است که شامل نیمه شمالی الیگودرز است با مقدار تابش ۵۱۲۲ وات

در متر مربع و کمترین دریافت در ناحیه ۱ که تنها شهر نورآباد را با مقدار متوسط ۴۲۵۱.۷ تابش دریافتی شامل می‌شود که دارای کمترین میزان ساعات آفتابی و در عین حال بیشترین درصد ابرناکی را در بین نقاط استان داراست (اکبری و همکاران، ۱۳۹۷). در استان همدان به دلیل ارتفاع زیاد از سطح دریا و زمستان‌های سرد و برفی، آلبیدوی بالا، تابش خورشیدی کمتری نسبت به مناطق دیگر دارد (شکل ۶).



شکل ۶- مقادیر تابش خورشیدی در غرب ایران در فصل زمستان.

Figure 6. Solar radiation values in western Iran in winter.

تحلیل‌های ماهانه تابش ورودی طول موج کوتاه در غرب ایران نشان داد که الگوی زمانی این متغیر از یک چرخه فصلی منظم و پایدار پیروی می‌کند که به‌طور مستقیم تحت تأثیر موقعیت خورشید نسبت به زمین، تغییرات زاویه تابش، و ویژگی‌های دینامیکی جو منطقه قرار دارد. در آغاز سال میلادی، از ماه مارس، مقادیر تابش در سطح منطقه با روندی افزایشی آغاز می‌شود؛ این افزایش عمدتاً ناشی از افزایش تدریجی ارتفاع خورشید در آسمان، افزایش طول روز و کاهش نسبی پوشش برفی در ارتفاعات زاگرس است که باعث افزایش جذب انرژی در سطح زمین می‌شود. در ماه‌های آوریل و

آمایش فضا و ژئوماتیک

به‌ویژه می، شدت این روند افزایشی بیشتر شده و شرایط تابشی به‌تدریج به وضعیت بهینه نزدیک می‌شود، به‌گونه‌ای که در این دوره، نقش عوامل جوی مانند کاهش تدریجی ابرناکی نیز در تقویت دریافت انرژی خورشیدی قابل توجه است. در ماه‌های ژوئن تا آگوست، بیشینه مقادیر تابش سالانه ثبت می‌شود. این دوره به‌عنوان فاز اوج تابش در منطقه غرب ایران شناخته می‌شود که در آن، بیشترین ارتفاع خورشید، طولانی‌ترین روزها، حداقل فعالیت سامانه‌های بارشی و پایداری نسبی جو، شرایط را برای دریافت حداکثر انرژی خورشیدی فراهم می‌سازد. این وضعیت در نواحی مرتفع و کم‌ابری شمال‌غربی تشدید شده و مقادیر بالاتری نسبت به سایر مناطق مشاهده می‌شود. از ماه سپتامبر به بعد، روند کاهش تابش آغاز می‌شود که به‌طور هم‌زمان با کاهش زاویه تابش خورشید، کاهش طول روز و آغاز تدریجی فعالیت سامانه‌های بارشی مدیترانه‌ای و غربی همراه است. در این دوره، افزایش تدریجی پوشش ابری و رطوبت نسبی موجب کاهش قابل توجه انرژی دریافتی سطح زمین می‌شود. در ماه‌های نوامبر تا فوریه کمینه مقادیر تابش مشاهده می‌شود که این امر عمدتاً ناشی از کوتاه بودن طول روز، پایین بودن زاویه تابش خورشید، افزایش ابرناکی و بارش‌های زمستانی، و همچنین افزایش آلودگی در اثر پوشش برفی در ارتفاعات زاگرس است. در مجموع، این الگوی ماهانه در مناطق کوهستانی شمال‌غربی با دامنه نوسانات شدیدتر و در نواحی جنوبی و جنوب‌غربی با تغییرات ملایم‌تر مشاهده می‌شود که بیانگر نقش هم‌زمان توپوگرافی، رطوبت، عرض جغرافیایی و گردش عمومی جو در کنترل توزیع زمانی- مکانی تابش خورشیدی در غرب ایران است.

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که ایران از نظر دریافت تابش ورودی طول موج کوتاه دارای ظرفیت قابل توجهی برای توسعه انرژی خورشیدی است، به‌طوری‌که میانگین سالانه تابش در محدوده ۱۸۰۰ تا ۲۲۰۰ کیلووات‌ساعت بر متر مربع همراه با حدود ۲۸۰ تا ۳۰۰ روز آفتابی در سال برآورد شد. تحلیل‌های مکانی- زمانی مبتنی بر داده‌های MODIS بیانگر وجود ناهمگنی فضایی قابل توجه در توزیع تابش در غرب ایران است. به‌گونه‌ای که بیشینه مقادیر تابش در نواحی مرتفع و کم‌ابری شمال‌غربی، به‌ویژه در بخش‌هایی از زاگرس مانند سقز و بانه مشاهده شد؛ در مقابل، نواحی جنوبی و جنوب‌غربی نظیر ایلام و مناطق همجوار، به دلیل افزایش رطوبت نسبی، پوشش ابری بیشتر و شرایط جوی ناپایدار، مقادیر پایین‌تری از تابش خالص را دریافت کردند. از منظر زمانی، الگوی فصلی تابش نشان داد که روند تغییرات از یک چرخه منظم سالانه تبعیت می‌کند؛ به‌طوری‌که از فصل بهار افزایش تدریجی تابش هم‌زمان با افزایش زاویه تابش خورشید و طول روز مشاهده شد، هرچند این روند همچنان تحت تأثیر ناپایداری‌های جوی و بارش‌های دوره‌ای قرار دارد. بیشینه مقادیر تابش در فصل تابستان و به‌ویژه در ماه‌های تیر و مرداد رخ داد که ناشی از بیشترین ارتفاع خورشید، طول روز بلندتر و شرایط پایدار جوی است. در مقابل، فصل پاییز با کاهش تدریجی تابش همراه بود که عمدتاً تحت تأثیر افزایش ابرناکی و فعالیت سامانه‌های بارشی مدیترانه‌ای قرار دارد. کمینه مقادیر نیز در فصل زمستان مشاهده شد که ناشی از زاویه پایین تابش خورشید، افزایش آلودگی ناشی از پوشش برف، و کاهش ساعات روشنایی روز است. در مجموع، نتایج بیانگر آن است که توزیع تابش خورشیدی در غرب ایران به‌طور هم‌زمان تحت تأثیر عوامل توپوگرافی (ارتفاع)، پارامترهای جوی (ابرناکی و رطوبت) و عوامل نجومی (زاویه تابش و طول روز) قرار دارد. بر این اساس، نواحی مرتفع و کم‌ابری شمال‌غرب کشور از

پتانسیل بالاتری برای توسعه نیروگاه‌های خورشیدی برخوردار بوده، در حالی که مناطق جنوبی‌تر نیازمند ارزیابی‌های دقیق‌تر مکانی-زمانی در مقیاس فصلی هستند. این یافته‌ها می‌تواند به‌عنوان مبنایی علمی برای برنامه‌ریزی توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر و بهینه‌سازی بهره‌برداری از منابع انرژی خورشیدی در منطقه مورد استفاده قرار گیرد.

منابع

- پیری، جمشید؛ انصاری، حسین؛ حسینی، علیرضا؛ فرید (۱۳۹۲). مدل سازی تابش خورشید رسیده به زمین با استفاده از ANFIS و مدل های تجربی (مطالعه موردی: ایستگاه های زاهدان و بجنورد).
- حجازی‌زاده، زهرا؛ کربلائی درئی، علیرضا؛ کربلائی، محمد رضا. (۱۳۹۷). برآورد تابش خورشیدی دریافتی سطح زمین در استان اصفهان با مدل برد و هول استورم. نشریه جغرافیا و توسعه، ۱۶(۵۱)، ۱۵۹-۱۷۴.
- رضائی مقدم، محمد حسین و هاتقی اردکانی، مهدی. (۱۳۹۵). ارزیابی تامین انرژی برای سیستم‌های فتوولتائیک بر مبنای تابع تحلیل گر انرژی خورشیدی (منطقه موردی: بزرگراه زنجان - تبریز). آمایش فضا و ژئوماتیک، ۲۰(۳)، ۱۳۱-۱۵۵.
- سلطانی، ر. (۱۳۹۵). تأثیر تغییرات اقلیمی بر تابش خورشیدی در ایران. مجله تغییرات اقلیمی و محیط زیست، ۸(۱)، ۴۱-۵۶.
- طالعی، محمد؛ صفرپور، معین و جوادی؛ قاسم. (۱۳۹۷). ارزیابی پتانسیل تأسیس نیروگاه خورشیدی با استفاده از روش های تصمیم گیری OWA و TOPSIS (مطالعه موردی: استان قزوین). آمایش فضا و ژئوماتیک ۲۲(۴)، ۱-۲۷.
- کریمی، س. (۱۴۰۰). مدل سازی تابش خورشیدی با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای در ایران. مجله سنجش از دور و جغرافیای کاربردی، ۱۰(۳)، ۶۵-۸۰.
- مومنی، حسن؛ محمد قلیان، حجت اله. (۱۳۹۹). سیاست بهره گیری از انرژی تابشی خورشیدی در پراکنش پهنه‌های جغرافیایی با استفاده از برنامه‌های Arc GIS.
- یوسفی، حسین؛ حافظ نیا، حامد و راضی آستارایی، فاطمه. (۱۳۹۶). شناسایی مکان‌های پهنه برای نیروگاه‌های فتوولتائیک متصل به شبکه در شهرستان بیرجند. آمایش فضا و ژئوماتیک، ۲۱(۲)، ۲۱۹-۲۴۲.

Reference

- Aghaee, M., Asadi, M., & Esfahani, M. H. (2023). Changes in incoming shortwave radiation over Iran during 1980-2020. *International Journal of Climatology*, 43(13), 5503-5515.
- Ahmadi, M. (2013). A study of solar radiation variations in the mountainous regions of Iran. *Journal of Climate Research*, 5 (2), 22-35.
- Ávila, J.M., Cos, M.D., & Alonso, C.J. (2010). Comparison of ground based global radiation measurements from AEMET radiation network with SIS (Surface Incoming Shortwave

- Radiation) from Climate Monitoring-SAF.
- Ghanghermeh, A., Roshan, G., & Halabian, A. (2022). Projecting spatiotemporal variations of sunshine duration with regards to climate change in Iran as a step towards clean energy. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 53, 102630.
 - Haigh, J. D., Bradley, R. S., & de Noblet-Ducoudre, C. R. (2010). Time-varying solar radiation at the Earth's surface: A review. *Journal of Climate*, 23(16), 4105-4120.
 - Haywood, J. M., et al. (2025). World Climate Research Programme lighthouse activity: An assessment of major research gaps in solar radiation modification research. *Frontiers in Climate*, 7. <https://doi.org/10.3389/fclim.2025.1507479>
 - Hejazi Zadeh, Z., Karbalaei Darei, A., & Karbalaei, M. R. (2018). Estimation of solar radiation received at the Earth's surface in Isfahan Province using the Bird and Hulstrom model. *Journal of Geography and Development*, 16 (51), 159–174.
 - Karimi, S. (2021). Modeling solar radiation using satellite data in Iran. *Journal of Remote Sensing and Applied Geography*, 10 (3), 65–80.
 - Kaufmann, Y. J., & Williamson, D. P. (2022). Solar irradiance variability: A review. *Advances in Atmospheric Sciences*, 39(2), 107-135.
 - Kazemi, M. (2024). Temporal-spatial investigation of net short wavelength solar radiation using FLDAS global model data in Iran. *Climate Change and Climate Disaster*, 2(4).
 - Kefayat Motlagh, O. R., et al. (2024). Detection of land surface albedo changes over Iran using MODIS data. *Meteorological Applications*. <https://doi.org/10.1002/met.2224>
 - Li, J., Wang, X., & Ding, Y. (2015). Spatial and temporal variability of solar radiation over the Tibetan Plateau. *Atmospheric Research*, 148, 18-28.
 - Momeni, H., & Mohammadgholian, H. (2020). Policy for utilizing solar radiant energy in the spatial distribution of geographic areas using ArcGIS applications.
 - Motamedi, A., Gohari, A., & Haghighi, A. T. (2023). Three-decade assessment of dry and wet spells change across Iran, a fingerprint of climate change. *Scientific Reports*, 13, 2888. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-30040-0>.
 - Piri, J., Ansari, H., Hosseini, A., & Farid. (2013). Modeling of solar radiation reaching the Earth's surface using ANFIS and empirical models (Case study: Zahedan and Bojnourd stations).
 - Rezaei Moghaddam, M. H. and Hatefi Ardekani, Graduated, M. (2016). Assessment of energy supply for photovoltaic systems based on solar energy analyst function (area: highway Zanjan and Tabriz). *The Journal of Spatial Planning and Geomatics*, 20(3), 131-155.
 - Scaife, A. A., & Haigh, J. D. (2021). Solar variability and climate change. *Nature Climate Change*, 11(11), 1023-1028.
 - Shapiro, M. A., Haigh, J. D., & Bradley, R. S. (2011). Seasonal and interannual variability of solar radiation over the Arctic. *Journal of Climate*, 24(21), 5046-5062.
 - Soltani, R. (2016). The impact of climate change on solar radiation in Iran. *Journal of Climate Change and Environment*, 8 (1), 41–56.
 - Stamatis, M., et al. (2024). How strong are the links between global warming and surface solar radiation? *Climate Dynamics*.
 - Taleai, M., Safarpour, M. and Javadi, G. (2019). Potential Evaluation for Establishment of Solar Power Plants Using Multi-Criteria Decision Making Methods: OWA and TOPSIS (case study: Qazvin-Iran). *The Journal of Spatial Planning and Geomatics*, 22(4), 1-27.

- Tikhomirov, A.B., Firsov, K., Kozlov, V.S., Panchenko, M.V., Ponomarev, Y.N., & Tikhomirov, B.A. (2005). Investigation of spectral dependence of shortwave radiation absorption by ambient aerosol using time-resolved photoacoustic technique. *Optical Engineering*, 44, 071203.
- Wang, Y., Meili, N., & Fatichi, S. (2025). Ecohydrological responses to solar radiation changes. *Hydrology and Earth System Sciences*, 29, 381–396. <https://doi.org/10.5194/hess-29-381-2025>
- Yousefi, H. (2017). Identifying optimal sites for grid-connected photovoltaic power plants in Birjand County. *The Journal of Spatial Planning and Geomatics*, 21(2), 219-242.
- Zhou, J., Zhang, X., Wang, Y., & Zhang, Y. (2021). Impact of solar irradiance variability on the global energy budget. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 126(12), e2021JD035015.