

ارزیابی محصولات مختلف ماهواره‌ای تابش سطح زمین با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده زمین در اقلیم‌های مختلف ایران

نوشین احمدی باصری - دانشجوی دکتری هواشناسی کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی‌سینا، همدان، ایران
علی‌اکبر سیزی‌پرور⁻ - استاد هواشناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی‌سینا، همدان
مهراوه خدامرادپور - استادیار هواشناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی‌سینا، همدان
خوان لوئیس گرو راسکادو - دانشیار فیزیک کاربردی، مؤسسه تحقیقات بین‌دانشگاهی سیستم زمین در آندلس (IISTA-CEAMA)، دانشگاه گرانادا، اسپانیا
لوکاس آلدوس آربولداس - استاد فیزیک کاربردی، مؤسسه تحقیقات بین‌دانشگاهی سیستم زمین در آندلس (IISTA-CEAMA)، دانشگاه گرانادا، اسپانیا

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۷/۱۴ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۱/۲۰

چکیده

تابش سطح زمین (SSR) از مؤلفه‌های اساسی در مطالعات هوا و اقلیم‌شناسی به‌شمار می‌رود و تغییرات آن تأثیر زیادی در اکوسیستم‌های زیست‌محیطی زمین و اقلیم مناطق دارد. به‌دلیل محدودیت در اندازه‌گیری‌های زمینی و نیاز به داده‌هایی با کیفیت بالا، روش‌های مختلفی برای برآورد تابش SSR توسعه یافته است. یکی از مهم‌ترین روش‌های برآورد تابش SSR، مدل‌های ماهواره‌محورند که با داشتن قدرت تفکیک زمانی و مکانی بالا و دسترسی رایگان می‌توانند منبع جایگزین مناسبی برای مناطق فاقد ایستگاه باشند. هدف از این پژوهش، ارزیابی تابش SSR استخراج‌شده از سه مدل ماهواره‌محور CERES، CLARA و SARAH با استفاده از اندازه‌گیری‌های زمینی در ایران در مقیاس روزانه است. نتایج این تحقیق نشان داد محصول SARAH با اختلاف کمی نسبت به دو محصول CERES و CLARA با ضریب تعیین برابر با ۰.۹۳ و خطای RMSE برابر با 22.4 W.m^{-2} در ارزیابی تابش SSR روزانه در ایران عملکرد مناسب‌تری دارد. همچنین، بررسی خطای RMABD نشان داد محصولات ماهواره‌ای مورد مطالعه در شرایط آسمان صاف (ماه‌های گرم سال) با مقدار خطای به میزان ۵.۵، ۵.۶ و ۴.۸ درصد نسبت به شرایط ابرناکی (ماه‌های سرد سال) به مقدار خطای به میزان ۱۲.۲، ۱۱.۴ و ۱۱ درصد به ترتیب توسط CERES، CLARA و SARAH توانایی بیشتری در برآورد تابش SSR دارند. تغییرات مکانی تابش روزانه SSR بیانگر آن است که محصولات ماهواره‌ای مورد مطالعه در مناطق خشک و نیمه‌خشک به ترتیب بهترین عملکرد را نسبت به مناطق ساحلی دارند.

واژگان کلیدی: محصول تابش SARAH-CLARA-CERES، مقایسه ماهانه و فصلی.

مقدمه

تابش سطح زمین^۱، به‌عنوان یکی از مهم‌ترین منابع انرژی، نقش پررنگی در کنترل آب و هوا و بودجه انرژی سطح زمین دارد. تابش SSR از مؤلفه‌های اساسی در مطالعات هوا و اقلیم‌شناسی، فرایندهای هیدرولوژیکی، فتوسنتز، کشاورزی، و توسعه انرژی محسوب می‌شود. همچنین، تغییرات آن تأثیر زیادی در شار گرمای محسوس و گرمای نهان، چرخه هیدرولوژی، اکوسیستم‌های زیست‌محیطی زمین و اقلیم مناطق دارد (وانگ و همکاران، ۲۰۱۶: ۳۸۵). با این حال، به‌دلیل هزینه‌های بالای نصب و نگهداری از تجهیزات، اندازه‌گیری تابش SSR به‌طور معمول در همه ایستگاه‌های هواشناسی انجام نمی‌شود. بنابراین،

Email: swsabzi@basu.ac.ir

⁻ نویسنده مسئول، تلفن: ۰۹۱۲۱۸۵۹۹۷۰

به دلیل محدودیت در اندازه‌گیری‌های زمینی و نیاز به داده‌هایی با کیفیت بالا، روش‌های مختلفی برای برآورد تابش SSR توسعه یافتند (اسپینار و همکاران، ۲۰۰۹: ۱۱۸؛ وانگ و همکاران، ۲۰۱۸: ۱؛ ژانگ و همکاران، ۲۰۱۹: ۲۴۷).

از جمله روش‌های برآورد تابش SSR می‌توان به مدل‌های تجربی، مدل‌های فیزیکی مبتنی بر مدل‌های انتقال تابش، مدل‌های نیمه‌تجربی، و مدل‌های مبتنی بر محصولات ماهواره‌ای و بازتحلیل اشاره کرد (جورنی و برتراند، ۲۰۱۰؛ اوراکا و همکاران، ۲۰۱۷). در این میان، مدل‌های ماهواره‌محور، با داشتن قدرت تفکیک زمانی و مکانی بالا، هزینه پایین، و دسترسی رایگان، مهم‌ترین و رایج‌ترین روش برآورد تابش SSR هستند و می‌توانند یک منبع جای‌گزین مناسب برای مناطق فاقد ایستگاه و مناطق با توزیع ناهمگن ایستگاه‌ها باشند (پولو و همکاران، ۲۰۱۶: ۲۶؛ یانگ و همکاران، ۲۰۱۸: ۱۸۵). همچنین، این مدل‌ها برای پردازش دوره‌های اقلیمی تهیه شده و همانند داده‌های اندازه‌گیری‌شده شکاف زمانی ندارند (اوراکا و همکاران، ۲۰۱۷: ۱۷۴). بدین‌منظور، محصولات ماهواره‌ای متنوعی توسعه یافته‌اند. به‌عنوان مثال، پروژه بین‌المللی اقلیم‌شناسی ابر توسط ماهواره به‌وسیله مؤسسه گودارد برای مطالعات فضایی^۱، سیستم انرژی تابشی زمین و ابر^۲، تسهیلات برنامه‌ریزی ماهواره‌ای - دیده‌بانی اقلیمی^۳، تسهیلات برنامه‌ریزی ماهواره‌ای و تحلیل سطح زمین^۴ و محصولات ماهواره‌ای سطح زمین جهانی^۵ برای تولید محصولات تابشی مبتنی بر ماهواره به خدمت گماشته شده‌اند (چن و همکاران، ۲۰۱۴: ۷۱۳۷).

مدل‌های مبتنی بر ماهواره می‌توانند براساس تصاویری از ماهواره‌های مدار قطبی یا ماهواره‌های زمین ثابت تهیه شده باشند. محصولات مدار قطبی (زمین ثابت) دارای قدرت تفکیک زمانی کم (بالا) و قدرت تفکیک مکانی جهانی (محدود)، حداکثر عرض جغرافیایی ۶۵ درجه شمالی و جنوبی) هستند (اوراکا و همکاران، ۲۰۱۸: ۳۳۹). در این میان، محصولات تابش سطح CM SAF و CERES در پژوهش‌های بسیاری، در مناطق مختلف جهان بررسی شده‌اند. آلمورکس و همکاران (۲۰۱۷) در اسپانیا و کارمونا و همکاران (۲۰۱۸) در آرژانتین، تابش SSR برآوردشده توسط CERES را ارزیابی کردند. نتایج همبستگی قوی بین CERES و داده‌های اندازه‌گیری‌شده تابش ماهانه با مقادیر ۰/۹۶ $R^2 =$ در اسپانیا و ۰/۹۹۵ $R^2 =$ را در آرژانتین نشان داد. این نتایج مشابه با مقادیر ارائه‌شده توسط چن و همکاران (۲۰۱۴) با مقدار $R^2 = 0.92$ به‌طور متوسط برای کل جهان بود. الکساندری و همکاران (۲۰۱۷) تابش SSR برآوردشده توسط محصولات ماهواره‌ای و بازتحلیل مختلفی را در منطقه شرق مدیترانه مقایسه کردند. نتایج نشان داد مقادیر ماهانه محصول ماهواره‌ای SARAH تابش SSR را در منطقه مورد مطالعه به میزان $7/1 \text{ W.m}^{-2}$ کم برآورد می‌کند. خروجی تابش SSR محصول CM SAF به کرات در مناطق مختلف جهان بررسی شده است، از جمله توسط مولر و همکاران (۲۰۰۹)؛ جورنی و برتراند (۲۰۱۰)؛ پوسلت و همکاران (۲۰۱۲)؛ سنچز لورنزو و همکاران (۲۰۱۳)؛ ربهلا و همکاران (۲۰۱۵)؛ اوراکا و همکاران (۲۰۱۷). همه این پژوهش‌ها برتری محصول ماهواره‌ای CM SAF را نسبت به سایر محصولات ماهواره‌ای و روش‌های برآورد تابش SSR نشان دادند.

به‌رغم اینکه ایران در زمره کشورهای است که بیشترین میزان تابش ورودی زمین را دارد (مجرد، ۱۳۹۴: ۵۷)، تجهیزات اندازه‌گیری تابش SSR پوشش فضایی مناسبی ندارند. در عمده مطالعات انجام‌شده در ایران، برای برآورد تابش SSR، از

1. International Satellite Cloud Climatology Project, NASA Goddard Institute for Space Studies (ISCCP/GISS)
2. Clouds and the Earth's Radiant Energy System (CERES)
3. Climate Monitoring-Satellite Application Facility (CM SAF)
4. Land Surface Analysis-Satellite Application Facility (LSA-SAF)
5. Global Land Surface Satellite (GLASS)

روش‌های تجربی بر پایه متغیرهای مختلف هواشناسی استفاده شده است. از جمله می‌توان به پژوهش‌های سیزی‌پروور (۲۰۰۸)، موسوی و همکاران (۲۰۱۵)، لطفی‌نژاد و همکاران (۲۰۱۸)، و جهانی و محمدی (۲۰۱۹) اشاره کرد. با وجودی اینکه در پژوهش‌های یادشده نتایج رضایت‌بخشی از ارزیابی روش‌های مورد بررسی ارائه شده، به سبب در نظر گرفتن تنها تعداد محدودی پارامترهای هواشناسی، این روش‌ها گویای دقیقی از تغییرات تابش SSR در مقیاس مکانی وسیع با اقلیم‌های گوناگون نیستند. به منظور برآورد تابش SSR، روش‌های مختلف ماهواره‌ای نیز توسط محققان به کار گرفته شدند. از جمله، رحیمی خوب و همکاران (۱۳۹۰) یک مدل همبستگی چندمتغیره و یک روش آماری سنجش از دور برای برآورد تابش SSR با استفاده از داده‌های تصاویر ماهواره‌ای نوا سنجنده AVHRR برای منطقه جنوب شرق تهران مقایسه و ارزیابی کردند. نتایج نشان داد مدل همبستگی چندمتغیره با ضریب تعیین برابر با ۰٫۹۳ در مقایسه با روش آماری دقت بیشتری در برآورد تابش SSR منطقه دارد. تازیک و همکاران (۱۳۹۴) با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای سنجنده مودیس و با استفاده از روش تبدیل آلبیدوی باریک باند به پهن باند، میزان تابش کل لحظه‌ای موج کوتاه خورشیدی در استان‌های قم، اصفهان، تهران، و سمنان را برآورد کردند. نتایج میزان RMSE و متوسط خطا را به مقدار 42 W.m^{-2} و 40.75 نشان داد. صداقت مصعبی و همکاران (۱۳۹۸) در چهار ایستگاه ایران، داده‌های تابش اندازه‌گیری شده SSR و اتمسفر سنجنده مودیس را به‌عنوان ورودی مدل پارامتریکی مدل تجربی آنگستروم- پرسکات قرار دادند و با یکدیگر مقایسه کردند. نتایج نشان داد دقت مدل در روزهای ابری در شرایطی که داده‌های سنجنده مودیس استفاده شده بالاتر از شرایطی است که داده‌های اندازه‌گیری شده زمین مورد استفاده قرار گرفته است. مختاری و همکاران (۲۰۱۸) تابش SSR اندازه‌گیری شده در ایستگاه قزوین را با سه روش معادلات تجربی، مدل‌های بازتحلیل GLDAS و NCEP/NCAR و محصول ماهواره‌ای CM-SAF مقایسه کردند. نتایج نشان داد مدل کالیبره شده آنگستروم بهترین عملکرد را نسبت به دیگر محصولات دارد و محصول ماهواره‌ای CM-SAF با ضریب تعیین برابر با ۰٫۵۳ ضعیف‌ترین کارایی را نشان داد.

با وجود برتری مدل‌های ماهواره‌ای نسبت به سایر روش‌های برآورد تابش SSR، این روش‌ها نیز همراه با خطا هستند. در نظر گرفتن میانگین متوسط برای منطقه محصور شده در پیکسل‌ها، ایجاد فاصله زمانی بین تصویربرداری‌های متوالی، تأثیر اثر انطباق^۱ در زوایای سمت‌الرأسی^۲ بالا در تشخیص موقعیت ابر، بسته به نوع ماهواره، نمونه‌ای از خطاهای ایجاد شده در روش‌های ماهواره‌ای اند (پولو و همکاران، ۲۰۱۶: ۲۸؛ اوراکا و همکاران، ۲۰۱۷: ۱۷۶). بنابراین، لازم است پیش از به‌کارگیری این محصولات، کیفیت آن‌ها با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده زمین به صورت محلی ارزیابی و اعتبارسنجی شود (زک و همکاران، ۲۰۱۵: ۱۴۴۴۷؛ پولو و همکاران، ۲۰۱۶: ۲۸). هدف از این مطالعه ارزیابی و اعتبارسنجی تابش SSR استخراج شده از سه محصول مبتنی بر ماهواره (CLARA، CERES، و SARAH) در برابر تابش روزانه اندازه‌گیری شده در ۲۴ ایستگاه تابش‌سنجی در ایران است.

مواد و روش‌ها

داده‌های اندازه‌گیری شده زمین

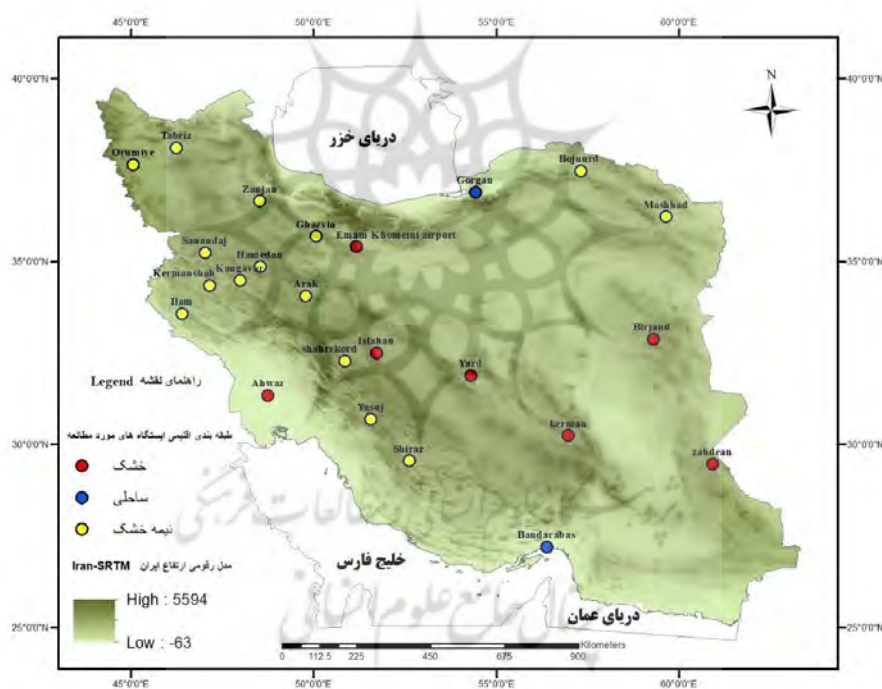
ایران با مساحتی معادل 1648198 کیلومتر مربع در عرض شمالی 31° تا 47° 39° و طول جغرافیایی شرقی 51° تا 18° 63° واقع شده است. در این مطالعه، تابش اندازه‌گیری شده SSR از ۲۴ ایستگاه تابش‌سنجی توسط سازمان

1. Parallax

2. Solar Zenith Angle (SZA)

هواشناسی ایران از دسامبر ۲۰۱۲ تا نوامبر ۲۰۱۵ به منظور ارزیابی محصولات CERES و CLARA (CM-SAF SARAH) استخراج شد. هر ایستگاه شامل یک پیرانومتر CM5 ساخته شده توسط KIPP&Zonen، هلدن و ثبت کننده Campbell-Stokes برای اندازه‌گیری تابش SSR روزانه است (مرادی، ۲۰۰۹: ۳). ایستگاه‌های مورد مطالعه پس از بررسی نقشه‌های مدل رقمی ارتفاع^۱ و اقلیم یونسکو، به مناطق ساحلی، مناطق دارای اقلیم خشک، و مناطق دارای اقلیم نیمه‌خشک تقسیم شدند. پراکنش جغرافیایی ایستگاه‌های هواشناسی مورد استفاده در این مطالعه در شکل ۱ ارائه شده است.

از آنجا که داده‌های اندازه‌گیری شده زمینی خام همراه با خطاهایی شامل خطای تجهیزاتی و عملیاتی هستند (یونس و همکاران، ۲۰۰۵: ۱۵۳۵؛ مرادی، ۲۰۰۹: ۱؛ استیوز و همکاران، ۲۰۱۱: ۱۴۶؛ لایتی و همکاران، ۲۰۱۴: ۳۳۷)، پیش از استفاده در مطالعات گوناگون باید کیفیت این داده‌ها کنترل و خطاها غریبال شود. در این مطالعه از روش پیشنهادی مرادی برای کنترل کیفیت داده‌ها استفاده شد (مرادی، ۲۰۰۹). جزئیات بیشتر درباره روش کنترل کیفیت توسط مرادی (۲۰۰۹) تشریح شده است.



شکل ۱. موقعیت مکانی ایستگاه‌های تابش‌سنجی مورد مطالعه در ایران و تقسیم‌بندی ایستگاه‌ها براساس ارتفاع از سطح دریا و طبقه‌بندی اقلیمی UNESCO

داده‌های ماهواره‌ای

داده‌های CERES

ابزار علمی ماهواره‌ای CERES توسط ناسا (EOS) به منظور ارائه برآوردهای دقیق از شار تابشی خورشید در جو زمین برای دوره‌های بلندمدت فراهم شده است. الگوریتم CERES براساس پروژه ERBE پایه نهاده شده و از پارامترهای چندگانه بر

1. Digital Elevation Model (DEM)

مبنای ماهواره و مبتنی بر ابزار استفاده می‌کند و در عین حال داده‌های ماهواره‌ای با تکرار بیشتر^۱ و اطلاعات دقیق‌تری از ابرها را از ابزار دیگر سیستم مشاهدات زمین^۲ مانند MODIS با یکدیگر ترکیب می‌کند (یان و همکاران، ۲۰۱۱: ۱۴۸۹؛ چن و همکاران، ۲۰۱۴: ۷۱۴۵؛ اسمیت و همکاران، ۲۰۱۱: ۲۵۵؛ ژانگ و همکاران، ۲۰۱۹: ۲۵۴). ابزار CERES روی ماهواره‌های Terra و Aqua نصب شده است و نمونه‌گیری را در چند ساعت روز انجام می‌دهد. ابزار CERES در تولید شارهای محاسباتی از مدل انتقال تابشی Langley Fu & Liou استفاده می‌کند (کارمونا و همکاران، ۲۰۱۸: ۲۱۲؛ اسمیت و همکاران، ۲۰۱۱: ۲۵۴؛ ژانگ و همکاران، ۲۰۱۹: ۲۵۴). مجموعه داده‌های CERES توسط منابع گوناگونی چون مرکز پرواز فضایی گودارد^۳، مرکز ملی داده برف و یخ^۴، و آزمایش اقلیم و تابش خورشید^۵ تولید و آرشیو می‌شوند. خروجی تابش SSR ترکیبی است از داده‌های هواشناسی GMAO، داده‌های بازتحلیل GEOS4 و GEOS5، داده‌های اتروسل محصولات MODIS و مدل انتقال شیمیایی MATCH، داده‌های ازن SMOBA^۶ و آلبیدوی سطح از مشاهدات بالای اتمسفر آسمان صاف، مدل شده در بازه زمانی یا نقشه‌های پیشینه‌ای که به‌طور ماهانه به‌روز شده‌اند (ژانگ و همکاران، ۲۰۱۹: ۲۵۴). این داده‌ها در سایت <https://ceres.larc.nasa.gov> به رایگان در دسترس قرار دارد (جدول ۱).

داده‌های CM SAF

برنامه‌های ماهواره‌ای CM SAF^۷ برای تهیه رکوردهایی با کیفیت بالا در برنامه‌های کاربردی آب و هوایی از ماهواره‌های زمین ثابت و مدار قطبی در مقیاس اروپا و جهانی توسط سازمان اروپایی بهره‌برداری از ماهواره‌های هواشناسی^۸ تدارک دیده شده است (سنچز لورنزو و همکاران، ۲۰۱۳: ۳۵۷؛ کارلسون و همکاران، ۲۰۱۷: ۵۸۰۹؛ اوراکا و همکاران، ۲۰۱۷: ۱۷۲). CM SAF پارامترهای مختلفی از تابش را فراهم می‌کند. تابش SSR توسط محصولات CLARA^۹ و SARAH^{۱۰} ارائه می‌شود که پوشش‌های جهانی و منطقه‌ای را ارائه می‌دهند. داده‌های CLARA براساس ماهواره مدار قطبی و داده‌های SARAH براساس ماهواره زمین ثابت METEOSAT^{۱۱} که عمدتاً اروپا، آفریقا، اقیانوس اطلس، و بخش‌هایی از آمریکای جنوبی^{۱۱} را پوشش می‌دهد. استوار است (جدول ۱). محصول SARAH به‌جز قسمت‌هایی از استان خراسان (ایستگاه مشهد)، بقیه قسمت‌های ایران را پوشش می‌دهد. محصولات CM SAF در سایت https://www.cmsaf.eu/EN/Home/home_node.html در دسترس است.

داده‌های CLARA

CLARA شامل مجموعه‌ای مشتق شده از سنسور AVHRR بر روی ماهواره‌های مدار قطبی NOAA و METOP است. این مجموعه قبل از هرگونه پردازش و بازبازی نخست با استفاده از داده‌های MODIS، که مرجع در نظر گرفته شده، کالیبره و همگن شده‌اند. داده‌های تابش SSR با روش جداول جست‌وجو^{۱۲} با استفاده از داده‌های کمکی بخار آب،

1. More-frequent
2. Earth Observing System (EOS)
3. Goddard Space Flight Center (GMAO)
4. National Snow and Ice Data Center
5. Solar Radiation and Climate Experiment
6. Stratosphere Monitoring Ozone Blended Analysis (SMOBA)
7. Satellite Application Facility on Climate Monitoring (CM SAF)
8. The European Organization for the Exploitation of Meteorological Satellites (EUMETSAT)
9. CM SAF cLOUD, Albedo and surface RADIATION dataset from AVHRR data (CLARA)
10. Surface Solar Radiation Data Set – Heliosat (SARAH)
11. MSG full disk
12. Lookup table (LUT)

آلیدوی سطح، و بارگیری آتروسول به‌دست می‌آیند. ثبت داده‌های تابش SSR با استفاده از اطلاعات الگوریتم تشخیص ابر SAF PPSv2014 و تابش حاصل از ماهواره در کانال‌های ماهواره‌ای AVHRR^۱ باندهای مرئی و نزدیک مادون قرمز انجام می‌شود (کارلسون و همکاران، ۲۰۱۷).

داده‌های SARAH

محصول SARAH برای تولید داده در دوره اقلیمی بلندمدت در نظر گرفته شده است. در این محصول از ابزار MVIRI^۲ روی ماهواره نسل اول Meteosat و ابزار SEVIRI^۳ و GERB^۴ روی نسل دوم ماهواره‌های Meteosat استفاده شده است. به‌منظور بهره‌برداری از خصوصیات هر دو ابزار، الگوریتمی مشابه MVIRI برای SEVIRI نیز اعمال می‌شود. این الگوریتم شامل دو روش Heliosat و MAGIC^۵ است و MAGICOL نامیده می‌شود (مولر و همکاران، ۲۰۰۹؛ ۲۰۱۳؛ ریپلا و همکاران، ۲۰۱۵؛ ۶۶۶۴؛ فیفورت و همکاران، ۲۰۱۵؛ ۱۷۳۹؛ کوه و همکاران، ۲۰۱۷).

جدول ۱. مشخصات محصولات ماهواره‌ای تابش SSR

محصولات ماهواره‌ای	پوشش فضایی	پوشش زمانی	قدرت تفکیک مکانی	قدرت تفکیک زمانی
CERES	جهانی	۲۰۰۰- حال حاضر	۱°×۱°	روزانه / ماهانه
CLARA	جهانی	۱۹۸۲-۲۰۱۵	۰٫۲۵°×۰٫۲۵°	روزانه / ماهانه
SARAH	MSG full disk	۱۹۸۳-۲۰۱۷	۰٫۰۵°×۰٫۰۵°	لحظه ای / روزانه / ماهانه

درون‌یابی

از آنجا که محصولات ماهواره‌ای مورد بررسی در غالب شبکه‌بندی و با فرمت NetCDF ارائه می‌شوند، برای مطابقت این داده‌ها با داده‌های اندازه‌گیری شده زمینی از روش درون‌یابی نزدیک‌ترین همسایگی استفاده و مجموعه داده‌های ماهواره‌ای برای نقاط ایستگاهی با استفاده از نرم‌افزار CDO^۶ استخراج شدند. همچنین، به‌دلیل اینکه در روش‌های درون‌یابی مقادیر نقطه مجهول به‌صورت میانگین مکانی به‌دست می‌آیند، ناهمگنی منطقه می‌تواند تأثیر زیادی در تعیین مقدار تابش نقاط مجهول داشته باشد.

شاخص‌های آماری ارزیابی

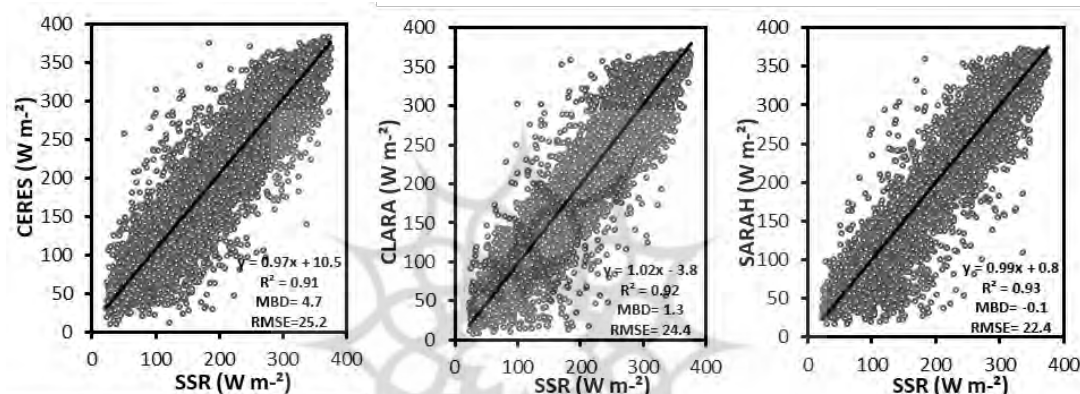
شاخص‌های آماری ارزیابی محصولات ماهواره‌ای استفاده‌شده در این مطالعه ضریب تعیین^۷ (R^2)، خطای اریبی^۸ (MBD)، ریشه دوم میانگین مربعات خطا^۹ (RMSE)، و میانگین نسبی خطای مطلق^{۱۰} (RMABD) است (روابط ۱ تا ۴). در این روابط x_i مقدار اندازه‌گیری شده زمینی و y_i مقدار تولیدشده توسط ماهواره‌ها است (اوراکا و همکاران، ۲۰۱۷؛ ۱۷۵).

$$R^2 \equiv \frac{\left| \sum_{i=1}^n y_i \bar{y} + x_i \bar{x} \right|}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}} \quad (1)$$

1. Advanced Very High-Resolution Radiometer
2. Meteosat Visible-InfraRed Imager
3. Spinning Enhanced Visible and InfraRed Imager
4. Geostationary Earth Radiation Budget
5. Mesoscale Atmospheric Irradiance Code
6. The Climate Data Operator (CDO) software
7. Coefficient of Determination
8. The Mean Bias Deviation
9. The Root Mean Squared Error
10. The Relative Mean Absolute Deviation

عملکرد کلی محصولات ماهواره‌ای

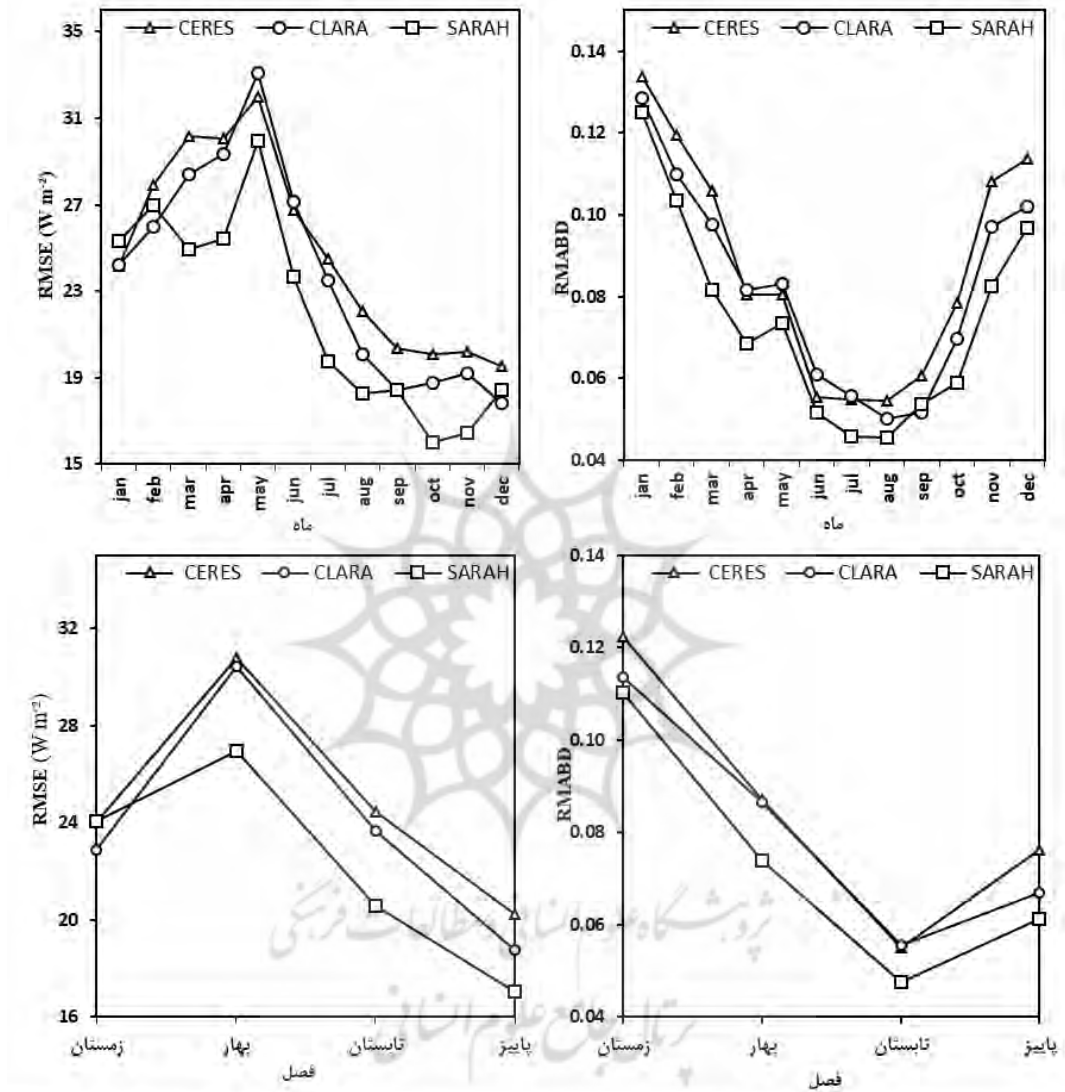
شکل ۳ ارزیابی تابش SSR سه محصول ماهواره‌ای CERES، CLARA، و SARAH را توسط داده‌های تابش SSR روزانه ۲۴ ایستگاه تابش‌سنجی ایران در دوره دسامبر ۲۰۱۲ تا نوامبر ۲۰۱۵ نشان می‌دهد. نتایج به‌دست‌آمده حاکی است که عملکرد محصول ماهواره‌ای SARAH در ارزیابی تابش روزانه ایران نسبت به دو محصول CERES و CLARA با ضریب تعیین برابر با ۰٫۹۳ و خطای RMSE برابر با 22.4 W.m^{-2} دقت بالاتری دارد. بررسی عملکرد کلی هر سه محصول در منطقه نشان می‌دهد بیشترین خطای ارزیابی توسط محصول CERES به مقدار 4.7 W.m^{-2} (بیش‌برآوردی) و کمترین خطای ارزیابی توسط محصولات SARAH و CLARA به ترتیب به مقدار -0.1 W.m^{-2} (کم‌برآوردی) و 1.3 W.m^{-2} (بیش‌برآوردی) به‌دست آمده است. این نتایج با مطالعه جورنی و برترند (۲۰۱۰)، اوراکا و همکاران (۲۰۱۷)، الکساندری و همکاران (۲۰۱۷)، و وانگ و همکاران (۲۰۱۸) همخوانی دارد.



شکل ۳. نمودار پراکنندگی تابش SSR اندازه‌گیری‌شده روزانه در برابر محصولات ماهواره‌ای CERES، CLARA، و SARAH در دوره مطالعاتی (۲۰۱۲-۲۰۱۵)

بررسی تغییرات ماهانه و فصلی تابش روزانه سه محصول ماهواره‌ای در مقابل تابش روزانه SSR اندازه‌گیری‌شده نیز در شکل ۴ نشان داد که محصولات ماهواره‌ای مورد مطالعه در شرایط آسمان صاف (ماه‌های گرم سال) نسبت به شرایط ابرناکی (ماه‌های سرد سال) توانایی بیشتری در برآورد تابش SSR دارند. مطابق شکل ۴، بیشینه خطای RMSE در ماه می با مقدار 32 W.m^{-2} ، 33.1 W.m^{-2} و 30 W.m^{-2} به ترتیب در محصولات CERES، CLARA، و SARAH و کمینه خطای RMSE در ماه دسامبر با مقدار 19.6 W.m^{-2} و 17.8 W.m^{-2} توسط CERES و CLARA و در ماه اکتبر با مقدار 16 W.m^{-2} توسط SARAH رخ داده است. همچنین، بیشینه خطای RMSE در فصل بهار با مقدار 30.8 W.m^{-2} ، 30.4 W.m^{-2} و 26.9 W.m^{-2} کمینه خطای RMSE در فصل پاییز با مقدار 20.2 W.m^{-2} ، 18.8 W.m^{-2} و 17 W.m^{-2} به ترتیب توسط CERES، CLARA، و SARAH به‌دست آمد. از آنجا که تخمین تابش در شرایط ابری (فصل زمستان) پیچیده‌تر از شرایط آسمان صاف (فصل تابستان) است، انتظار می‌رود در فصل زمستان عملکرد مدل‌های تخمین تابش کاهش و در فصل تابستان عملکرد مدل‌ها بهبود یابد. این الگو توسط معیار نسبی RMABD که ارتباط مستقیمی با میزان تابش دریافتی دارد دیده می‌شود. بررسی‌ها نشان داد بیشینه خطای RMABD در فصل زمستان (ماه ژانویه) به‌طور میانگین به مقدار 12.2 ، 11.4 و 11 درصد و کمینه در فصل تابستان (ماه‌های ژولای و آگوست) به‌طور میانگین به مقدار 5.5 ، 5.6 و 4.8 درصد توسط CERES، CLARA، و SARAH رخ داده است. نظر به اینکه شاخص‌های آماری مطلق تحت تأثیر حضور ابرها و

مقدار تابش رسیده به زمین قرار می‌گیرند، فعل و انفعالات بیشتر در شرایط آفتاب‌گیری شدید^۱ و ابرناکی باعث می‌شود که مقادیر بیشینه و کمینه خطا توسط معیارهای آماری مطلق جابه‌جا شوند (سنچز لورنزو و همکاران، ۲۰۱۳: ۳۶۰؛ اوراکا و همکاران، ۲۰۱۸: ۳۴۵؛ وانگ و همکاران، ۲۰۱۸: ۱۹۸۵).



شکل ۴. تغییرات ماهانه و فصلی خطای RMSE و RMABD (مقایسه محصولات ماهواره‌ای و تابش SSR اندازه‌گیری شده روزانه در ایران)

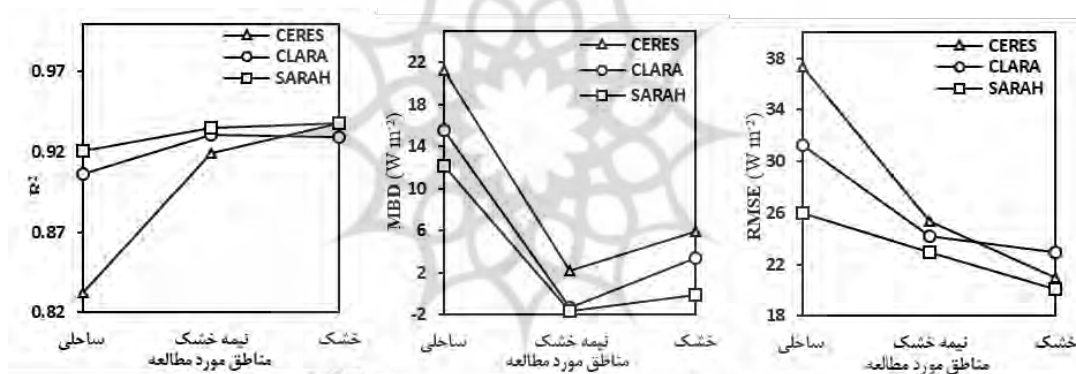
تحلیل توزیع مکانی خطاها

تغییرات مکانی تابش روزانه SSR اندازه‌گیری شده و محصولات ماهواره‌ای مورد مطالعه در شکل ۵ نشان داد که محصولات ماهواره‌ای در مناطق خشک و نیمه‌خشک به ترتیب بهترین عملکرد را نسبت به مناطق ساحلی دارند. همچنین در هر سه منطقه مورد مطالعه، محصول SARAH بهترین برآورد را از تابش SSR ارائه کرد. مطابق شکل ۵ بیشترین ضریب تعیین در ایستگاه‌های دارای اقلیم خشک، بین تابش SSR اندازه‌گیری شده و محصول SARAH برابر با ۰/۹۴ و

1. High insolation

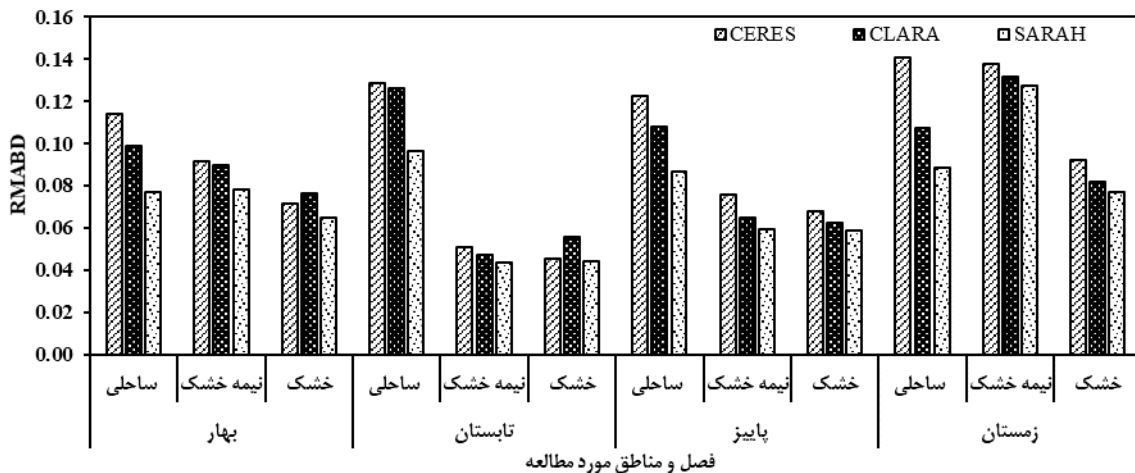
کمترین ضریب تعیین در ایستگاه‌های ساحلی، بین تابش SSR اندازه‌گیری شده و محصول CERES برابر با ۰/۸۳ مشاهده شد. مقایسه مقادیر ضریب تعیین به دست آمده حاکی از این است که ۹۴ درصد واریانس مشاهدات در ایستگاه‌های دارای اقلیم خشک توسط محصول SARAH و ۸۳ درصد واریانس مشاهدات در ایستگاه‌های ساحلی توسط محصول CERES تبیین می‌شود.

همچنین بیشینه خطای اریبی به صورت بیش‌برآوردی در مناطق ساحلی به مقدار $21/3 \text{ W.m}^{-2}$ توسط CERES و کمینه خطای اریبی به صورت کم‌برآوردی در مناطق خشک به مقدار $-0/1 \text{ W.m}^{-2}$ توسط SARAH مشاهده شد. کمینه خطای RMSE در ایستگاه‌های مناطق خشک توسط SARAH به مقدار 20 W.m^{-2} و بیشینه در ایستگاه‌های مناطق ساحلی به مقدار $37/3 \text{ W.m}^{-2}$ توسط CERES به دست آمد. این یافته‌ها منطبق است با نتایج به دست آمده توسط توماس و همکاران (۲۰۱۶)، اوراکا و همکاران (۲۰۱۷) و اوراکا و همکاران (۲۰۱۸). نتایج آنها نشان داد که در مناطق ساحلی با رطوبت بالا، خطا بسیار زیاد است. همچنین به دلیل اینکه در مناطق ساحلی، شبکه‌های تصاویر ماهواره‌ای حاوی مشخصات و شرایط آب و هوایی زمین و دریا هستند، این امر پیچیدگی‌های زیادی را در برآورد دقیق تابش در این مناطق ایجاد می‌کند و تمایل به بیش‌برآوردی توسط محصولات ماهواره‌ای نسبت به مناطق دیگر بیشتر است (اوراکا و همکاران، ۲۰۱۷).



شکل ۵. شاخص‌های ارزیابی تابش روزانه SSR برآوردشده توسط محصولات ماهواره‌ای با داده‌های اندازه‌گیری شده در سه منطقه مورد مطالعه

تغییرات فصلی خطای RMABD در شکل ۶ در سه منطقه مورد مطالعه نشان داد که بیشینه و کمینه خطای RMABD در مناطق خشک و نیمه‌خشک به ترتیب در فصل زمستان و تابستان و در مناطق ساحلی به ترتیب در فصل تابستان و بهار رخ داده است. نتیجه به دست آمده در مناطق خشک و نیمه‌خشک منطبق با نتیجه نشان داده شده توسط RMABD در شکل ۴ است و بیانگر توانایی کمتر محصولات ماهواره‌ای مورد مطالعه در شرایط ابرناکی (زمستان) نسبت به شرایط آسمان صاف (تابستان) در برآورد تابش SSR است. از طرفی، همان‌طور که در این پژوهش و تحقیقات توماس و همکاران (۲۰۱۶) و اوراکا و همکاران (۲۰۱۷) نشان داده شد، رطوبت هوا و بخار آب موجود در هوا یکی از عوامل افزایش خطا در محصولات ماهواره‌ای است. از آنجا که مناطق ساحلی مورد بررسی در این مطالعه (ایستگاه‌های بندرعباس و گرگان) دارای تابستان‌های گرم و مرطوب‌اند، بیشینه خطای RMABD در این مناطق در فصل تابستان و کمینه خطای RMABD در فصل بهار با رطوبت و ابرناکی کمتر نسبت به دیگر فصول سال واقع شده است.



شکل ۶. تغییرات فصلی خطای RMABD (مقایسه محصولات ماهواره‌ای و تابش روزانه SSR اندازه‌گیری شده در مناطق خشک، نیمه خشک، و ساحلی ایران)

بحث و نتیجه‌گیری

بررسی کارایی محصولات ماهواره‌ای CERES، CLARA، و SARAH در برآورد تابش روزانه SSR در ایران نشان داد که با وجود عملکرد مناسب هر سه محصول ماهواره‌ای در این مورد مطالعه، محصول SARAH با قدرت تفکیک مکانی بالاتر، با ضریب تعیین برابر با ۰٫۹۳ و کمترین خطای اریبی برابر با $-۰٫۱ \text{ W.m}^{-2}$ بیشترین توافق را نسبت به دو محصول دیگر با تابش SSR اندازه‌گیری شده دارد.

همچنین، واقع شدن بیشینه خطا در فصول سرد سال نشان از تأثیر پُررنگ ابرناکی در ایجاد خطا بر خروجی محصولات ماهواره‌ای مورد مطالعه در ایران دارد. بررسی تغییرات مکانی تابش روزانه SSR اندازه‌گیری شده و محصولات ماهواره‌ای مورد مطالعه نیز نشان داد که محصولات ماهواره‌ای در مناطق خشک بهترین عملکرد و در مناطق ساحلی ضعیف‌ترین عملکرد را داشته‌اند. در این میان، پولو و همکاران (۲۰۱۶) نشان دادند که روش‌های ماهواره‌محور ممکن است در پردازش اطلاعات اجزای اتمسفر محلی مانند عمق نوری آتروسول و بخار آب پایینی داشته باشند یا نتوانند اثرهای محلی یا ویژگی‌های خاص یک مکان را مدل کنند. مناطق کوهستانی با پیچیدگی‌های زمین و تغییرات شدید آب و هوایی، تغییرات ارتفاع، مناطق ساحلی، مناطقی که پوشش ابر به سرعت تغییر می‌کند و مکان‌هایی با بازتابش بالا (مناطق با پوشش برف یا صحرایی با پوشش شن و ماسه)، خطاهای سیستماتیک در ماهواره‌ها، و روش‌های استخراج داده‌ها همه عواملی هستند که پولو و همکاران (۲۰۱۶) به عنوان عوامل کاهنده در دقت محصولات ماهواره‌ای برشمرده‌اند. مقایسه پژوهش حاضر و پژوهش‌های بررسی شده نشان می‌دهد ابرناکی در فصول سرد سال در درجه اول و ویژگی‌های مناطق ساحلی و حضور بخار آب در این مناطق در درجه دوم از عمده عوامل ایجاد خطا در ارزیابی محصولات ماهواره‌ای در این پژوهش‌اند. از آنجا که عوامل بسیار زیادی در تابش رسیده به سطح زمین اثرگذارند، هر یک از این عوامل می‌توانند باعث ایجاد خطا در محصولات ماهواره‌ای شوند. بنابراین، برای بررسی دقیق‌تر به اطلاعات اتمسفری بیشتری نظیر ابرناکی، شاخص ابر، خصوصیات آتروسول‌ها، و بخار آب و خصوصیات و ویژگی‌های مکانی نیاز است.

از طرف دیگر، با توجه به اینکه بیشتر مناطق ایران در ناحیه خشک و نیمه خشک واقع شده و فصل رشد گیاهان این مناطق منطبق با فصل گرم است، از داده‌های تابش SSR این محصولات ماهواره‌ای می‌توان در مطالعات کشاورزی،

تخمین متغیرهایی مانند تبخیر و تعرق و در بسیاری از مدل‌های رشد محصول^۱ استفاده کرد. همچنین، با توجه به دسترسی آزاد و قدرت تفکیک مکانی و زمانی بالای محصولات ماهواره‌ای مورد بررسی، خروجی تابش SSR این محصولات می‌تواند جای‌گزین مناسبی باشد برای ایستگاه‌هایی که داده‌های گم‌شده بسیاری دارند یا مناطقی که به هر دلیلی فاقد اندازه‌گیری زمینی‌اند. به‌علاوه، از آنجا که محصولات ماهواره‌ای در برخی شرایط محلی (مناطق ساحلی و شرایط ابرناکی) توانایی کمتری در برآورد تابش SSR نسبت به مناطق دیگر دارند، ضروری است با استفاده از دیگر خصوصیات اتمسفری شرایط خاص محلی هر منطقه و با استفاده از الگوریتم‌ها و روش‌های آماری تأثیر این اثرهای کاهنده بر تخمین تابش SSR را کاهش داد و به دقت بالاتری از برآورد تابش سطح دست یافت.

سپاس‌گزاری

نویسندگان این پژوهش از آقای دکتر حسن لیامانی^۲ و خانم دکتر گوادالوپه سنچز هرناندز^۳ در دانشگاه گرانا برای کمک‌های بی‌دریغشان، از مراکز داده‌های CERES و CM SAF برای در اختیار گذاشتن داده‌های تابش SSR، و از سازمان هواشناسی کشور به‌دلیل در اختیار قراردادن داده‌های اندازه‌گیری‌شده تابش سطح زمین تشکر و قدردانی می‌نمایند.



-
1. Crop Growth Model
 2. Hassan Lyamani
 3. Guadalupe Sanchez Hernandez

منابع

- تازیک، ا.; رضایی، ع.; آبکار، ع.; علوی‌پناه، س. ک.; جهان‌تاب، ز. و رحمتی، ع. (۱۳۹۴). برآورد تابش کل لحظه‌ای طول موج کوتاه خورشید با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای سنجنده مودیس (مطالعه موردی: مناطق مرکزی ایران)، مجله سنجش از دور و سامانه اطلاعات جغرافیایی در منابع طبیعی، ۶(۲): ۱۷-۳۰.
- رحیمی خوب، ع.; صابری، پ.; بهبهانی، س.م.ر. و نظری‌فر، م.ه. (۱۳۹۰). برآورد تابش خورشید رسیده به زمین با استفاده از تصاویر ماهواره نوا و روابط آماری در جنوب شرق تهران، مجله علوم آب و خاک، ۱۵(۵۶): ۷۹-۸۹.
- مجرد، ف.; فتح‌نیا، ا.ا. و رجایی، س. (۱۳۹۴). برآورد تابش خورشیدی دریافتی سطح زمین در استان کرمانشاه، مطالعات جغرافیایی مناطق خشک، ۵(۱۹): ۵۵-۶۹.
- صداقت مصعبی، ب.; آقاشریعتمداری، ز.; حجابی، س. و قربانی، خ. (۱۳۹۸). ارزیابی کارایی مدل‌های برآورد تابش خورشید در سطح زمین با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای، تحقیقات آب و خاک ایران، ۵۰(۸): ۱۹۶۳-۱۹۷۳.
- Alexandri, G.; Georgoulas, A.K.; Meleti, C.; Balis, D.; Kourtidis, K.A.; Sanchez-Lorenzo, A.; Trentmann, J. and Zanis, P. (2017). A high resolution satellite view of surface solar radiation over the climatically sensitive region of Eastern Mediterranean, *Journal of Atmospheric Research*, 188: 107-121.
- Almorox, J.; Ovando, G.; Sayago, S. and Bocco, M. (2017). Assessment of surface solar irradiance retrieved by CERES, *International Journal of Remote Sensing*, 38(12): 3669-3683.
- Carmona, F.; Orte, P.F.; Rivas, R.; Wolfram, E. and Kruse, E. (2018). Development and analysis of a new solar radiation atlas for Argentina from ground-based measurements and CERES_SYN1deg data, *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 21(3): 211-217.
- Chen, M.; Zhuang, Q. and He, Y. (2014). An efficient method of estimating downward solar radiation based on the MODIS observations for the use of land surface modeling, *Journal of Remote Sensing*, 6(8): 7136-7157.
- Espinar, B.; Ramírez, L.; Drews, A.; Beyer, H.G.; Zarzalejo, L.F; Polo, J. and Martín, L. (2009). Analysis of different comparison parameters applied to solar radiation data from satellite and German radiometric stations, *Journal of Solar Energy*, 83(1): 118-125.
- Estévez, J.; Gavilán, P. and Giráldez, J.V. (2011). Guidelines on validation procedures for meteorological data from automatic weather stations, *Journal of hydrology*, 402(1-2): 144-154.
- Jahani, B. and Mohammadi, B. (2019). A comparison between the application of empirical and ANN methods for estimation of daily global solar radiation in Iran, *Journal of Theoretical and Applied Climatology*, 137(1-2): 1257-1269.
- Journée, M. and Bertrand, C. (2010). Improving the spatio-temporal distribution of surface solar radiation data by merging ground and satellite measurements, *Journal of Remote Sensing of Environment*, 114(11): 2692-2704.
- Karlsson, K.G.; Anttila, K.; Trentmann, J.; Stengel, M.; Meirink, J.F.; Devasthale, A.; Hanschmann, T.; Kothe, S.; Jaaskelainen, E.; Sedlar, J. and Benas, N. (2017). CLARA-A2: the second edition of the CM SAF cloud and radiation data record from 34 years of global AVHRR data, *Journal of Atmospheric Chemistry and Physics*, 17(9): 5809-5828.
- Kothe, S.; Pfeifroth, U.; Cremer, R.; Trentmann, J. and Hollmann, R. (2017). A satellite-based sunshine duration climate data record for Europe and Africa, *Journal of Remote Sensing*, 9(5): 429-443.

- Laiti, L.; Andreis, D.; Zottele, F.; Giovannini, L.; Panziera, L.; Toller, G. and Zardi, D. (2014). A solar atlas for the Trentino region in the Alps: quality control of surface radiation data, *Journal of Energy Procedia*, 59: 336-343.
- Lotfinejad, M.; Hafezi, R.; Khanali, M.; Hosseini, S.; Mehrpooya, M. and Shamshirband, S. (2018). A comparative assessment of predicting daily solar radiation using bat neural network (BNN), generalized regression neural network (GRNN), and neuro-fuzzy (NF) system: A case study. *Journal of Energies*, 11(5): 1188.
- Mojarrad, F.; Fathnia, A. and Rajaei, S. (2015). The Estimation of incoming solar radiation in Kermanshah province, *Journal of Arid Regions Geographic Studies*, 5(19): 55-69.
- Mokhtari, A.; Noory, H. and Vazifedoust, M. (2018). Performance of Different Surface Incoming Solar Radiation Models and Their Impacts on Reference Evapotranspiration, *Journal of Water resources management*, 32(9): 3053-3070.
- Moradi, I. (2009). Quality control of global solar radiation using sunshine duration hours, *Journal of Energy*, 34(1): 1-6.
- Mousavi, S.M.; Mostafavi, E.S.; Jaafari, A.; Jaafari, A. and Hosseinpour, F. (2015). Using measured daily meteorological parameters to predict daily solar radiation, *Journal of Measurement*, 76: 148-155.
- Mueller, R.W.; Matsoukas, C.; Gratzki, A.; Behr, H.D. and Hollmann, R. (2009). The CM-SAF operational scheme for the satellite-based retrieval of solar surface irradiance—A LUT based eigenvector hybrid approach, *Journal of Remote Sensing of Environment*, 113(5): 1012-1024.
- Pfeifroth, U.; Sanchez-Lorenzo, A.; Manara, V.; Trentmann, J. and Hollmann, R. (2018). Trends and variability of surface solar radiation in Europe based on surface-and satellite-based data records, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 123(3): 1735-1754.
- Polo, J.; Wilbert, S.; Ruiz-Arias, J.A.; Meyer, R.; Gueymard, C.; Suri, M.; Martin, L.; Mieslinger, T.; Blanc, P.; Grant, I. and Boland, J. (2016). Preliminary survey on site-adaptation techniques for satellite-derived and reanalysis solar radiation datasets, *Journal of Solar Energy*, 132: 25-37.
- Posselt, R.; Mueller, R.W.; Stöckli, R. and Trentmann, J. (2012). Remote sensing of solar surface radiation for climate monitoring—The CM-SAF retrieval in international comparison, *Journal of Remote Sensing of Environment*, 118: 186-198.
- Rahimikhoob, A.; Saberi, P.; Behbahani, S. M.; Nazarifar, M. H. (2011). Estimation of Global Solar Radiation Using NOAA Satellite Images and Statistical Equations in Southeast of Tehran, *Journal of Water and Soil Science*, 15(56): 79-89.
- Riihelä, A.; Carlund, T.; Trentmann, J.; Müller, R. and Lindfors, A. (2015). Validation of CM SAF surface solar radiation datasets over Finland and Sweden, *Journal of Remote Sensing*, 7(6): 6663-6682.
- Sabziparvar, A. A. (2008). A simple formula for estimating global solar radiation in central arid deserts of Iran, *Journal of Renewable Energy*, 33(5): 1002-1010.
- Sanchez-Lorenzo, A.; Wild, M. and Trentmann, J. (2013). Validation and stability assessment of the monthly mean CM SAF surface solar radiation dataset over Europe against a homogenized surface dataset (1983–2005), *Journal of Remote Sensing of Environment*, 134: 355-366.
- Sedaqat Masabi, B.; Aghashariatmadari, Z.; Hejabi, S. and Ghorbani, K. (2019). Evaluation of the Efficiency of Solar Radiation Estimation Models Using Satellite Imagery, *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 50(8): 1963-1973.
- Smith, G.L.; Priestley, K.J.; Loeb, N.G.; Wielicki, B.A.; Charlock, T.P.; Minnis, P.; Doelling, D.R. and Rutan, D.A. (2011). Clouds and Earth Radiant Energy System (CERES), a review: Past, present and future, *Journal of Advances in Space Research*, 48(2): 254-263.

- Tazik, E.; Rezaei, A.; Abkar, A.; Alavipanah, S.; Jahantab, Z.; Rahmati, A. (2015). Estimation of the instantaneous short wavelength solar radiation using satellite images of MODIS (Case study: Central regions of Iran), *Journal of RS and GIS for Natural Resources*, 6(1): 17-30.
- Thomas, C.; Wey, E.; Blanc, P. and Wald, L. (2016). Validation of three satellite-derived databases of surface solar radiation using measurements performed at 42 stations in Brazil, *Journal of Advances in Science and Research*, 13: 81-86.
- Urraca, R.; Gracia-Amillo, A.M.; Koubli, E.; Huld, T.; Trentmann, J.; Riihelä, A.; Lindfors, A.V.; Palmer, D.; Gottschalg, R. and Antonanzas-Torres, F. (2017). Extensive validation of CM SAF surface radiation products over Europe, *Journal of Remote Sensing of Environment*, 199: 171-186.
- Urraca, R.; Huld, T.; Gracia-Amillo, A.; Martinez-de-Pison, F.J.; Kaspar, F. and Sanz-Garcia, A. (2018). Evaluation of global horizontal irradiance estimates from ERA5 and COSMO-REA6 reanalyses using ground and satellite-based data, *Journal of Solar Energy*, 164: 339-354.
- Wang, L.; Kisi, O.; Zounemat-Kermani, M.; Salazar, G.A.; Zhu, Z. and Gong, W. (2016). Solar radiation prediction using different techniques: model evaluation and comparison, *Journal of Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 61, PP. 384-397.
- Wang, Y.; Trentmann, J.; Yuan, W. and Wild, M. (2018). Validation of CM SAF CLARA-A2 and SARAHE Surface Solar Radiation Datasets over China, *Journal of Remote Sensing*, 10(12): 1-18.
- Yan, H.; Huang, J.; Minnis, P.; Wang, T. and Bi, J. (2011). Comparison of CERES surface radiation fluxes with surface observations over Loess Plateau, *Journal of Remote sensing of environment*, 115(6): 1489-1500.
- Yang, L.; Zhang, X.; Liang, S.; Yao, Y.; Jia, K. and Jia, A. (2018). Estimating surface downward shortwave radiation over china based on the gradient boosting decision tree method, *Journal of Remote Sensing*, 10(2): 185-207.
- Younes, S.; Claywell, R. and Muneer, T. (2005). Quality control of solar radiation data: Present status and proposed new approaches, *Journal of Energy*, 30(9): 1533-1549.
- Žák, M.; Mikšovský, J. and Pišoft, P. (2015). CMSAF radiation data: New possibilities for climatological applications in the Czech Republic, *Journal of Remote Sensing*, 7(11): 14445-14457.
- Zhang, T.; Stackhouse Jr, P.W.; Cox, S.J.; Mikovitz, J.C. and Long, C.N. (2019). Clear-sky shortwave downward flux at the Earth's surface: Ground-based data vs. satellite-based data, *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 224, PP. 247-260.