

مقاله پژوهشی

برآورد تابش خورشیدی با استفاده از داده‌های تابش ماهواره‌ای SARAH در شمال غرب ایران

هادی انصاری^۱، صفر معروفی^{۲*}

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۸/۲۵ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۴/۲۴

۱- دانش آموخته دکتری منابع آب، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی همدان

۲- استاد گروه مهندسی منابع آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی همدان

*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: smarofi@yahoo.com

چکیده

تعیین دقیق میزان تابش خورشیدی در سطح زمین برای مطالعات اقلیمی و کاربردهای انرژی خورشیدی، امر مهمی است. مجموعه داده‌های ماهواره‌ای تابش خورشیدی، پوشش وسیعی از داده‌های مکانی و زمانی را ارائه می‌دهد، اما اعتبارسنجی دقیق این داده‌ها، برای استفاده قابل اعتماد از آنها لازم است. در این مطالعه از داده‌های روزانه ماهواره‌ای تابش SARAH برای تخمین تابش خورشیدی روزانه در پنج ایستگاه هواشناسی منطقه شمال غرب ایران در سال‌های ۲۰۰۹ و ۲۰۱۰ استفاده گردید. با توجه به نتایج به دست آمده، داده‌های تابش SARAH از دقت بالایی در برآورد تابش خورشیدی در سطح همه ایستگاه‌های مورد مطالعه برخوردار بودند. در ایستگاه تبریز خطای تخمین تابش در مقایسه با ایستگاه‌های دیگر کمتر بود. با توجه به معیار ارزیابی انحراف استاندارد عمومی (GSD)، در همه ایستگاه‌ها، برآورد تابش در فصل تابستان و زمستان به ترتیب کمترین ($GSD = 6/2 - 12/5$) و بیشترین ($GSD = 18/2 - 25/2$) مقدار خطا را دارا بود. نتایج نشان داد که عواملی نظیر توپوگرافی و پوشش برف بر دقت تخمین داده‌های تابش SARAH تاثیرگذار می‌باشند.

واژه‌های کلیدی: تابش خورشیدی، توپوگرافی، پوشش برف، شمال غرب ایران، SARAH

Estimation of Solar Radiation Using SARAH Satellite Radiation Data in the Northwest of Iran

Hadi Ansari¹, Safar Marofi^{*2}

Received: November 15, 2020

Accepted: July 15, 2021

1-PhD. Dept. of Water Resource Engineering, Bu-Ali Sina University, Hamedan

2-Prof., Dept. of Water Resource Engineering, Bu-Ali Sina University, Hamedan

*Corresponding Author, Email: smarofi@yahoo.com

Abstract

Background and Objectives

Accurate determination of the amount of incoming solar radiation at Earth's surface is important for both climate studies and solar power applications. Measurement of solar radiation using pyranometer in meteorological stations is limited due to the high cost and lack of facilities. Therefore, researchers have tried to use alternative methods such as remote sensing data to estimate solar radiation. Satellite-based datasets of solar radiation offer wide spatial and temporal coverage, but careful validation of their quality is a necessary prerequisite for reliable utilization. The objective of this study is to evaluate the SARAH radiation produced in the study area.

Materials and Methods

In this study, daily SARAH satellite data was used to estimate daily solar radiation at weather stations in northwest of Iran (Ardebil, Tabriz, Zanjan, Ahar and Saqqez stations) in years 2009 and 2010. SARAH radiation satellite data is available on a monthly, daily and hourly basis, with a spatial resolution of 0.05 degrees. In this data, the Heliosat method that is based on the conservation of energy, used to estimate solar radiation. A number of satellite images throughout the day have been used to calculate solar radiation in daily data. The larger the number of available images per day, the better the daily cycle of cloud coverage can be resolved, increasing the accuracy of the daily average of solar radiation. The conversion from the irregular satellite projection to the regular 0.05×0.05 degree grid is done with the climate data operators. SARAH solar radiation maps in the Arcmap environment were added to the studied meteorological station layer and daily radiation was estimated and evaluated for all stations.

Findings

According to the results, SARAH radiation data had a high accuracy in estimating solar radiation at all five stations. At the Tabriz station, the error of estimation of radiation was less than that of other stations. According to GSD evaluation criteria, in each station, the estimation error in summer and winter was showed the lowest (GSD = 6.12 - 12.5) and the highest (GSD = 18.2 - 25.2) values, respectively. The results showed that factors such as topography and snow cover affect the accuracy of SARAH radiation data estimation.

Conclusion

In this study for the first time, satellite SARAH data was evaluated at the meteorological stations of the northwest of Iran. The results showed that SARAH solar radiation data have high quality and can produce realistic and high-precision maps of received solar radiation when combined with ground measurements.

Keywords: Northwestern Iran, SARAH, Snow cover, Solar radiation, Topography

مقدمه

تابش خورشیدی دریافتی در سطح زمین، یک پارامتر مهم آب و هوایی بواسطه نقش آن در بیلان انرژی کره زمین است. در عین حال تغییرات مکانی تابش خورشیدی، صنعت انرژی خورشیدی را با اطلاعات ارزشمندی برای برنامه‌ریزی ظرفیت جدید و پیش‌بینی تولید انرژی فراهم می‌کند. با توجه به رشد چشمگیر صنعت انرژی خورشیدی در دهه گذشته، اهمیت استفاده از آن در حال افزایش است (تایمیسینا و همکاران ۲۰۱۲). یکی از روش‌های اندازه‌گیری تابش خورشیدی، نصب پیرانومترها در ایستگاه‌های هواشناسی می‌باشد. اما این اندازه‌گیری‌ها در بسیاری از مناطق به دلیل مشکلات اقتصادی و کمبود امکانات بطور محدود انجام می‌شود و این مشکل حتی در کشورهای در حال توسعه نیز به چشم می‌خورد (سامانی ۲۰۰۰). در نتیجه پژوهشگران سعی بر آن داشته‌اند بر مبنای استفاده از روابط و مدل‌های ریاضی که بین تابش خورشیدی و عوامل آب و هوایی از قبیل ساعت آفتابی، رطوبت نسبی، دمای حداقل و حداکثر هوا، که اندازه‌گیری آنها آسان‌تر است، برای تخمین آن استفاده کنند. این معادلات به علت اینکه از داده‌های هواشناسی از نوع مکانی نقطه‌ای استفاده می‌کنند، در نتیجه مقدار تابش تخمینی به وسیله آنها نیز نقطه‌ای خواهد بود. به عبارتی، مقدار تابش تخمینی فقط در محدوده نزدیک ایستگاه دارای اعتبار است. (امامی‌فر و همکاران ۲۰۱۳).

بررسی‌های صورت گرفته نشان می‌دهد داده‌های سنجش از دور می‌توانند به طور قابل قبولی پارامترهای هواشناسی را از نظر مکانی و زمانی در اختیار کاربران قرار دهند (کین و همکاران ۲۰۱۱). همچنین تصاویر ماهواره‌ای به دلیل پیوستگی مکانی داده‌ها، کاربرد بهتری برای مطالعات ناحیه‌ای نسبت به

داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی دارند. در زمینه‌ی برآورد تابش رسیده به سطح زمین با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای در ترکیب با داده‌های زمینی تاکنون مطالعاتی صورت گرفته است. کین و همکاران (۲۰۱۱) با استفاده از محصولات شاخص پوشش گیاهی و دمای سطح زمین (LST^1) سنجنده مودیس ($MODIS^2$)، محصولات بارش ماهانه $TRMM^3$ و داده‌های اندازه‌گیری شده تابش که برای آموزش و اعتبارسنجی شبکه عصبی مصنوعی استفاده کردند، توانستند تابش خورشیدی ماهانه را در چین برآورد نمایند. نتایج اعتبارسنجی نشان داد که روش مبتنی بر شبکه عصبی که در این تحقیق ارائه شده است می‌تواند تابش خورشیدی را با وضوح مکانی حدود ۵ کیلومتر با دقت بالا برآورد کند. امامی‌فر و همکاران (۲۰۱۳) از مدل درختی M5 و دو مدل تجربی هارگریوز- سامانی و محمود- هابرد برای محاسبه تابش خورشیدی استفاده کردند. در این مطالعه از ساعت آفتابی حداکثر و واقعی، تابش فرازمینی و داده‌های روزانه دمای سطح زمین سنجنده مودیس به عنوان ورودی مدل‌ها و داده‌های روزانه تابش خورشیدی ایستگاه سینوپتیک اهواز برای واسنجی و اعتبارسنجی مدل‌ها استفاده گردید. نتایج نشان داد که در مقایسه بین مدل درختی و مدل‌های تجربی، مدل درختی از دقت بیشتری برخوردار است. امامی‌فر و علیزاده (۲۰۱۴) با استفاده از چهار مدل مختلف شبکه عصبی با ورودی محصولات دمای سطح زمین سنجنده مودیس در ترکیب با تابش برون‌زمینی (R_a) و نسبت ساعت آفتابی (n/N)، تابش خورشیدی را در اهواز محاسبه کردند. نتایج نشان داد که مدل شبکه عصبی در مقایسه با مدل هارگریوز و سامانی که مبتنی بر داده‌های دمای هوا و تابش برون‌زمینی است، با دقت بیشتری تابش رسیده به زمین را برآورد می‌کند. مازورا

¹ Land surface temperature

² Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer

³ Tropical Rainfall Measuring Mission Satellite

انگلستان و آلمان می‌باشد و داده‌های تابش خورشیدی آن از کیفیت بسیار بالا برخوردار است. مطالعات اندکی در خارج از کشور برای ارزیابی تولیدات تابش CM SAF و استفاده از این تولیدات انجام شده است. در و همکاران (۲۰۱۰) در منطقه آلپ از تولیدات تابش CM SAF برای تخمین تابش استفاده کردند. نتایج حاصل از ارزیابی نشان داد که تولیدات مذکور از دقت بالایی در برآورد تابش خورشیدی در منطقه مطالعاتی برخوردار است. مولر و همکاران (۲۰۱۲) در اروپا از تولیدات تابش CM SAF برای تخمین تابش خورشیدی استفاده کردند. نتایج اعتبارسنجی نشان از توانایی تولیدات مذکور برای برآورد تابش در منطقه مورد مطالعه داشت. آنتونانس و همکاران (۲۰۱۳) در اسپانیا از داده‌های سال‌های ۲۰۱۰، ۲۰۱۱، ۲۰۱۲ ایستگاه برای ارزیابی تولیدات تابش CM SAF استفاده کردند. میانگین مطلق تفاضل (MAD^4) بین CM SAF و داده‌های مشاهداتی تقریباً ۴ درصد بود که نشان از دقت بالای تولیدات مورد استفاده داشت. سانچز و همکاران (۲۰۱۳) کار اعتبارسنجی از داده‌های تابش خورشیدی ماهانه CM SAF را در اروپا برای یک دوره ۲۳ ساله بررسی کردند. نتایج نشان داد که توافق خوبی بین مجموعه داده‌های مشاهداتی و ماهواره‌ای ($r^2=0/86$)، وجود دارد. ضمناً حداکثر و حداقل میانگین تفاضل خطای مطلق ($MABD^5$) به ترتیب برای تابستان و زمستان بود. ژاک و همکاران (۲۰۱۵) در جمهوری چک در دوره ۱۹۸۹ الی ۲۰۰۹، مطالعات صحت‌سنجی محصولات تابش خورشیدی CMSAF را انجام و نشان دادند که داده‌های CM SAF می‌تواند درک ما را از آب و هوای محلی بهبود ببخشد، به ویژه در مناطق فاقد داده‌های مشاهداتی و یا در مناطق مرزی که از کمبود ایستگاه‌های اندازه‌گیری رنج می‌برد. ریچلا و همکاران (۲۰۱۵) با استفاده از مشاهدات تابش خورشیدی

آگیار و همکاران (۲۰۱۵) در ایسلند با استفاده از اندازه‌گیری‌های زمینی (رطوبت نسبی و درجه حرارت) و تصاویر ماهواره Meteosat به عنوان ورودی مدل شبکه عصبی مصنوعی، تابش خورشیدی را با دقت قابل قبولی تخمین زدند. دئو و شاهین (۲۰۱۷) در استرالیا با استفاده از داده‌های دمای سطح زمین سنجنده مودیس و داده‌های مشاهداتی تابش خورشیدی با کاربرد مدل شبکه عصبی مصنوعی، رگرسیون خطی چندگانه (MLR^1) و مدل اتورگرسیو میانگین متحرک ($ARIMA^2$)، تابش رسیده به زمین را برآورد کردند. نتایج نشان داد که مدل شبکه عصبی مصنوعی نسبت به مدل های MLR و $ARIMA$ از عملکرد بهتری همراه بوده است. مطالعات ذکر شده و کارهای مشابه انجام شده، به علت اینکه از داده‌های اندازه‌گیری شده در ایستگاه‌های هواشناسی به عنوان ورودی مدل‌ها، آموزش و واسنجی آنها استفاده کرده‌اند، مقدار تابش تخمینی فقط در محدوده نزدیک ایستگاه دارای اعتبار است و نبود داده‌های کافی و کمبود ایستگاه‌های اندازه‌گیری چنین داده‌هایی می‌تواند باعث محدودیت استفاده از چنین روش‌ها گردد. بنابراین پژوهشگران سعی کرده‌اند با استفاده از داده‌های سنجش از راه دور با کاربرد الگوریتم‌های مناسب و بدون استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده زمینی تابش خورشیدی را محاسبه کنند. همچنین بعضی از سازمان‌ها که در زمینه برآورد پارامترهای هواشناسی فعالیت می‌کنند سعی کرده‌اند پارامتر تابش خورشیدی را با الگوریتم‌های بازایی از تصاویر ماهواره‌ای استخراج کرده و به صورت رایگان در اختیار پژوهشگران قرار دهند. یکی از این سازمان‌ها برنامه سهولت ماهواره‌ای نظارت بر آب و هوا $CM SAF^3$ است که کار مشترک خدمات ملی هواشناسی بلژیک، فنلاند، هلند، سوئد، سوئیس،

⁴ Mean absolute difference

⁵ Mean absolute bias difference

¹ Multiple linear regression

² Autoregressive integrated moving average

³ Satellite Application Facility on Climate Monitoring

داده‌ها، پوشش دادن منطقه جغرافیایی کشور ایران، رایگان و در دسترس بودن این داده‌ها از تولیدات مذکور برای برآورد تابش خورشیدی در شمال غرب کشور استفاده شد.

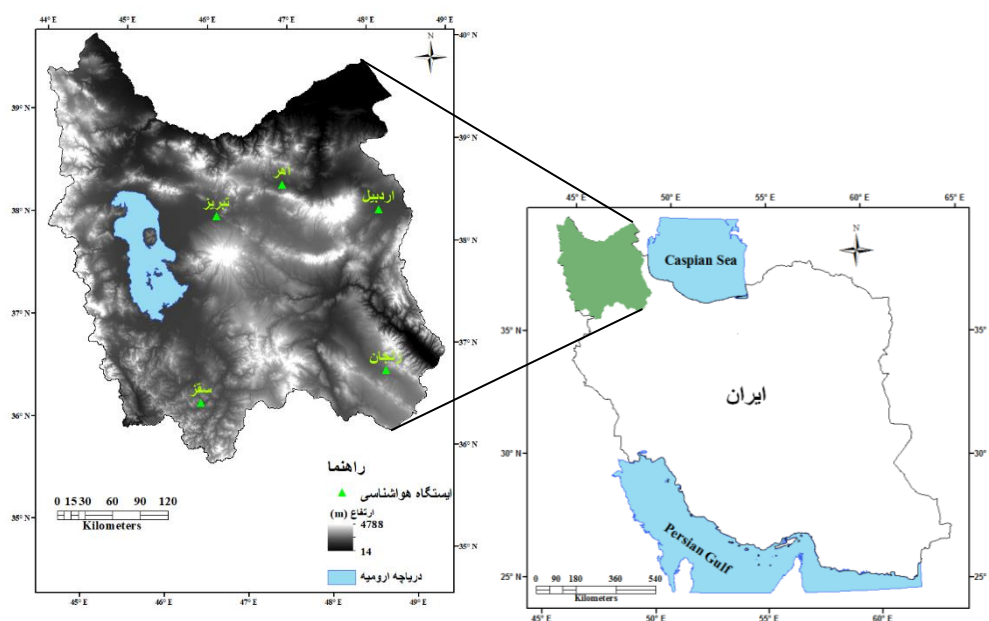
مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

برای انجام این پژوهش، اطلاعات تابش خورشیدی ایستگاه‌های هواشناسی اردبیل، تبریز، زنجان، اهر و سقز واقع در شمال غرب کشور (شکل ۱) برای صحت‌سنجی تولیدات تابش خورشیدی CMSAF استفاده شد. ارتفاعات و ناهمواری‌های منطقه مطالعاتی، به دو دسته کوه‌های نسبتاً کم ارتفاع و کوه‌های مرتفع تقسیم گردید (عساکره و همکاران ۲۰۱۳). این منطقه دارای اقلیم نیمه خشک مدیترانه‌ای است و از نظر کشاورزی و تولیدات گیاهی نقش مهمی در اقتصاد و امنیت غذایی کشور دارد (نوری و همکاران ۲۰۱۷). در جدول ۱ مشخصات ایستگاه‌های هواشناسی مورد مطالعه آورده شده است.

ایستگاه‌های هواشناسی فنلاند و سوئد به ارزیابی تولیدات تابش روزانه CM SAF پرداختند. آنها دریافتند که مجموعه داده‌های ذکر شده با وجود خطای بایاس منفی، به طور کلی از عملکرد خوبی در برآورد تابش خورشیدی در فنلاند و سوئد هستند. اوراکا و همکاران (۲۰۱۷) در سراسر اروپا با استفاده از تابش اندازه‌گیری شده توسط پیرانومتر در ایستگاه‌های هواشناسی، تولیدات تابش CM SAF را در دوره آماری سال ۲۰۰۵ تا ۲۰۱۵ ارزیابی کردند. بهترین برآورد تابش در اروپای مرکزی با میانگین انحراف مطلق ۸ تا ۱۳ وات بر متر مربع بدست آمد، در حالی که خطای تخمین در عرض‌های بالا و مناطق ساحلی افزایش یافت.

در ایران متاسفانه مطالعه‌ای برای ارزیابی تولیدات تابش CM SAF صورت نگرفته است. در این مطالعه با توجه به دقت خوب تولیدات تابش CM SAF در برآورد تابش خورشیدی که مطالعات انجام شده قبلی آن را به وضوح نشان داده و نیز تفکیک زمانی (ساعتی، روزانه و ماهانه) و مکانی (۰/۰۵ درجه) بالای



شکل ۱- موقعیت محدوده مطالعاتی و ایستگاه‌های هواشناسی واقع در آن.

جدول ۱- مشخصات ایستگاه‌های هواشناسی مورد مطالعه.

ایستگاه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	ارتفاع (متر)
تبریز	۴۶° ۱۷'	۳۸° ۰۵'	۱۳۶۱
سقز	۴۶° ۱۶'	۳۶° ۱۵'	۱۵۲۳
اهر	۴۷° ۰۴'	۳۸° ۲۶'	۱۳۹۰
اردبیل	۴۸° ۱۷'	۳۸° ۱۵'	۱۳۳۲
زنجان	۴۸° ۲۹'	۳۶° ۴۱'	۱۶۶۳

می‌رود، از روش مدل انتقال تابشی یا RTM^4 مبتنی بر LUT^5 برای محاسبه SIS_{CLS} استفاده می‌کند. RTM با استفاده نرم‌افزار LibRadtran که توسط مایر و کایلینگ (۲۰۰۵) توسعه داده شده، برای تولید LUT استفاده شده است. LUT دارای مقادیر SIS برای طیف گسترده‌ای از حالت‌های جوی و ۳۲ باند طیفی است. سپس مقدار SIS برای حالت واقعی جوی به وسیله‌ی درون‌یابی بین حالت‌های مختلف محاسبه می‌شود. حالت‌های جوی دارای مقادیر مختلف بخار آب، ازن، عمق نوری آئروسول، آلییدو پراکندگی آئروسول و پارامتر نامتقارن هستند (هس و همکاران ۱۹۹۸).

شبکه‌بندی و پردازش داده‌ها

میانگین روزانه مقادیر SIS بر اساس روش موسر (موسر ۱۹۸۳) و روش دیکمان (دیکمان و همکاران ۱۹۸۸) طبق رابطه (۲) محاسبه شده است.

$$SIS_{DA} = SIS_{CLSDA} \times \frac{\sum_{i=1}^n SIS_i}{\sum_{i=1}^n SIS_{CLSi}} \quad [2]$$

در اینجا، SIS_{DA} میانگین روزانه SIS ، SIS_{CLSDA} میانگین روزانه SIS_{CLS} ، SIS_i مقدار SIS محاسبه شده برای تصویر ماهواره‌ای i ام، SIS_{CLSi} مقدار SIS_{CLS} محاسبه شده برای تصویر ماهواره‌ای i ام و n نیز تعداد تصاویر ماهواره‌ای در دسترس در طول روز می‌باشد (هولد و همکاران ۲۰۱۶). هرچه تعداد تصاویر

در این مطالعه از داده‌های تابش خورشیدی CM SAF نسخه موسوم به SARAH¹ که در سال ۲۰۱۵ ارائه شده و از دقت بالایی در تخمین تابش برخوردار است، استفاده شد. این مجموعه داده‌ها برای دوره زمانی ۱۹۸۳ تا ۲۰۱۷ میلادی از سایت مربوطه (www.cmsaf.eu) به صورت میانگین ماهانه، روزانه و ساعتی با وضوح ۰/۰۵ درجه در دسترس می‌باشد. در این داده‌ها برای برآورد تابش خورشیدی از روش Heliosat استفاده شده است. روش Heliosat بر پایه حفظ انرژی می‌باشد. بر اساس این روش، رابطه اساسی بین تابش خورشید و آلبدو موثر ابر به شرح زیر است:

$$SIS = SIS_{CLS} \times (1 - CAL) \quad [1]$$

در اینجا، SIS^2 تابش خورشیدی، SIS_{CLS} تابش خورشیدی در حالت آسمان صاف و CAL^3 آلبدو موثر ابر است که تحت عنوان شاخص ابر در نشریات قبلی (کانو و همکاران، ۱۹۸۶) ذکر گردیده است. برای مقادیر شاخص ابر بالاتر از ۰/۸، معادله فوق به منظور در نظر گرفتن اثرات اشباع و جذب در ابرهای ضخیم اپتیکی اصلاح می‌شود (هولد و همکاران ۲۰۱۶). با معلوم بودن مقادیر شاخص ابر، SIS می‌تواند با استفاده از تابش آسمان صاف محاسبه شود. الگوریتمی که برای محاسبه تابش خورشید در حالت آسمان صاف به کار

¹ Surface Solar Radiation Data records – Heliosat

² Surface Incoming Solar Radiation

³ Effective Cloud Albedo

⁴ Radiative Transfer Model

⁵ Look-Up-Table

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [E_i - O_i]^2}{n}} \quad [۳]$$

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(E_i - \bar{E})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (E_i - \bar{E})^2}} \quad [۴]$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |O_i - E_i|}{n} \quad [۵]$$

$$GSD = \frac{RMSE}{\bar{O}} \quad [۶]$$

$$Bias = \frac{\sum_{i=1}^n (E_i - O_i)}{n} \quad [۷]$$

در این روابط n تعداد داده‌ها، O_i مقدار مشاهده‌ای تابش خورشیدی، \bar{O} میانگین مقادیر مشاهده‌ای تابش خورشیدی، E_i مقدار برآوردی و \bar{E} میانگین مقادیر برآوردی تابش خورشیدی می‌باشد.

نتایج و بحث

اعتبارسنجی داده‌های تابش SARAH توسط کارشناسان هواشناسی CMSAF و همچنین توسط نویسندگان دیگر انجام شده است (ژاک و همکاران ۲۰۱۵). با این حال، قبل از استفاده از این داده‌ها برای برنامه‌های کاربردی هواشناسی، باید داده‌ها برای

ماهواره‌ای موجود در روز بیشتر باشد، سیکل روزانه پوشش ابر را بهتر می‌توان برآورد کرد و در نتیجه دقت تخمین میانگین روزانه SIS افزایش می‌یابد. برای به دست آوردن میانگین روزانه SIS حداقل سه تصویر ماهواره‌ای در روز لازم است. میانگین ماهانه SIS با میانگین‌گیری حسابی از داده‌های روزانه SIS به دست آمده است. تبدیل داده‌ها از طرح نامنظم ماهواره‌ای به شبکه منظم ۰/۰۵ در ۰/۰۵ درجه با ابزار اپراتور اطلاعات آب و هوایی انجام شده است (هولد و همکاران ۲۰۱۶). برای استفاده از نقشه‌های رقومی شده میانگین روزانه تابش SIS، این نقشه‌ها در محیط Arcmap بر روی لایه ایستگاه‌های هواشناسی مورد مطالعه اضافه شد و تابش روزانه برای تمام ایستگاه‌ها در طول سال‌های ۲۰۰۹ و ۲۰۱۰ با استفاده از دستور Extract Values to Points استخراج گردید.

معیارهای ارزیابی

برای ارزیابی تخمین‌های به دست‌آمده تابش خورشیدی با داده‌های اندازه‌گیری شده در ایستگاه‌های هواشناسی، از معیارهای ارزیابی ریشه میانگین مربعات خطا ($RMSE^1$)، ضریب همبستگی پیرسون (r^2)، انحراف میانگین خطای مطلق (MAE^3) و انحراف استاندارد عمومی (GSD^4) استفاده گردید. معادلات معیارهای مربوطه به قرار زیر هستند.

¹ Root Mean Squared Error

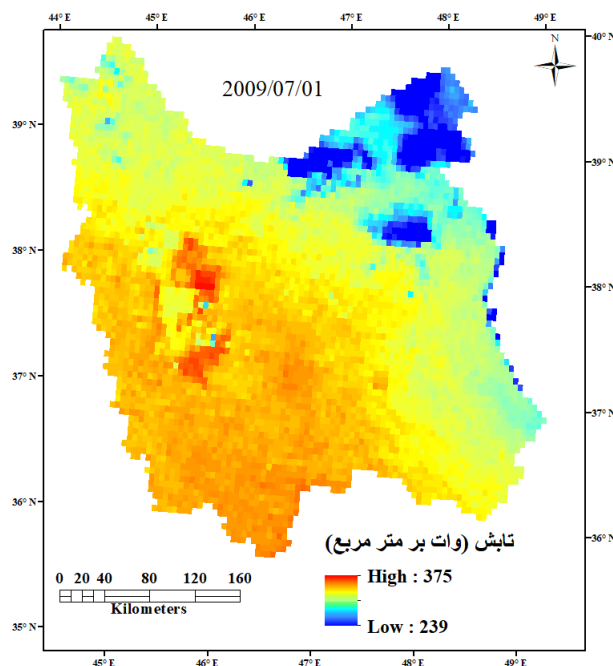
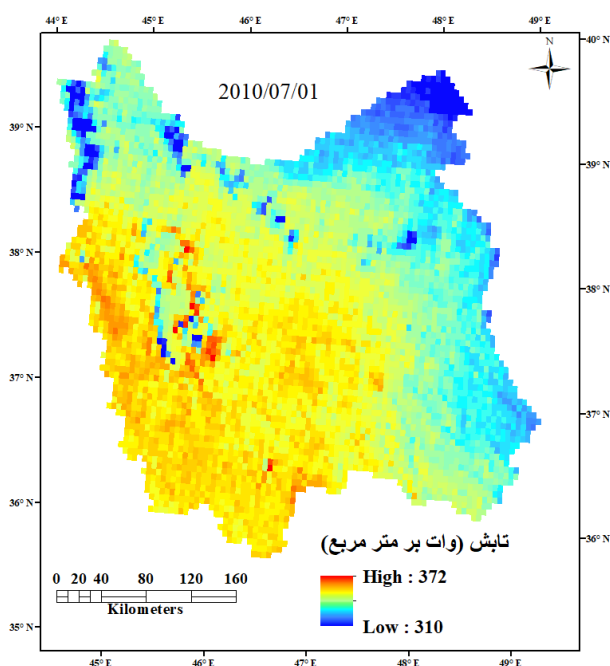
² Pearson Correlation Coefficient

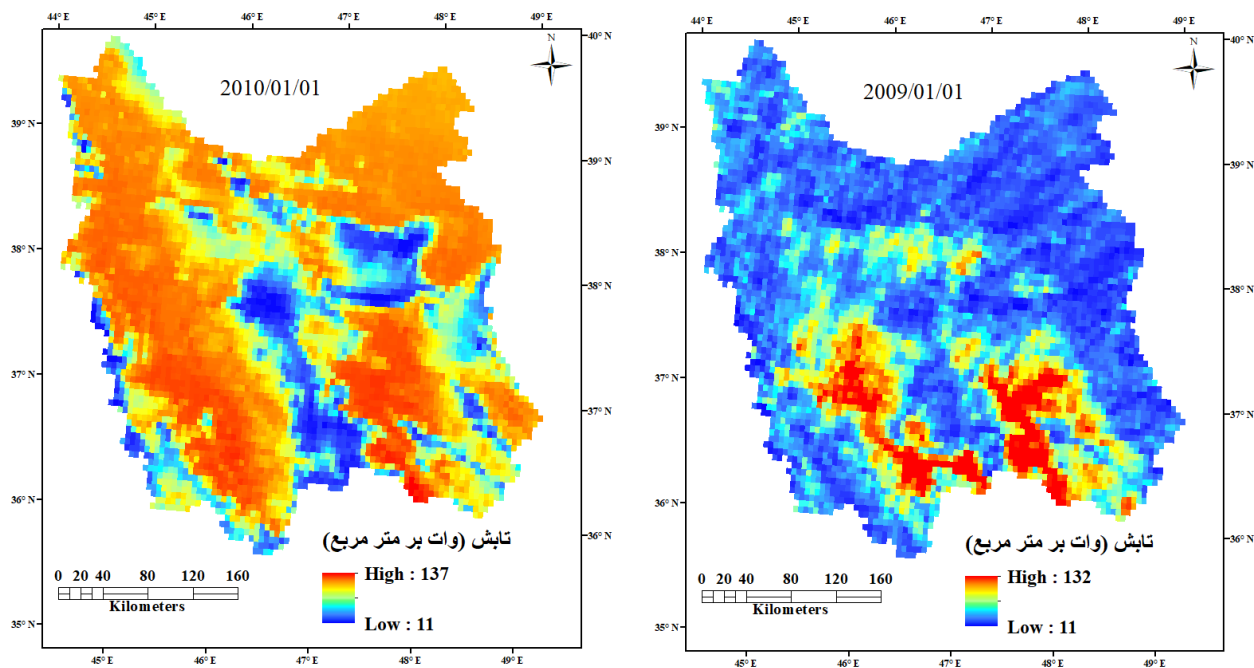
³ Mean Absolute Error

⁴ General Standard Deviation

بهتری برخوردار است. با توجه به مشخصات ایستگاه‌های مورد بررسی و اینکه ایستگاه اردبیل و تبریز نسبت به سه ایستگاه دیگر، از ارتفاع کمتری دارند، می‌توان نتیجه گرفت که ارتفاع عامل موثری در دقت برآورد تابش با استفاده از داده‌های تابش SARAH می‌باشد. مدل‌های ماهواره‌ای در مناطق کوهستانی از عملکرد خوبی برخوردار نیستند، زیرا به اندازه کافی از تفکیک مکانی و زمانی بالایی برای در نظر گرفتن تغییرات شدید زمین و تغییر شرایط آب و هوایی، برخوردار نمی‌باشند (اوراکا و همکاران ۲۰۱۷). با توجه به مقادیر مثبت معیار خطای BIAS می‌توان نتیجه گرفت که تابش SARAH در همه ایستگاه‌ها، تابش را بیشتر از مقدار واقعی تخمین زده‌است که با نتایج مطالعات مولر و همکاران (۲۰۱۵) و ژاک و همکاران (۲۰۱۵) مطابقت دارد.

حصول قابلیت اطمینان در منطقه مورد مطالعه، مورد بررسی قرار گیرند. برای ۵ ایستگاه هواشناسی مقادیر تابش SARAH برای سال ۲۰۰۹ و ۲۰۱۰ در مقیاس روزانه با استفاده از نرم افزار Arcmap استخراج شد. در شکل ۲ به عنوان نمونه نقشه‌های تابش SARAH در تاریخ‌های اول ژانویه و جولای سال‌های ۲۰۰۹ و ۲۰۱۰ آورده شده است. در شکل ۳ نمودار پراکنندگی داده‌های تابش اندازه‌گیری و ماهواره‌ای (SARAH) آورده شده است. معیارهای ارزیابی (ریشه میانگین مربعات خطا، انحراف، میانگین خطای مطلق و انحراف استاندارد عمومی) محاسبه و نتایج در جدول ۲ نشان داده شده است. نتایج نشان از دقت بالای داده‌های تابش SARAH در برآورد تابش خورشیدی در هر پنج ایستگاه مورد مطالعه می‌باشد. در ایستگاه‌های تبریز و اردبیل دقت تخمین تابش نسبت به سه ایستگاه دیگر از عملکرد

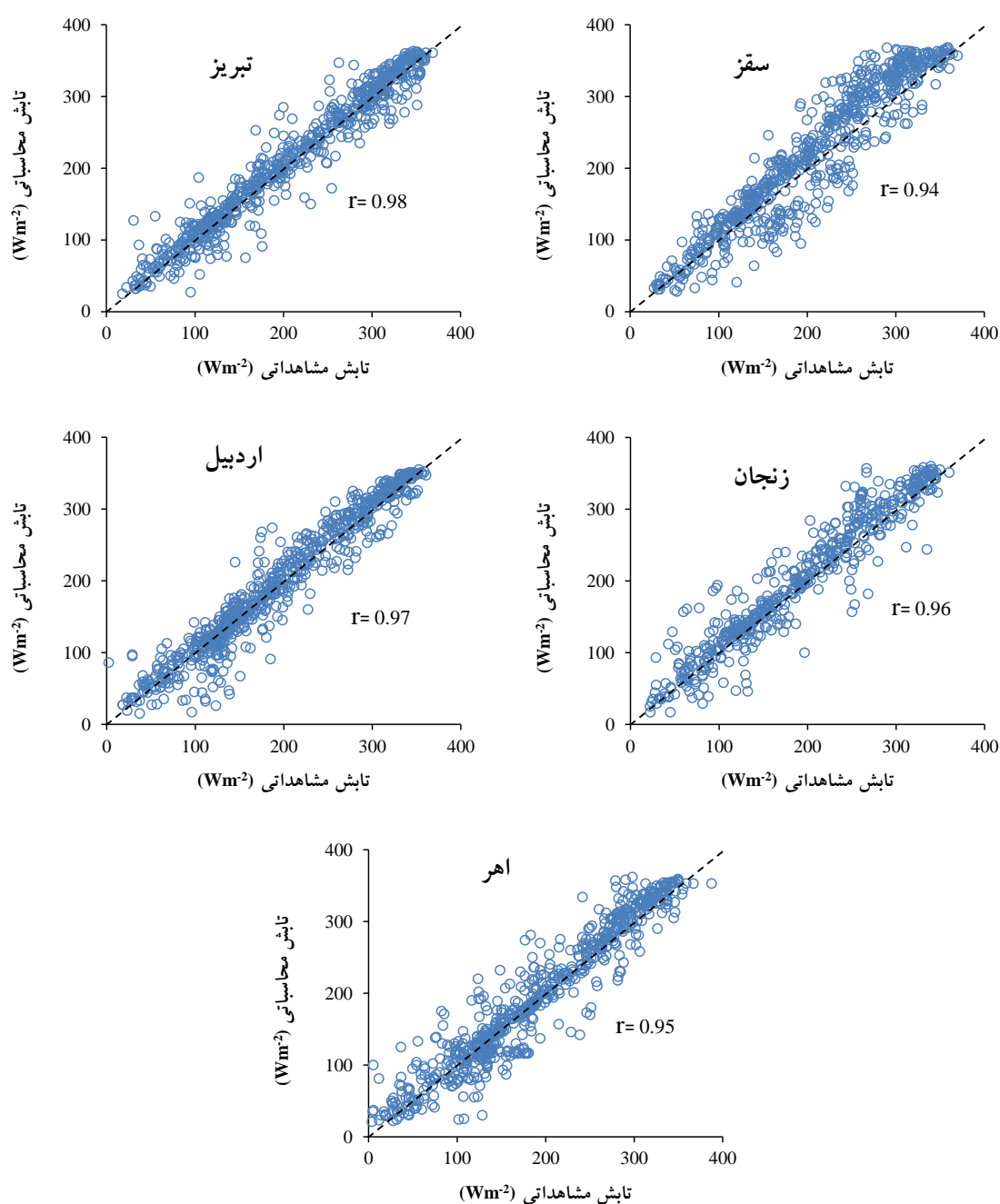




شکل ۲- نقشه‌های تابش SIS محدوده مورد مطالعه.

جدول ۲- نتایج حاصل از آماره‌های اعتبارسنجی.

GSD (%)	MAE ($W m^{-2}$)	BIAS ($W m^{-2}$)	RMSE ($W m^{-2}$)	ایستگاه
۱۶/۸۲	۲۷/۹۰	۱۳/۰۵	۳۴/۵۱	سقز
۱۰/۱۷	۱۴/۸۱	۳/۶۴	۲۱/۱۲	تبریز
۱۴/۷۵	۲۰/۰۲	۱۰/۰۵	۲۸/۳۶	زنجان
۱۲/۰۸	۱۶/۵۱	۱/۲۵	۲۳/۴۳	اردبیل
۱۴/۷۶	۲۰/۰۸	۴/۵۹	۲۸/۲۰	اهر



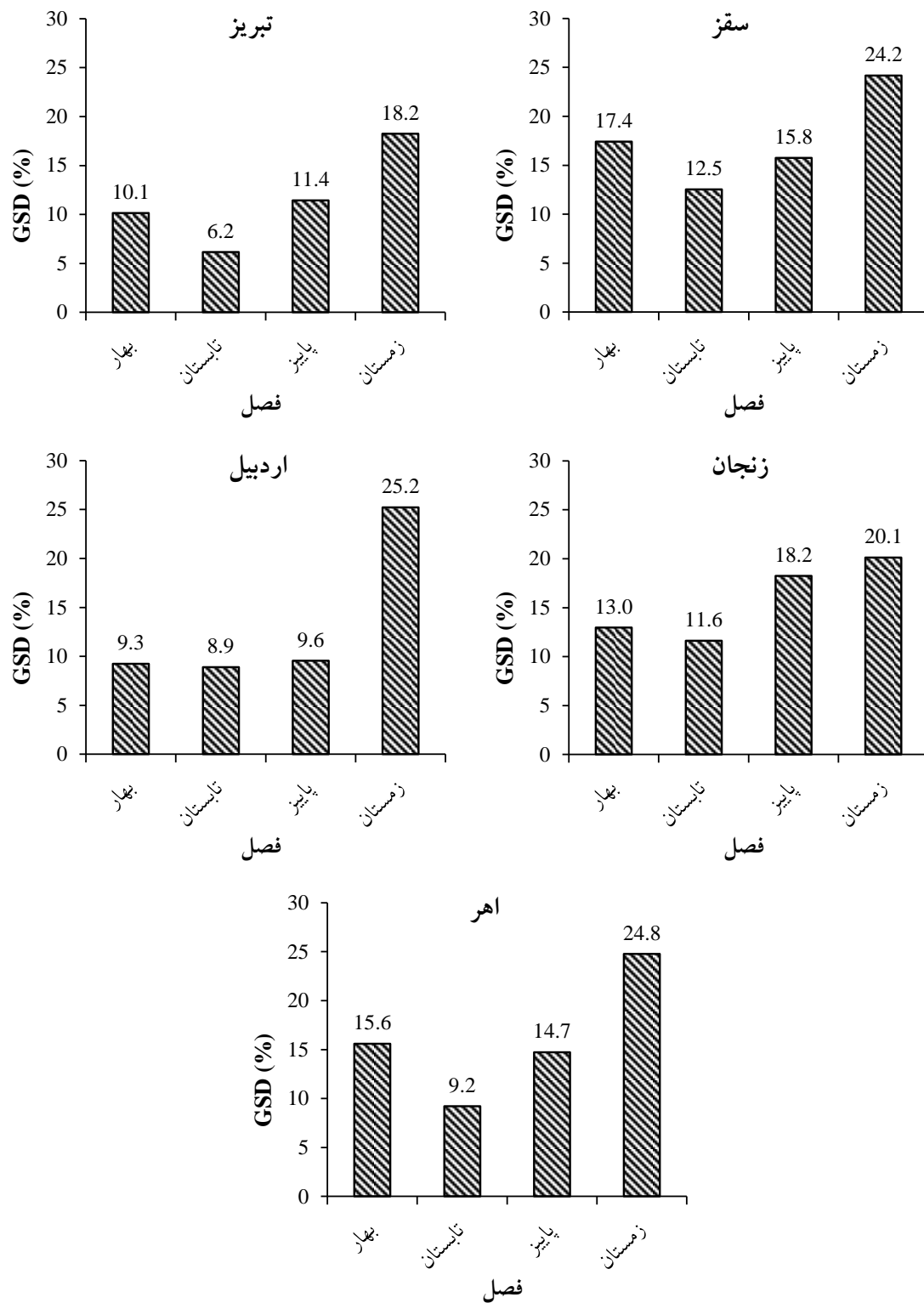
شکل ۳ - نمودار پراکندگی داده‌های تابش اندازه‌گیری و ماهواره‌ای.

ایستگاه‌ها برآورد تابش در فصل تابستان از دقت بالایی (GSD = ۶/۱۲-۲/۵) نسبت به فصل‌های دیگر برخوردار است. بر عکس، فصل زمستان در همه ایستگاه‌ها کمترین دقت تخمین تابش را با توجه به معیار GSD (۱۸/۲۵-۲/۲) داشته است. این اختلاف در دقت برآورد

برای بررسی اثر تغییرات فصلی در منطقه مورد مطالعه بر دقت تخمین تابش SARAH در ایستگاه‌های مورد بررسی، معیار بدون بعد GSD به تفکیک فصل محاسبه و برای درک بهتر به صورت نمودار ستونی در شکل ۴ ارائه گردید. با توجه به این شکل، در همه

ارتفاع خورشیدی کم را در دوره‌های طلوع و غروب خورشید پوشش نمی‌دهند. همان‌گونه که می‌دانیم، داده‌های ماهواره‌ای منبع عظیمی از اطلاعات مربوط به آب و هوا را ارائه می‌دهند و می‌توانند در کاربردهای مختلف نظیر جغرافیایی، اقلیم‌شناسی و علوم آب و هواشناسی مورد استفاده قرار گیرند. با این حال این داده‌ها، منابعی از مشکلات بالقوه را در بر دارند. هنگامی که در نظر است به جای مشاهدات سطحی، از داده‌های ماهواره‌ای استفاده شود، مسئله تطبیق نقاط ایستگاه‌های زمینی با نقاط شبکه ماهواره که معمولاً نقاط شبکه ماهواره‌ای کمی از محل ایستگاه زمینی انحراف دارد، به وجود می‌آید. در مورد داده‌های تابش خورشیدی، به ویژه داده‌های تابش SARAH، وضعیت به طور کلی مناسب است. این پارامتر (تابش خورشیدی) به طور ابزاری در سطح اندازه‌گیری می‌شود، بنابراین هیچ عنصر ذهنی یا سلیقه شخصی وجود ندارد که هنگام مقایسه داده‌ها با مقادیر متناظر ماهواره‌ای (از قبیل داده‌های تابش SARAH که در این مطالعه استفاده گردید) در نظر گرفته شود. به همین دلیل، استفاده از داده‌های تابش SARAH در کاربردهای آب و هواشناسی بسیار امیدوارکننده و مفید به نظر می‌رسد (ژاک و همکاران ۲۰۱۵).

تابش فصلی در ایستگاه اردبیل و اهر بیشتر مشهود است و مقدار GSD فصل‌های بهار، پاییز و تابستان اختلاف چشمگیری با مقدار مربوط به فصل زمستان در این ایستگاه دارا می‌باشند. نتایج مطالعات ریحلا و همکاران (۲۰۱۵) در فنلاند و سوئد نیز حاکی از آن بوده است که برآورد تابش در فصل زمستان در این مناطق از دقت کمتری نسبت به سایر فصول برخوردار است. عملکرد ضعیف داده‌های تابش SARAH در فصل زمستان در مناطقی که در عرض‌های جغرافیایی بالا قرار داشته و از بارش برف فصلی برخوردار می‌باشند، رایج است. این به دلیل این واقعیت است که الگوریتم ماهواره تنها از کانال قابل مشاهده برای تشخیص حضور ابر استفاده می‌کند، از این روی نمی‌تواند بین پیکسل مربوط به ابر یا سطح برف تفاوت ایجاد کند و این امر موجب منبع خطا می‌گردد (اوراکا و همکاران ۲۰۱۷). منبع اصلی خطا در محصولات روزانه تابش SARAH (که از تلفیق مقادیر ساعتی تابش SARAH به دست می‌آید) هنگامی رخ می‌دهد که مقادیر ساعتی تابش در دسترس نبوده یا به عبارتی داده‌های ساعتی تابش در طول یک روز کامل نباشد و هیچ روشی برای پرکردن شکاف داده‌های مربوطه وجود نداشته باشد. این مقادیر گم‌شده در چندین محصول ماهواره‌ای رایج هستند، زیرا الگوریتم‌های ماهواره‌ای معمولاً زوایای



شکل ۴- نمودار ستونی معیار GSD به تفکیک فصل.

نتیجه‌گیری کلی

در همه ایستگاه‌ها از دقت بالایی نسبت به فصل‌های دیگر برخوردار است. کمترین دقت تخمین تابش هم با توجه به معیار GSD در فصل زمستان اتفاق افتاده است. این امر به دلیل عدم توانایی الگوریتم‌های ماهواره‌ای در متمایز کردن پوشش ابر از سطح پوشش برف در فصل زمستان، در مناطق دارای بارش برف فصلی رخ می‌دهد. داده‌های تابش خورشیدی به دست آمده از اندازه‌گیری‌های ماهواره‌ای CMSAF می‌توانند یک مکمل مفید برای مشاهدات زمینی باشند. آنها می‌توانند نقشه‌های واقع‌گرایانه و با دقت بالا از تابش خورشیدی دریافتی را در هنگام ترکیب با مشاهدات زمینی ایجاد کنند. سپس این نقشه‌ها می‌توانند از کاربردهای عملی مختلفی برای نمونه در نیروگاه‌های خورشیدی برخوردار باشند. هنگامی که نسخه بلندمدت داده‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد، اطلاعات مفیدی در مورد تغییرات اقلیمی محلی نیز به دست می‌دهد. این موضوع به ویژه در موارد استفاده از داده‌های تابش SARAH که طول دوره آماری ۳۵ ساله (۲۰۱۷-۱۹۸۳) را پوشش می‌دهد، بسیار کارساز خواهد بود.

از زمانی که داده‌های تابش SARAH منتشر شد، مطالعات آب و هواشناسی بیشتر شده است، زیرا اکنون، یک سری زمانی تابش همگن با طول دوره آماری ۳۵ سال در اختیار می‌باشد. از آنجایی که تابش یکی از ویژگی‌های اصلی آب و هوایی است، می‌توان آن را برای کاربردهای مختلف در کشاورزی و همچنین در بسیاری از طبقه‌بندی‌های اقلیم‌شناسی مورد استفاده قرار داد. در این مطالعه برای اولین بار در کشور داده‌های ماهواره‌ای تابش SARAH برای تخمین تابش روزانه در ایستگاه‌های هواشناسی شمال‌غرب کشور مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج به دست‌آمده نشان داد که داده‌های تابش SARAH از دقت بالایی در برآورد تابش در ایستگاه‌های مورد مطالعه برخوردار است. با این حال، عواملی نظیر توپوگرافی بر دقت تخمین این داده‌ها تاثیرگذار می‌باشد. تفکیک داده‌های تابش به صورت فصلی و ارزیابی داده‌های مشاهداتی و محاسباتی نشان داد که برآورد تابش در فصل تابستان

منابع مورد استفاده

- Antonanzas-Torres F, Cañizares F and Perpiñán O, 2013. Comparative assessment of global irradiation from a satellite estimate model (CM SAF) and on-ground measurements (SIAR): a Spanish case study. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 21: 248-261.
- Asakereh H, Tarkarani F and Soltani S, 2013. On tempo-spatial characters of extreme daily precipitation of northwest of Iran. *Iran-Water Resources Research* 8: 39-53. (In Persian with English abstract)
- Cano D, Monget JM, Albuisson M, Guillard H, Regas N and Wald L, 1986. A method for the determination of the global solar-radiation from meteorological satellite data. *Solar Energy* 37: 31-39.
- Diekmann FJ, Happ-S, Rieland M, Benesch W and Kasten F, 1988. An operational estimate of global solar irradiance at ground level from METEOSAT data: results from 1985 to 1987. *Meteorologische Rundschau* 41: 65-79.
- Dürr B, Zelenka A, Müller R and Philipona R, 2010. Verification of CM-SAF and MeteoSwiss satellite based retrievals of surface shortwave irradiance over the Alpine region. *International Journal of Remote Sensing* 31: 4179-4198.
- Deo RC and Şahin, 2017. Forecasting long-term global solar radiation with an ANN algorithm coupled with satellite-derived (MODIS) land surface temperature (LST) for regional locations in Queensland. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 72: 828-848.

- Emamifar S, Noroozi AA, Seyedi Hosseini S and Karimzad Anzabi A, 2013. Evaluating M5 model tree and two empirical models based on air temperature to estimate solar radiation, using LST in a semi-arid climate. *Journal of Soil and Water Resources Conservation* 3: 75-86. (In Persian with English abstract)
- Emamifar S and Alizadeh A, 2014. Estimation of solar radiation using land surface temperature MODIS sensor data and neural network model. *Journal of Water and Soil* 28(3): 617-625. (In Persian with English abstract)
- Hess M, Koepke P and Schult I, 1998. Optical properties of aerosols and clouds: the software package OPAC. *Bulletin of the American Meteorological Society* 79: 831-844.
- Huld T, Müller R, Gracia-Amillo A, Pfeifroth U and Trentmann J, 2016. Surface Solar Radiation Data Set - Heliosat, Meteosat-East (SARAH-E) - Edition 1. Satellite Application Facility on Climate Monitoring.
- Mazorra Aguiar L, Pereira B, David M, Diaz F and Lauret P, 2015. Use of satellite data to improve solar radiation forecasting with Bayesian Artificial Neural Networks. *Solar Energy* 122: 1309-1324.
- Möser W, 1983. Global radiation from satellite measurements. *Communications from the Institute of Geophysics and Meteorology of the University of Cologne*. Cologne. 89p.
- Müller R, Behrendt T, Hammer A and Kemper A, 2012. A new algorithm for the satellite-based retrieval of solar surface irradiance in spectral bands. *Remote Sensing* 4: 622-647.
- Müller R, Pfeifroth U, Träger-Chatterjee C, Trentmann J and Cremer R, 2015. Digging the METEOSAT treasure-3 decades of solar surface radiation. *Remote Sensing* 7(6): 8067-8101.
- Mayer B and Kylling A, 2005. Technical note: The libRadtran software package for radioactive transfer calculations - description and examples of use. *Atmospheric Chemistry and Physics* 5: 1855-1877.
- Nouri M, Mehdi H and Mohammad B, 2017. Assessing trends of aridity index changes over 1966-2100 period in the Northwest of Iran. *Journal of Watershed Engineering and Management* 8(4): 439-453. (In Persian with English abstract)
- Qin J, Chen Z, Yang K, Liang S and Tang W, 2011. Estimation of monthly-mean daily global solar radiation based on MODIS and TRMM products. *Applied Energy* 88(7): 2480-2489.
- Riihelä A, Carlund T, Trentmann J, Müller R and Lindfors AV, 2015. Validation of CM SAF surface solar radiation datasets over Finland and Sweden. *Remote Sensing* 7: 6663-6682.
- Sanchez-Lorenzo A, Wild M and Trentmann J, 2013. Validation and stability assessment of the monthly mean CM SAF surface solar radiation data over Europe against a homogenized surface dataset (1983-2005). *Remote Sensing Environment* 134: 355-366.
- Samani Z, 2000. Estimation solar radiation and evapotranspiration using minimum climatological data. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 126(4): 265-267. (In Persian with English abstract)
- Timilsina GR, Kurdgelashvili L and Narbel PA, 2012. Solar energy: Markets, economics and policies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16: 449-465.
- Urraca R, Gracia-Amillo AM, Koubli E, Huld T, Trentmann J, Riihelä A, Lindfors AV, Palmer D, Gottschalg R and Antonanzas-Torres F, 2017. Extensive validation of CM SAF surface radiation products over Europe. *Remote Sensing of Environment* 199: 171-186.
- Zak M, Miksovsky J and Pisoft P, 2015. CMSAF radiation data: new possibilities for climatological applications in Czech Republic. *Remote Sensing* 7: 14445-14457.