

جستجوی نواحی مستعد نصب سلول‌های خورشیدی در استان گلستان با استفاده از داده‌های دیده‌بانی، GEOS-5 و ERA5

سکینه خان‌سالاری^{۱*}، محمد کردجزی^۲، عثمان مجیدی^۳، عبدالجبار ملاعرازی^۳ و عباس رنجبر سعادت آبادی^۴

^۱ استادیار، پژوهشگاه هواشناسی و علوم جو، تهران، ایران

^۲ دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، معاونت توسعه و پیش‌بینی استان گلستان، گرگان، ایران

^۳ دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، اداره هواشناسی استان گلستان، گرگان، ایران

^۴ دانشیار، پژوهشگاه هواشناسی و علوم جو، تهران، ایران

(دریافت: ۱۴۰۱/۰۲/۲۵، پذیرش: ۱۴۰۱/۰۷/۰۹)

چکیده

در این پژوهش با به‌کارگیری داده‌های ساعت آفتابی و شدت تابش ثبت‌شده در ایستگاه‌های هواشناسی استان گلستان، ERA5 و GEOS-5، نقشه‌های اطلس انرژی خورشیدی سالانه و ماهانه تهیه و در نتیجه، امکان جستجوی مختصات مکانی مناسب برای تأسیس نیروگاه خورشیدی در نقاط مختلف استان گلستان فراهم شده است. در چند سال اخیر، استفاده از داده‌های بازتحلیل مدل‌های پیش‌بینی عددی در کنار استفاده از سایر داده‌ها برای مناطقی که با ماهواره پوشش داده نمی‌شوند و همچنین برای پر کردن خلاء داده‌ها رواج یافته است. خلاءهای آماری داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی (۲۰۱۴ تا ۲۰۲۰) با استفاده از روش نسبت‌ها تکمیل شده است. برای آزمون همگنی داده‌ها از روش RUN-TEST استفاده شده و تصادفی بودن آنها در سطح ۹۵ درصد پذیرفتنی است. جهت بررسی دقت داده‌های ماهواره و مدل، از سنج‌های آماری خطای مطلق، خطای اربیبی، مجذور میانگین مربعات خطا، ضریب تعیین و آزمون T استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد هر دو مجموعه داده برای برآورد تابش خورشیدی در استان مناسب هستند و معنی‌دار بودن ضرایب همبستگی در هر دو روش در سطح اعتماد ۹۵ درصد تأیید می‌شود؛ بنابراین نقشه پهنه‌بندی تابش کل خورشیدی در استان گلستان به‌صورت سالانه و ماهانه با استفاده از سه منبع داده تهیه شد. در پهنه‌بندی تابش سالانه، دامنه نوسان تابش سالانه برابر ۱۰۸۹ تا ۱۸۰۰ کیلووات بر مترمربع در سال به‌ترتیب در نواحی کوهستانی جنگلی و ارتفاعات جنوب غرب استان است. آب‌وهوای منطقه بیشینه تابش سالانه واقع در ارتفاعات جنوب غرب استان، نیمه‌خشک و سرد کوهستانی است. همچنین مناطق شمال شرق و برخی مناطق جنوب به علت آب‌وهوای نیمه‌خشک و برخورداری از ساعات آفتابی زیاد در طول سال، تابش سالانه مناسبی دارند؛ بنابراین به‌نظر می‌رسد مناطق جنوب غرب و شمال شرق استان گلستان امکان احداث نیروگاه خورشیدی را داشته باشند.

واژه‌های کلیدی: پهنه‌بندی تابش، نیروگاه خورشیدی، داده GEOS-5، داده ERA5، استان گلستان

۱ مقدمه

تابش خورشیدی یکی از ایمن‌ترین، مؤثرترین و اقتصادی‌ترین منابع انرژی است که پتانسیل تبدیل شدن به منبع اصلی انرژی را در آینده نه‌چندان دور دارد. اکنون که بسیاری از کشورهای دارای منابع انرژی خورشیدی (بسیار کمتر از ایران) از جمله آلمان، فرانسه، آمریکا، اسپانیا، ژاپن و حتی بسیاری از کشورهای اسکاندیناوی استفاده از انرژی خورشیدی و فناوری‌های خورشیدی را به مرز اقتصادی رسانده‌اند و استفاده از نیروگاه‌های خورشیدی را روزه‌روز گسترش می‌دهند، بی‌شک در ایران نیز با شناسایی مناطق مناسب برای احداث چنین نیروگاه‌هایی می‌توان گام مهمی در جهت استفاده از فناوری‌های خورشیدی و در نتیجه، تأمین انرژی ارزان و باثبات و همچنین کاهش مشکل روزافزون آلودگی هوا برداشت. در ایران نیز کم‌وبیش در برخی استان‌های کشور استفاده از انرژی خورشیدی برای تولید برق مورد توجه قرار گرفته، اما هنوز تا رسیدن به نقطه مطلوب فاصله است. در این مسیر برای تعیین مناطق مناسب جهت احداث نیروگاه‌های خورشیدی مطالعات بسیاری بر اساس اطلاعات ایستگاه‌های تابش‌سنجی، مدل‌های آماری و تصاویر ماهواره صورت گرفته است که برای نمونه می‌توان به پژوهش حیدری (۱۳۸۶)، خوش‌اخلاق (۱۳۸۶)، یزدان‌پناه و همکاران (۱۳۸۹)، معینی و همکاران (۱۳۸۹)، درخشی (۱۳۸۹)، اسفندیاری (۱۳۹۰)، لطفی (۱۳۹۰)، موقری و طاوسی (۱۳۹۲)، موقری و خسروی (۱۳۹۳)، فتح‌نیا و رجایی (۱۳۹۴) و مجرد و همکاران (۱۳۹۴) اشاره کرد. در پژوهش فرجی‌مهباری و همکاران (۱۳۹۴)، مدل‌های تجربی مربوط به برآورد تابش خورشیدی روزانه بر پایه دمای هوا یعنی مدل‌های بریستو-کمپل، هارگریوز، سامانی و لی و چن در چهار منطقه آب‌وهوایی ایران ارزیابی شده‌اند. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد مدل‌های یادشده در مناطق خشک نسبت به مناطق مرطوب دقت

بیشتری دارند؛ بنابراین برای تخمین تابش خورشیدی روزانه در مناطق خشک ایران، که تنها داده‌های دمای هوا در دسترس است، استفاده از آنها در این مطالعه توصیه شده است. همچنین سبزی‌پرور و همکاران (۱۳۹۴) با استفاده از روش تحلیل تابش در محیط GIS، نقشه پهنه-بندی تابش کل خورشیدی را در سطح چهار استان مرکزی ایران تهیه کردند. نتایج پهنه‌بندی در این پژوهش نشان می‌دهد تابش دریافتی در هر منطقه وابستگی کمتری با ارتفاع دارد و بیشتر تحت تأثیر مقدار و جهت شیب و موانع موجود بر سر راه تابش است. غلام‌نیا و همکاران (۱۳۹۵) انرژی خورشیدی دریافتی در سطح زمین در مناطق خشک و نیمه‌خشک مرکزی ایران را شبیه‌سازی و پهنه‌بندی کردند. ایشان با استفاده از یک مدل ریاضی معتبر (مدل تجربی پیشنهادی) برای مناطق خشک و نیمه-خشک ایران، میزان تابش ایستگاه‌های هواشناسی را که در آنها میزان تابش خورشیدی ثبت نمی‌شد، با به‌کارگیری دماهای پنج‌گانه در مقیاس زمانی روزانه برآورد کردند. نتایج آن پژوهش نشان می‌دهد به‌طور کلی در منطقه مورد مطالعه، به تبعیت از تأثیر عرض جغرافیایی در تغییرات مکانی، میانگین انرژی تابشی دریافتی در سطح زمین در همه فصول از شمال به جنوب افزایش یافته و در فصول گرم، این مقادیر بیشتر از فصول سرد است. حجازی‌زاده و همکاران (۱۳۹۷) تابش دریافتی سطح زمین را با استفاده از مدل برد و هال استروم (Bird and Hulstrom) در استان اصفهان برآورد کردند. ایشان دریافتند که مدل برد و هال استروم، توانایی خوبی در برآورد میزان تابش در این استان دارد. همچنین در اواخر فصل بهار و اوایل فصل تابستان، مناطق پست و کویری مقدار انرژی تابشی بیشتری نسبت به مناطق مرتفع دارند و میزان تابش رسیده به سطح زمین در فصل تابستان، بیشتر متأثر از ساعت آفتابی و زاویه تابش خورشید است. همچنین مؤمن‌زاده و همکاران (۱۳۹۹)

هستند؛ زیرا داده‌های بلندمدت با پوشش جهانی ارائه می‌کنند و شامل پارامترهای جوئی متعدد هستند. برای بهبود پیش‌بینی ابرها به مطالعه بیشتری در مدل‌های NWP و شبیه‌سازی داده‌ها نیاز است؛ بنابراین هر دو منبع داده ERA5 و COSMO-REA6 می‌توانند با در نظر گرفتن محدودیت‌هایشان استفاده شوند. ERA5 می‌تواند جایگزین معتبری برای پر کردن شکاف‌های سری‌های زمانی باشد. علاوه بر این، در مناطقی که با ماهواره‌های زمین‌ایستا پوشش داده نمی‌شوند، مانند مناطق قطبی، ERA5 می‌تواند جایگزین خوبی باشد. COSMO-REA6 منطقه‌ای هم می‌تواند مکمل ERA5 در شمال و مرکز اروپا باشد و کمبود آن را در مناطق ساحلی و کوهستانی کاهش دهد. سیانوری و همکاران (۲۰۲۰) در مطالعه‌ای کیفیت داده‌های بازتحلیل ERA5 و MERRA2 را در تخمین تابش خورشیدی در منطقه اندونزی بررسی کردند. نتایج آن مطالعه نشان می‌دهد داده‌های ERA5 و MERRA2 به ترتیب فراتخمین و فروتخمین دارند؛ با این حال کیفیت داده‌های ERA5 بهتر است. ونگ و همکاران (۲۰۲۱) برای ارائه داده‌های دقیق‌تر جهت حمایت از توسعه انرژی خورشیدی در گوبی که منطقه‌ای بیابانی و نیمه‌بیابانی بزرگ در آسیای مرکزی است و به دلیل موقعیت جغرافیایی و ویژگی‌های آب‌وهوایی انرژی خورشیدی فراوانی دارد، از پنج منبع داده بازتحلیل استفاده کردند. نتایج این بررسی نشان می‌دهد مجموعه داده ERA5 بیشترین همبستگی را با داده‌های اندازه‌گیری زمینی دارد.

به نظر می‌رسد برخی نواحی استان گلستان به ویژه نواحی شمال شرق استان ظرفیت خوبی برای تولید برق از تابش خورشیدی دارد، ولی هنوز اقدام درخور توجهی جهت بهره‌برداری از انرژی خورشیدی در این استان انجام نشده است. از طرفی، با توجه به گرمایش جهانی طی سال‌های اخیر، شاهد افزایش دمای بی‌سابقه هستیم به گونه‌ای که در

تابش خورشیدی را در استان یزد پهنه‌بندی کردند و دریافتند که ساعت آفتابی سالانه، مهم‌ترین فراسنج اقلیمی است که میزان انرژی دریافتی از خورشید را نشان می‌دهد. ایشان بهترین مکان‌ها برای بهره‌برداری از انرژی خورشیدی را شهرستان‌های رباط‌پشت‌بادام، مهریز، میبد و مروس معرفی کردند. در خارج از کشور نیز مطالعات وسیعی تنها بر اساس اطلاعات ایستگاه تابش‌سنجی یا تصاویر ماهواره صورت گرفته و با استفاده از GIS نقشه پتانسیل انرژی خورشیدی تهیه شده است که برای نمونه می‌توان به مطالعه رامچندرا (۲۰۰۷) اشاره کرد. در سال‌های اخیر، استفاده از داده‌های بازتحلیل مدل‌های پیش‌بینی عددی، که در ایران انجام نشده است، در کنار استفاده از داده‌های ایستگاه‌های تابش‌سنجی و تصاویر ماهواره برای مناطقی که پوشش ماهواره‌ای ندارند و همچنین برای پر کردن شکاف‌های سری‌های زمانی مرسوم شده است؛ برای مثال اراکا و همکاران (۲۰۱۸) نتایج برآورد تابش سطحی دو منبع داده بازتحلیل ERA5 و COSMO-REA6 را بررسی و مقایسه کردند. در آن مطالعه، دو منبع داده یادشده با مقایسه با داده‌های مشاهداتی در ۴۱ ایستگاه تابش سطحی در سراسر جهان و ۲۹۴ ایستگاه در اروپا و دو محصول خروجی ماهواره‌ای SARAH برای اروپا و آسیا و NSRDB برای آمریکا ارزیابی شده‌اند. مقایسه داده‌های بازتحلیل با محصولات مبتنی بر ماهواره، پیش‌بینی ضعیف ابرها را در بیشتر مناطق نشان می‌دهد که به خطاهای مطلق بزرگ‌تر در ERA5 و COSMO-REA6 نسبت به خطاهای به‌دست‌آمده با محصولات مبتنی بر ماهواره منجر می‌شود. از نتایج دیگر پژوهش اراکا و همکاران (۲۰۱۸) می‌توان به کافی نبودن شبکه مورد استفاده ERA5 در مناطق ساحلی و کوه‌ها و عملکرد به‌وضوح بهتر COSMO-REA6 نسبت به ERA5 در این مناطق اشاره کرد. به‌طور خلاصه، محصولات بازتحلیل رویکردی جذاب برای تخمین تابش سطحی

برخی از روزها، دمای هوا در برخی از مناطق استان به ۵۰ درجه سلسیوس نزدیک می‌شود. شهرستان‌های مرزی شمال و شمال شرق استان گلستان، تابش خورشیدی سالانه زیادی دارند و دمای هوا در این مناطق از اردیبهشت تا پایان مهرماه در بیشتر روزها به بیش از ۳۰ و گاهی به حدود ۵۰ درجه سلسیوس نیز می‌رسد. تداوم این گرما در کنار افزایش مصرف برق، به قطعی‌های مکرر برق و درخواست مسئولان برای صرفه‌جویی مشترکان و تغییر در ساعت کاری ادارات منجر شده است. در حال حاضر، برق استان گلستان از دو نیروگاه نکا و علی‌آباد کنترل تأمین می‌شود که با توجه به افزایش جمعیت و در نتیجه، افزایش مصرف، توسعه آنها یا ساخت نیروگاه‌های جدید در استان ضرورت دارد.

در این پژوهش با به‌کارگیری داده‌های دیده‌بانی در این پژوهش با به‌کارگیری داده‌های دیده‌بانی (The Goddard Earth Observing System GEOS-5 model version 5) ERA5 و (ECMWF، ۲۰۱۷)، پتانسیل‌سنجی استفاده از انرژی نو و تجدیدپذیر خورشیدی در استان گلستان انجام، نقشه‌های اطلس انرژی خورشیدی تهیه و امکان جستجوی مختصات مکانی مناسب برای نیروگاه خورشیدی در نقاط مختلف استان گلستان فراهم شده است. در بخش دوم، روش کار ارائه می‌شود که شامل معرفی منطقه مورد بررسی و تقسیم‌بندی اقلیمی آن، تحلیل ساعت آفتابی و تابش بر اساس داده‌های دیده‌بانی و برآورد تابش بر اساس داده‌های GEOS-5 و ERA5 در استان گلستان است. در بخش سوم، کیفیت داده‌های تابش استخراج‌شده از GEOS-5 و ERA5 با مقایسه نمودارها و استفاده از شاخص‌های آماری، تحلیل و بررسی و پس از حصول اطمینان از کیفیت داده‌های مورد استفاده، با به‌کارگیری سه منبع اطلاعاتی، بررسی کیفی انجام و تابش خورشیدی استان گلستان به‌صورت سالانه و ماهانه پهنه‌بندی می‌شود. بخش چهارم مطالعه حاضر به نتیجه‌گیری و جمع‌بندی مطالب اختصاص دارد.

۲ داده‌ها و روش کار

در مطالعه تابش خورشیدی نمی‌توان تمام عناصر مؤثر را در معادلات وارد کرد؛ در نتیجه، برای تخمین میزان تابش خورشیدی تنها از تعداد محدودی از پارامترهای اقلیمی استفاده می‌شود. مهم‌ترین پارامتری که در بیشتر معادلات تجربی برآورد تابش خورشیدی استفاده می‌شود، ساعات آفتابی است. بسیاری از پژوهشگران در مدل‌های تجربی خود علاوه بر ساعات آفتابی، از متغیرهایی همچون رطوبت نسبی، دما و مختصات عرض جغرافیایی و ارتفاع بهره‌برده‌اند، اما تحقیقات نشان داده است ساعات آفتابی مهم‌ترین عامل تعیین‌کننده میزان تابش خورشیدی است (مجرد و همکاران، ۱۳۹۴). داده‌های مورد استفاده در این پژوهش شامل شدت تابش و ساعت آفتابی ایستگاه‌های هواشناسی در استان گلستان است. خلاءهای آماری با استفاده از روش نسبت‌ها (حسن‌پور کاشانی و دین‌پژوه، ۲۰۱۲) تکمیل و برای آزمون همگنی داده‌ها نیز از روش RUN-TEST استفاده شده است که تصادفی بودن آنها در سطح ۹۵ درصد پذیرفتنی است. این داده‌ها به‌تنهایی کافی نیستند و علاوه بر داده‌های اندازه‌گیری زمینی، از داده‌های GEOS-5 و داده‌های بازتحلیل ERA5 نیز با تفکیک افقی ۳۰ کیلومتر برای سال‌های ۲۰۱۴ تا ۲۰۲۰ استفاده شده است.

۲-۱ منطقه مورد مطالعه و تقسیم‌بندی اقلیم منطقه به روش دمارتن

به‌طور کلی آب‌وهوای استان گلستان تحت تاثیر دو عامل محلی و بیرونی است. از عوامل محلی می‌توان به عرض جغرافیایی، وضعیت کوهساری، منابع آب سطحی، پوشش گیاهی و غیره اشاره کرد و از عوامل بیرونی، پرفشار سبیری، پرفشارهای مهاجر، کم‌فشار مدیترانه‌ای، کم‌فشار سودانی، کم‌فشار شمال اروپا، کم‌فشار حرارتی دشت

یکدیگر تفکیک کند. در این تقسیم‌بندی مطابق شکل ۱ نوار شمالی استان، اقلیم خشک و نواحی پایین‌تر، اقلیم نیمه‌خشک دارند. آب‌وهوای مدیترانه‌ای، نیمه‌مرطوب، مرطوب و بسیار مرطوب از دیگر بخش‌های این طبقه‌بندی است.

جدول ۲. نوع اقلیم ایستگاه‌های مورد مطالعه استان گلستان به روش دمارتن.

نام ایستگاه	T	P	I	نوع اقلیم
گرگان	۱۸/۲	۵۴۳/۴	۱۹/۳	نیمه‌خشک
گنبدکاووس	۱۸/۸	۴۵۵/۹	۱۵/۸	نیمه‌خشک
کلاله	۱۸/۲	۵۸۲/۶	۲۰/۷	مدیترانه‌ای
مراوه‌تپه	۱۸/۳	۳۶۴/۷	۱۲/۹	نیمه‌خشک
بندر ترکمن	۱۸/۱	۴۲۳/۲	۱۵/۱	نیمه‌خشک
علی‌آباد	۱۷/۵	۶۶۵/۵	۲۴/۲	نیمه‌مرطوب
اینچه‌برون	۱۸/۲	۲۸۲/۲	۱۰	نیمه‌خشک
کردکوی	۱۷/۳	۷۰۵/۸	۲۵/۹	نیمه‌مرطوب
نرآب	۱۰/۴	۳۳۰/۶	۱۶/۲	نیمه‌خشک
گلیداغ	۱۳/۵	۹۰۵/۲	۳۸/۵	بسیار مرطوب
درازنو	۶/۵	۴۷۲/۸	۲۸/۷	مرطوب
آق‌قلا	۱۸/۵	۴۲۴/۱	۱۴/۹	نیمه‌خشک
دده‌الوم چات	۱۸/۳	۱۶۲/۶	۵/۷	خشک
فاضل‌آباد	۱۷/۹	۶۵۸/۶	۲۳/۶	مدیترانه‌ای
رامیان	۱۶/۷	۸۶۱/۱	۳۲/۳	مرطوب
غفارحاجی	۱۷/۳	۴۶۲	۱۶/۹	نیمه‌خشک
زیارت	۱۳/۸	۵۲۰/۷	۲۱/۹	مدیترانه‌ای
چپر قویمه	۱۶/۱	۳۷۳/۳	۱۴/۳	نیمه‌خشک
تمر	۱۸/۲	۴۹۰/۵	۱۷/۴	نیمه‌خشک

۲-۲ تحلیل ساعت آفتابی بر اساس داده‌های دیده‌بانی

میانگین ساعت آفتابی سالانه ایستگاه‌های همدیدی استان گلستان ۲۳۹۲/۷ ساعت است. بیشترین ساعت آفتابی سالانه مربوط به مراوه‌تپه به میزان ۲۷۳۱/۵ ساعت و کمترین آن

کویر، کم‌فشار حرارتی صحرای ترکمنستان و غیره را می‌توان نام برد. وجود سامانه‌های متعدد، موجب پیچیدگی پیش‌بینی وضع هوا در این استان می‌شود. هرکدام از سامانه‌های مذکور موجب بروز آب‌وهوای خاص خود در این استان می‌شوند.

طبقه‌بندی اقلیمی دمارتن (۱۹۲۶) بر مبنای متغیر دما و بارندگی پایه‌گذاری شده است. به عقیده این دانشمندان، در بین عوامل و عناصر طبقه‌بندی، دما و بارندگی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار هستند. وی رابطه تجربی زیر را ارائه کرد:

$$I = \frac{P}{T + 10} \quad (1)$$

که I ضریب خشکی دمارتن، P میانگین بارندگی سالانه (میلی‌متر) و T میانگین دمای سالانه (درجه سلسیوس) است. در فرمول دمارتن عامل تبخیر حذف شده است، اما تبخیر خود نیز با دمای هوا مرتبط است و افزایش دما باعث افزایش تبخیر می‌شود؛ بنابراین زیاد بودن I ممکن است به دلیل کم بودن دما یا زیاد بودن بارندگی باشد. اگر میانگین دمای هوا کمتر از صفر باشد، معمولاً از فرمول دمارتن استفاده نمی‌شود. بر اساس فرمول دمارتن، آب‌وهوا به شش نوع طبقه‌بندی شده است (جدول ۱).

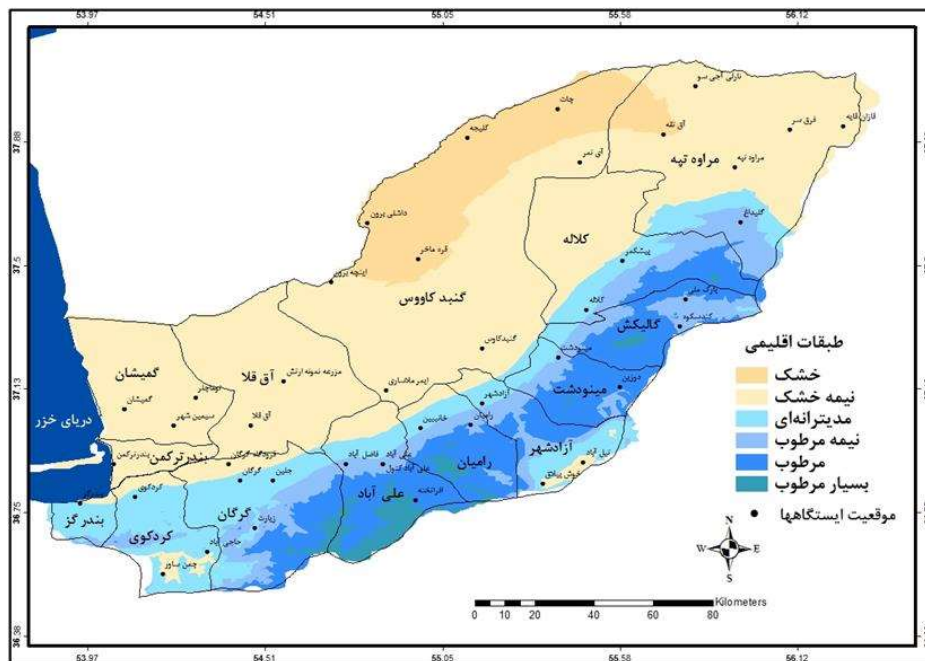
جدول ۱. طبقه‌بندی اقلیمی دمارتن (۱۹۲۶).

نوع اقلیم	محدوده ضریب خشکی دمارتن (I)
خشک	کوچک‌تر از ۱۰
نیمه‌خشک	۱۰ تا ۱۹/۹
مدیترانه‌ای	۲۰ تا ۲۳/۹
نیمه‌مرطوب	۲۴ تا ۲۷/۹
مرطوب	۲۸ تا ۳۴/۹
بسیار مرطوب	بزرگ‌تر از ۳۵

نتایج این روش برای بازه زمانی ۱۹۸۹ تا ۲۰۱۹ استان گلستان را به شش اقلیم متفاوت تقسیم‌بندی کرده است. روش به‌طور نسبی توانسته است مناطق استان را به‌خوبی از

بیشترین ساعت آفتابی ماهانه ایستگاه‌های استان گلستان مربوط به ماه اوت با میانگین ۲۷۶ ساعت و کمترین آن مربوط به ماه فوریه با میانگین ۱۳۳/۸ ساعت است.

مربوط به علی‌آباد کتول به مدت ۲۱۴۵/۱ ساعت است. در جدول ۳ میانگین ساعت آفتابی ماهانه و سالانه و در شکل ۲ میانگین ساعت آفتابی روزانه ایستگاه‌های استان گلستان نشان داده شده است.



شکل ۱. تقسیم‌بندی اقلیمی استان گلستان به روش دمارتن.



شکل ۲. نمودار میانگین ساعت آفتابی روزانه ایستگاه‌های استان گلستان (برحسب ساعت).

جدول ۳. میانگین ساعت آفتابی ماهانه و سالانه ایستگاه‌های استان گلستان (برحسب ساعت).

نام ایستگاه هواشناسی	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Ann
هاشم‌آباد گرگان	۱۴۶/۳	۱۳۰/۵	۱۴۱/۳	۱۶۸/۷	۲۲۲/۷	۲۴۵/۹	۲۳۶/۱	۲۵۱/۲	۲۱۳/۲	۲۰۰/۷	۱۵۸/۴	۱۴۱/۱	۲۲۵۶/۰
گنبدکاووس	۱۵۴/۲	۱۴۴/۰	۱۵۶/۷	۱۷۴/۵	۲۴۰/۰	۲۷۸/۷	۲۶۸/۶	۲۷۶/۲	۲۴۰/۳	۲۱۶/۶	۱۶۱/۶	۱۵۰/۰	۲۴۶۱/۴
کلاله	۱۶۱/۳	۱۴۴/۱	۱۵۸/۵	۱۶۸/۳	۲۳۷/۷	۲۸۶/۷	۲۷۶/۵	۲۹۵/۷	۲۵۶/۲	۲۲۲/۸	۱۷۱/۵	۱۵۳/۷	۲۵۳۲/۹
مراوه‌تپه	۱۵۸/۳	۱۵۵/۴	۱۷۲/۹	۲۰۰/۸	۲۶۹/۵	۳۰۸/۳	۳۰۹/۵	۳۱۶/۸	۲۷۴/۷	۲۳۷/۳	۱۷۲/۲	۱۵۵/۸	۲۷۳۱/۵
علی‌آباد کتول	۱۴۷/۸	۱۲۲/۵	۱۳۴/۹	۱۴۵/۶	۲۰۱/۰	۲۴۱/۵	۲۱۶/۱	۲۵۶/۲	۲۰۵/۸	۱۸۶/۶	۱۴۶/۷	۱۴۰/۵	۲۱۴۵/۱
بندرترکمن	۱۵۷/۹	۱۲۷/۰	۱۴۵/۴	۱۶۶/۲	۲۳۳/۹	۲۷۵/۲	۲۵۵/۷	۲۷۰/۵	۲۲۷/۴	۲۰۱/۵	۱۶۰/۸	۱۵۰/۴	۲۳۴۵/۳
بندر گز	۱۵۰/۱	۱۱۷/۹	۱۳۲/۳	۱۵۵/۶	۲۲۴/۱	۲۵۲/۷	۲۱۴/۶	۲۶۳/۱	۲۰۵/۴	۱۸۸/۳	۱۴۰/۷	۱۳۹/۲	۲۱۸۴/۲
اینچه‌برون	۱۵۸/۸	۱۳۸/۹	۱۷۲/۴	۲۰۸/۳	۲۶۶/۱	۲۹۷/۲	۲۶۹/۰	۲۸۳/۲	۲۴۵/۲	۲۱۶/۵	۱۵۷/۴	۱۴۴/۰	۲۵۵۶/۸
مینودشت	۱۵۱/۶	۱۲۸/۲	۱۴۴/۰	۱۶۵/۵	۲۲۶/۴	۲۸۵/۶	۲۶۳/۷	۲۸۱/۴	۲۳۶/۳	۲۰۱/۹	۱۵۱/۱	۱۳۲/۵	۲۳۶۸/۲
فرودگاه گرگان	۱۵۵/۱	۱۲۹/۸	۱۴۶/۵	۱۷۱/۹	۲۲۶/۱	۲۶۸/۱	۲۴۷/۸	۲۶۵/۶	۲۲۵/۸	۲۰۰/۰	۱۵۹/۲	۱۴۹/۶	۲۳۴۵/۳
میانگین	۱۵۴/۱	۱۳۳/۸	۱۵۰/۵	۱۷۲/۵	۲۳۴/۷	۲۷۴/۰	۲۵۵/۸	۲۷۶/۰	۲۳۳/۰	۲۰۷/۲	۱۵۸/۰	۱۴۵/۷	۲۳۹۲/۷

است که بیشترین انرژی تابش خورشیدی دریافتی سالانه مربوط به مراوه‌تپه به میزان ۱۶۱۵ کیلووات بر مترمربع در سال است.

۲-۴ برآورد تابش استان گلستان بر اساس داده-

های GEOS-5 و ERA5 و داده‌های دیده‌بانی در چند سال اخیر، استفاده از داده‌های بازتحلیل مدل‌های پیش‌بینی عددی در کنار استفاده از داده‌های ایستگاه‌های تابش‌سنجی و تصاویر ماهواره، برای مناطقی که پوشش ماهواره‌ای ندارند و همچنین برای پر کردن شکاف‌های سری‌های زمانی رواج یافته است. با توجه به تعداد کم ایستگاه‌های سنجش تابش و نقص داده‌ها در استان گلستان، در این مطالعه علاوه بر داده‌های تابش ایستگاه‌های هواشناسی استان، از داده‌های GEOS-5 و همچنین داده-های بازتحلیل ERA5 برای دوره زمانی ۲۰۱۴ تا ۲۰۲۰ استفاده شده است.

میانگین ساعت آفتابی روزانه ایستگاه‌های استان گلستان، ۶/۶ ساعت است که بیشترین آن مربوط به مراوه‌تپه برابر با ۷/۵ ساعت و کمترین آن مربوط به علی‌آباد کتول به میزان ۵/۸ ساعت است.

۲-۳ تحلیل تابش بر اساس داده‌های دیده‌بانی

خلاءهای آماری داده‌های شدت تابش و ساعت آفتابی ایستگاه‌های هواشناسی در استان گلستان در دوره مورد مطالعه، با استفاده از روش نسبت‌ها تکمیل شده است. برای آزمون همگنی این داده‌ها از روش RUN-TEST استفاده شده که تصادفی بودن آنها در سطح ۹۵ درصد پذیرفتنی است. در جدول ۴ میانگین ماهانه و سالانه تابش دریافتی در سطح افقی برحسب (kW/m²/time) در ایستگاه‌های استان گلستان نشان داده شده است. در دوره مورد بررسی (از ۲۰۱۴ تا ۲۰۲۰) میانگین انرژی تابشی کل ایستگاه‌های همدیدی استان گلستان ۱۴۹۲ کیلووات بر مترمربع در سال

جدول ۴. میانگین تابش دریافتی ماهانه و سالانه در سطح افقی برحسب ($\text{kW/m}^2/\text{time}$) در ایستگاه‌های استان گلستان در دوره ۲۰۱۴ تا ۲۰۲۰.

نام ایستگاه هواشناسی	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Ann
	month ² /kW/m												year ² /kW/m
ایمر ملاساری	۶۶	۸۱	۱۰۷	۱۱۹	۱۶۰	۱۷۳	۱۷۸	۱۹۱	۱۴۶	۱۰۳	۷۲	۶۲	۱۴۵۸
بندرگر	۶۶	۵۹	۹۸	۱۲۷	۱۸۶	۱۹۲	۱۸۴	۱۵۲	۱۴۹	۱۱۴	۷۳	۵۹	۱۴۶۰
قازان‌قابه	۶۴	۷۰	۱۰۴	۱۳۸	۱۷۸	۱۹۶	۱۹۴	۱۹۰	۱۳۹	۹۸	۶۸	۵۴	۱۴۹۳
گلیداغ	۷۰	۸۴	۱۰۹	۱۲۸	۱۶۹	۱۹۱	۲۰۱	۱۹۳	۱۴۷	۱۱۰	۷۷	۶۳	۱۵۴۱
گمیشان	۷۰	۷۷	۱۱۱	۱۱۹	۱۷۳	۱۸۹	۱۸۲	۱۷۸	۱۳۶	۹۶	۶۸	۵۹	۱۴۵۸
فرودگاه گرگان	۶۳	۷۸	۱۰۰	۱۴۶	۱۶۷	۱۸۶	۱۷۲	۱۹۷	۱۳۴	۱۰۴	۷۰	۵۶	۱۴۷۳
اینچه‌برون	۷۳	۷۹	۱۰۹	۱۲۳	۱۷۶	۱۹۰	۱۸۴	۱۸۰	۱۳۳	۱۰۱	۷۲	۶۱	۱۴۸۲
فرودگاه کلاله	۵۹	۷۵	۹۶	۱۲۷	۱۷۲	۱۸۳	۱۸۰	۱۹۱	۱۴۷	۱۰۴	۷۶	۵۲	۱۴۶۱
مراوه‌تپه	۶۸	۷۴	۱۱۰	۱۳۴	۱۹۹	۲۱۳	۲۱۴	۱۸۸	۱۶۱	۱۱۶	۸۰	۵۷	۱۶۱۵
مزرعه نمونه	۶۵	۷۷	۱۰۳	۱۳۷	۱۷۵	۱۸۹	۱۷۵	۱۷۸	۱۳۴	۹۶	۶۵	۵۷	۱۴۵۰
مینودشت	۶۰	۵۵	۹۸	۱۲۱	۱۷۹	۱۹۱	۲۰۲	۱۶۷	۱۵۴	۱۰۹	۷۶	۵۲	۱۴۶۵
نارلی آجی‌سو	۷۱	۸۰	۱۱۳	۱۳۹	۱۸۰	۲۰۰	۱۹۴	۱۹۹	۱۴۳	۱۰۷	۶۶	۶۲	۱۵۵۵
بندر ترکمن	۶۴	۵۸	۱۰۱	۱۲۷	۱۸۵	۱۹۶	۱۹۶	۱۶۲	۱۴۸	۱۱۴	۶۹	۵۸	۱۴۷۸
میانگین	۶۶	۷۳	۱۰۵	۱۳۰	۱۷۷	۱۹۲	۱۸۹	۱۸۲	۱۴۴	۱۰۵	۷۲	۵۸	۱۴۹۲

مناسبند. مشاهدات ماهواره‌ای پوشش بیشتری نسبت به مشاهدات زمینی دارند، اما به‌تنهایی دقت لازم را ندارند (رویز- آریاس، ۲۰۱۵)؛ بنابراین سامانه مشاهده زمین گودارد مدل نسخه ۵ (The Goddard Earth Observing System model version 5, GEOS-5) یکی از محدود مدل‌های (Atmospheric Chemistry and ACNWP Numerical Weather Prediction models) است که اندازه‌گیری‌های ماهواره‌ای و زمینی را ترکیب و معیارهای پیش‌بینی‌های عملیاتی روز آینده را برآورد می‌کند (بان و همکاران، ۲۰۲۰). ماهواره‌های ناسا مقادیر کافی از داده‌های دنیای واقعی درباره بادها و دیگر پدیده‌های جوّی کره زمین را جمع‌آوری می‌کنند. داده‌های جمع‌آوری‌شده چهار مرتبه در روز در مدل سامانه مشاهده زمین گودارد (GEOS-5) وارد می‌شوند. در مکان‌هایی

داده‌های ERA5 از مجموعه داده‌های بازتحلیل‌شده هواشناسی از مدل ECMWF است. این داده‌ها در پیوند (<https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/reanalysis-datasets/era5>) برای بازه زمانی سال ۱۹۷۹ تا کنون با تفکیک افقی ۳۰ کیلومتر، در ۱۳۷ تراز از سطح زمین تا سطح ۰/۰۱ هکتوپاسکال (تا ارتفاع ۸۰ کیلومتری از سطح زمین) در دسترس هستند. گوارد داده با روش کالمن گروهی (Ensemble Data Assimilation, EDA) و تفکیک ۶۳ کیلومتر انجام می‌شود. در این وبگاه داده‌های تحلیل‌شده و پیش‌بینی ساعتی و EDA سه‌ساعته در دسترس هستند.

داده‌های روزانه تابش GEOS-5 از سال ۲۰۱۴ تا ۲۰۲۰ استخراج‌شده از تصاویر ماهواره شامل سی نقطه در محدوده استان گلستان است. مشاهدات زمینی دقیق‌ترین اندازه‌گیری هستند، اما این مشاهدات فاقد پوشش مکانی

مقایسه شوند تا در صورت داشتن کیفیت مناسب، از آنها برای نقاط فاقد اطلاعات استفاده شود.

۳-۱-۱ مقایسه نموداری

شکل ۳ تابش خورشیدی ماهانه و روزانه اندازه‌گیری شده و تابش ماهانه و روزانه استخراج شده از GEOS-5 و داده‌های ERA5 را در ایستگاه مراوه‌تپه استان گلستان نشان می‌دهد (در سایر ایستگاه‌ها شکل نشان داده نشده است). در بیشتر ایستگاه‌ها مقادیر تابش ماهانه در هر دو منبع داده مقدار کمی فراتخمین هستند که میزان آن در داده‌های بازتحلیل ERA5 بیشتر است، اما روند تغییرات تابش ماهانه در هر دو سری داده مانند داده‌های دیده‌بانی است. به‌طور کلی مقایسه داده‌های تابش کل خورشیدی خروجی GEOS-5 و داده‌های تابش کل خورشیدی ERA5 با داده‌های ثبت شده موجود در محل ایستگاه‌های اندازه‌گیری تابش استان نشان‌دهنده دقت مناسب این داده‌ها در برآورد تابش خورشیدی سطح زمین در استان گلستان است به گونه‌ای که روند تغییرات روزانه داده‌های ماهواره‌ای با روند تغییرات داده‌های ثبت شده در ایستگاه‌ها همخوانی بسیار خوبی دارد.

۳-۱-۲ بررسی کیفیت داده‌های ERA5 و مقایسه آنها با استفاده از سنج‌های آماری

برای بررسی کیفیت داده‌های ERA5 و GEOS-5 از سنج‌های آماری خطای مطلق (MAE)، خطای اربیبی (MBE)، مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE) و ضریب تعیین (R^2) در دوره‌های مختلف زمانی استفاده شده است:

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - Y)}{n} \quad (2)$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |X_i - Y_i|}{n} \quad (3)$$

که پوشش ماهواره‌ای ندارند، با محاسباتی خلاء داده‌ها پر می‌شود. مدل GEOS-5 همچنین دماهای سطحی روی زمین، حرکت غبار، بارش‌ها، شوری دریا، کربن و سولفات‌ها را در سراسر زمین مدل‌سازی می‌کند. اداره جهانی مدل‌سازی و گوارد (Global Modeling and Assimilation Office, GMAO) از سامانه مشاهده زمین گوارد برای تولید محصولات داده GEOS-FP در زمان واقعی یا حالت‌های بازتحلیل برای پشتیبانی از کاربران استفاده می‌کند. جریان پردازش پیش‌رو (Forward Processing, FP) پیش‌بینی‌ها و همچنین محصولات گوارد را با استفاده از جدیدترین سامانه تأیید شده برای تولید در زمان واقعی ایجاد می‌کند. محصولات FP در درجه اول برای پشتیبانی بی‌درنگ از پوشش‌های میدانی ناسا، پشتیبانی از علم ناسا، ارزیابی سامانه GEOS و تعامل با سایر مراکز گوارد داده‌ها استفاده می‌شوند. با ارتقاء سامانه GEOS و انتقال به وضعیت تولید، سامانه FP به‌روز می‌شود (جوینر، ۲۰۱۸).

پس از بررسی کیفیت داده‌ها برای پهنه‌بندی تابش، اطلاعات تابشی ۱۲۰ نقطه که حاصل تلفیق داده‌های اندازه‌گیری زمینی، ERA5 و GEOS-5 و درون‌یابی آنها در ۱۲۰ نقطه شبکه منظم است، در استان به‌صورت ماهانه و سالانه برآورد و نقشه پهنه‌بندی تابش استان گلستان به‌صورت ماهانه و سالانه در محیط GIS ترسیم شد. گفتنی است برای درون‌یابی از روش کریجینگ استفاده شده است.

۳ نتایج و بحث

۳-۱ بررسی کیفیت داده‌های GEOS-5 و ERA5 و مقایسه آنها با داده‌های تابش ایستگاه‌های دیده‌بانی استان گلستان

برای استفاده از داده‌های ERA5 و GEOS-5 پس از استخراج آنها، لازم است با داده‌های ثبت شده در ایستگاه‌ها

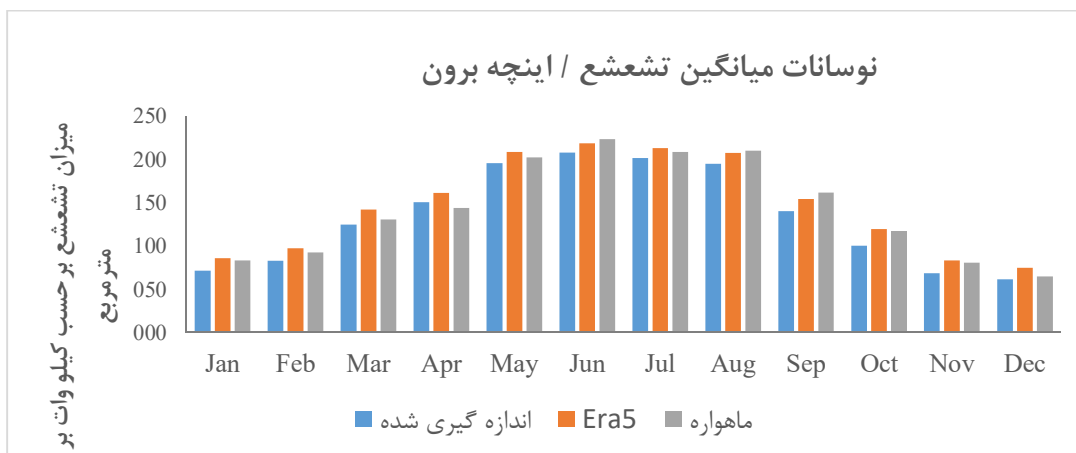
تابش ماهانه ایستگاه‌های استان کمتر از خطای ERA5 است. میانگین ضریب تعیین برای GEOS-5 برابر با ۰/۹۸۸ و برای ERA5 برابر ۰/۹۹۵ است که کیفیت پذیرفتنی داده‌ها را نشان می‌دهد.

شاخص RMSE به صورت درصد اختلاف نسبی مقادیر شبیه‌سازی شده و مقادیر اندازه‌گیری زمینی بیان می‌شود (تاتاری و همکاران، ۱۳۸۸). بر اساس تعریف کیفیت داده، اگر مقدار شاخص RMSE کمتر از ۱۰ درصد باشد، عالی؛ اگر بین ۱۰ تا ۲۰ درصد باشد، خوب؛ اگر بین ۲۰ تا ۳۰ درصد باشد، متوسط و اگر بیشتر از ۳۰ درصد باشد، ضعیف برآورد می‌شود (رینالدی و همکاران، ۲۰۰۳).

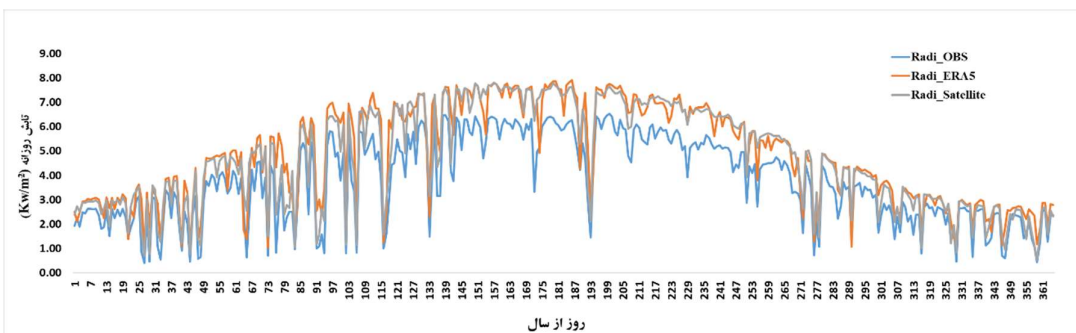
$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - Y_i)^2}{n}} \quad (۴)$$

$$R^2 = \frac{(\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}))^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (۵)$$

مقادیر به دست آمده در مطالعه حاضر در جدول ۵ نشان داده شده است. هرچه مقدار شاخص‌های خطاسنجی، کمتر و میزان شاخص ضریب تعیین بیشتر باشد، داده دقیق‌تر و مناسب‌تر است. مقایسه داده‌های اندازه‌گیری زمینی تابش ایستگاه‌های استان با داده‌های تابش خورشیدی GEOS-5 و ERA5 نشان می‌دهد از نظر شاخص‌های خطای MAE، MBE و RMSE (برحسب $kW/m^2/month$) به طور کلی خطای GEOS-5 در برآورد



(الف)



(ب)

شکل ۳. (الف) نمودار تابش ماهانه اندازه‌گیری زمینی و تابش برآورد شده با داده بازتحلیل Era5 و GEOS-5 (ب) تابش روزانه اندازه‌گیری زمینی و تابش برآورد شده با داده بازتحلیل Era5 و GEOS-5 در ایستگاه اینچه‌برون در سال ۲۰۱۷.

جدول ۵. مقایسه مقادیر MAE، MBE، RMSE و ضریب تعیین تابش ماهانه ایستگاه‌های استان گلستان.

ضریب تعیین		RMSE (kW/m ^۲ /month)		MBE (kW/m ^۲ /month)		MAE (kW/m ^۲ /month)		ایستگاه
Era5	GEOS-5	Era5	GEOS-5	Era5	GEOS-5	Era5	GEOS-5	
۰/۹۹۵	۰/۹۹۰	۲۱/۰۰	۲۱/۳۰	۱۹/۴۰	۱۷/۹۰	۱۹/۴۰	۱۷/۹۰	ایمر ملاساری
۰/۹۸۲	۰/۹۹۷	۲۱/۱۰	۱۳/۴۰	۱۶/۷۰	۱۱/۹۰	۱۶/۲۰	۳/۲۰	بندرگز
۰/۹۹۸	۰/۹۹۸	۳۳/۰۰	۲۹/۵۰	۳۲/۰۰	۲۷/۲۰	۳۲/۰۰	۲۷/۲۰	قازان‌قایه
۰/۹۹۷	۰/۹۸۴	۳۳/۲۰	۱۱/۸۰	۲۲/۲۰	۹/۵۰	۲۲/۲۰	۹/۵۰	گلیداغ
۰/۹۹۹	۰/۹۸۱	۵/۶۰	۱۱/۹۰	۵/۴۰	۹/۶۰	۵/۴۰	۸/۳۰	گمیشان
۰/۹۸۶	۰/۹۸۸	۲۰/۳۰	۲۵/۵۰	۱۶/۴۰	۲۰/۰۰	۱۵/۱۰	۱۸/۸۰	فرودگاه گرگان
۰/۹۹۸	۰/۹۸۶	۱۳/۸۰	۱۲/۲۰	۱۴/۰۰	۱۰/۹۰	۱۳/۸۰	۹/۹۰	اینچه‌برون
۰/۹۹۶	۰/۹۸۴	۲۶/۷۰	۱۸/۶۰	۲۴/۵۰	۱۴/۳۰	۲۴/۵۰	۱۴/۲۰	کلاله
۰/۹۹۹	۰/۹۸۴	۱۸/۸۰	۱۱/۲۰	۱۵/۳۰	۹/۵۰	۱۵/۲۰	۲/۴۰	مراوه‌تپه
۰/۹۹۷	۰/۹۸۸	۱۶/۹۰	۱۷/۶۰	۱۵/۸۰	۱۴/۴۰	۱۵/۸۰	۱۴/۴۰	مزرعه نمونه
۰/۹۹۵	۰/۹۸۵	۲۰/۵۰	۱۴/۲۰	۱۷/۰۰	۱۱/۶۰	۱۶/۸۰	۶/۰۰	مینودشت
۰/۹۹۹	۰/۹۹۱	۱۵/۱۰	۸/۰۰	۱۵/۰۰	۷/۳۰	۱۵/۰۰	۶/۰۰	نارلی آجی‌سو
۰/۹۹۹	۰/۹۹۱	۱۳/۴۰	۲۰/۶۰	۱۳/۴۰	۱۶/۴۰	۴/۶۰	۱۰/۹۰	بندر ترکمن
۰/۹۹۵	۰/۹۸۸	۱۹/۹۵	۱۶/۶۰	۱۷/۴۸	۱۳/۸۸	۱۶/۶۲	۱۱/۴۴	میانگین

جدول ۶. بررسی کیفیت داده‌های ERA5 و GEOS-5 در برآورد تابش ماهانه ایستگاه‌های استان بر اساس شاخص RMSE.

ماهواره GEOS-5			داده باز تحلیل Era5			ایستگاه
کیفیت داده	شاخص ارزیابی	RMSE (kW/m ^۲ /month)	کیفیت داده	شاخص ارزیابی	RMSE (kW/m ^۲ /month)	
خوب	۱۴/۸۶	۲۱/۲۹	خوب	۱۴/۴۹	۲۰/۹۸	ایمر ملاساری
خوب	۱۰/۲۹	۱۳/۴۰	خوب	۱۴/۷۳	۲۱/۰۹	بندرگز
متوسط	۲۰/۰۳	۲۹/۵۴	متوسط	۲۱/۶۹	۳۳/۰۰	قازان‌قایه
عالی	۸/۴۷	۱۱/۸۲	خوب	۱۵/۲۲	۲۳/۱۹	گلیداغ
عالی	۸/۳۲	۱۱/۹۱	عالی	۴/۰۰	۵/۶۱	گمیشان
خوب	۱۷/۴۲	۲۵/۵۲	خوب	۱۴/۲۳	۲۰/۳۴	فرودگاه گرگان
عالی	۸/۴۹	۱۲/۱۶	عالی	۹/۵۲	۱۴/۰۱	اینچه‌برون
خوب	۱۳/۳۳	۱۸/۶۱	خوب	۱۷/۸۰	۲۶/۶۹	فرودگاه کلاله
عالی	۸/۰۱	۱۱/۱۹	خوب	۱۲/۳۲	۱۸/۷۷	مراوه‌تپه
خوب	۱۲/۲۹	۱۷/۶۰	خوب	۱۱/۷۰	۱۶/۹۲	مزرعه نمونه
خوب	۱۰/۲۰	۱۴/۲۴	خوب	۱۳/۶۵	۲۰/۵۲	مینودشت
عالی	۵/۶۲	۷/۹۸	خوب	۱۰/۰۲	۱۵/۱۴	نارلی آجی‌سو
خوب	۱۴/۰۶	۲۰/۶۰	عالی	۹/۵۲	۱۳/۳۵	بندر ترکمن

رگرسیون بین داده‌های روزانه تابش ایستگاه‌ها و داده‌های ERA5 و GEOS-5 به صورت موردی برای ایستگاه اینچه-برون در سال ۲۰۱۷ در شکل ۴ آورده شده است. دو دسته داده مربوط به ۳۶۵ روز سال ۲۰۱۷ شامل داده‌های GEOS-5 و ERA5 در محل ایستگاه اینچه‌برون با داده‌های روزانه اندازه‌گیری شده ایستگاه اینچه‌برون مقایسه شدند. نمودار رگرسیون خطی ساده است و ضریب تعیین به دست آمده نشان‌دهنده دقت مناسب داده‌ها است. مقایسه داده‌های تابش خورشیدی روزانه ایستگاهی و ERA5 و GEOS-5 با استفاده از نمودار رگرسیون خطی دو متغیره (شکل نشان داده نشده است) نشان‌دهنده همبستگی زیاد بین این داده‌ها است (جدول ۹).

میانگین ضریب تعیین در برآورد تابش روزانه ایستگاه‌های استان برای ERA5 برابر ۰/۷۹۰ و برای GEOS-5 برابر ۰/۷۷۰ است که از نظر آماری مقادیری پذیرفتنی هستند.

جدول ۷. میانگین ماهانه تشعشع برحسب کیلووات بر مترمربع در ماه برای ایستگاه‌های مورد بررسی.

ایستگاه	اندازه‌گیری زمینی	Era5	GEOS-5
ایمر ملاساری	۱۲۵/۳	۱۴۴/۷	۱۴۳/۲
بندر گز	۱۲۷/۱	۱۴۳/۲	۱۳۰/۲
قازان‌قایه	۱۲۰/۲	۱۵۲/۱	۱۴۷/۴
کلیداغ	۱۳۰/۱	۱۵۲/۳	۱۳۹/۶
گمیشان	۱۳۴/۸	۱۴۰/۲	۱۴۳/۲
فرودگاه گرگان	۱۲۷/۷	۱۴۲/۸	۱۴۶/۵
اینچه‌برون	۱۳۳/۳	۱۴۷/۱	۱۴۳/۲
فرودگاه کلاله	۱۲۵/۴	۱۴۹/۸	۱۳۹/۶
مراوه‌تپه	۱۳۷/۲	۱۵۲/۳	۱۳۹/۶
مزرعه نمونه	۱۲۸/۸	۱۴۴/۶	۱۴۳/۲
مینودشت	۱۳۳/۵	۱۵۰/۳	۱۳۹/۶
نارلی آجی‌سو	۱۳۵/۹	۱۵۰/۹	۱۴۲/۰
بندر ترکمن	۱۳۵/۶	۱۴۰/۲	۱۴۶/۵

با توجه به شاخص RMSE در جدول ۶، داده بازتحلیل ERA5 تابش ماهانه ایستگاه‌های گمیشان، اینچه‌برون و بندر ترکمن را با دقت عالی، ایستگاه قازان‌قایه را با دقت متوسط و سایر ایستگاه‌ها را با دقت خوب برآورد کرده است. دقت برآورد تابش ماهانه بر اساس تصاویر GEOS-5 در ایستگاه‌های گمیشان، کلیداغ، اینچه‌برون، مراوه‌تپه و نارلی آجی‌سو، عالی؛ در ایستگاه قازان‌قایه، متوسط و در سایر ایستگاه‌ها خوب بوده است؛ بنابراین بر اساس شاخص RMSE، دقت داده‌های ERA5 و GEOS-5 برای برآورد تابش ایستگاه‌های استان گلستان مناسب و پذیرفتنی است. همچنین نتایج محاسبه سنج‌های آماری خطای مطلق (MAE) و خطای اربیبی (MBE) بین مقادیر تابش روزانه اندازه‌گیری زمینی و شبیه‌سازی شده ایستگاه‌های بررسی شده نشان می‌دهد دقت هر دو روش در برآورد تابش استان مناسب است.

۳-۱-۳ بررسی دقت تابش برآوردشده با آزمون T

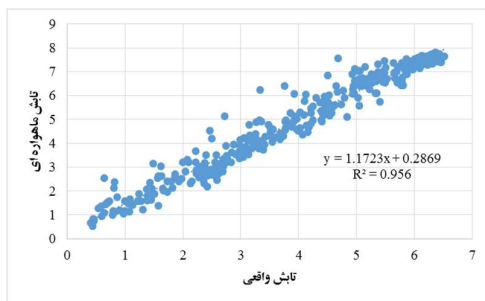
با استفاده از آزمون T، میانگین ماهانه تابش برآوردشده با داده‌های ERA5 و GEOS-5 با داده‌های اندازه‌گیری زمینی (جدول ۷) مقایسه شد (جدول ۸). نتایج نشان می‌دهد دقت برآوردها در مکان‌ها و دوره‌های مختلف در استان گلستان متفاوت است، اما اختلاف معنی‌داری در داده‌های ایستگاه‌های بررسی شده وجود ندارد. به‌طور کلی هر دو خروجی برای برآورد تابش خورشیدی در استان مناسب هستند و دقت برآورد تابش استان در سطح اعتماد ۹۵ درصد تأیید می‌شود؛ بنابراین می‌توان از داده‌های ERA5 و GEOS-5 برای نقاط بدون ایستگاه استفاده کرد.

۳-۱-۴ بررسی رگرسیونی همبستگی داده‌های روزانه تابش ایستگاه‌ها و داده‌های ERA5 و GEOS-5

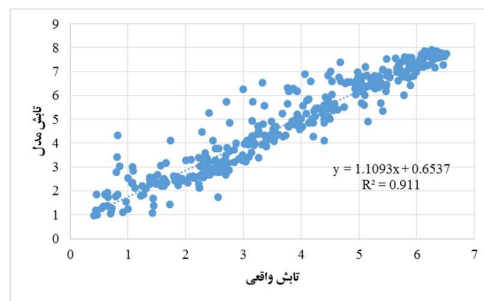
برای بررسی صحت و دقت داده‌های برآوردشده، نمودار

جدول ۸. نتایج آزمون T داده‌های ERA5 و GEOS-5 در برآورد تابش ایستگاه‌های استان گلستان.

نام ایستگاه	داده‌های اندازه‌گیری زمینی و ERA5				داده‌های اندازه‌گیری زمینی و GEOS-5			
	نتیجه	sig	T	F	نتیجه	sig	T	F
ایمر ملامساری	برابر	۰/۴۱	-۰/۹۴	۰/۷۶	۰/۳۹	۰/۳۵	-۰/۸۴	۰/۴۱
بندر گز	برابر	۱/۷۸	-۰/۸۷	۱/۹۰	۰/۱۸	۰/۳۹	-۰/۱۷	۰/۱۲
قازان قایه	برابر	۰/۴۰	-۱/۴۲	۰/۸۱	۰/۳۷	۰/۱۷	-۱/۱۸	۰/۱۵
گلیداغ	برابر	۰/۲۹	-۰/۹۹	۰/۱۷	۰/۶۷	۰/۳۳	-۰/۴۲	۰/۶۷
گمیشان	برابر	۰/۰۱	-۰/۲۴	۰/۱۲	۰/۷۳	۰/۸۱	-۰/۳۷	۰/۷۲
فرودگاه گرگان	برابر	۱/۶۵	-۰/۷۸	۲/۳۲	۰/۱۴	۰/۴۲	-۰/۹۴	۰/۳۵
اینچه‌برون	برابر	۰/۰۳	-۰/۶۱	۰/۰۰	۰/۹۹	۰/۵۵	-۰/۴۲	۰/۶۷
فرودگاه کلاله	برابر	۰/۹۱	-۱/۱۸	۱/۰۳	۰/۳۱	۰/۲۴	-۰/۶۹	۰/۵۱
مراوه‌تپه	برابر	۰/۹۷	-۰/۷۱	۰/۷۷	۰/۳۹	۰/۴۸	-۰/۱۲	۰/۹۱
مزرعه نمونه	برابر	۰/۲۶	-۰/۷۵	۰/۵۵	۰/۴۶	۰/۴۶	-۰/۶۶	۰/۵۱
مینودشت	برابر	۱/۱۹	-۰/۸۲	۱/۴۰	۰/۲۴	۰/۴۲	-۰/۲۹	۰/۷۷
نارلی آجی‌سو	برابر	۰/۰۱	-۰/۶۲	۰/۰۰	۰/۹۶	۰/۵۴	-۰/۲۴	۰/۸۱
بندر ترکمن	برابر	۱/۴۵	-۰/۲۴	۲/۵۰	۰/۱۳	۰/۸۱	-۰/۵۵	۰/۵۸



(ب)



(الف)

شکل ۴. نمودار رگرسیونی مقایسه تابش روزانه اندازه‌گیری زمینی ایستگاه اینچه‌برون با داده‌های (الف) ERA5 (ب) GEOS-5 در ایستگاه اینچه‌برون در سال

جدول ۹. مقایسه مقادیر ضریب تعیین (R^2) تابش اندازه‌گیری زمینی روزانه و شبیه‌سازی ایستگاه‌های استان گلستان.

ایستگاه	داده‌های GEOS-5	داده‌های Era5
ایمر ملساری	۰/۸۵۲	۰/۸۴۸
بندر گز	۰/۸۸۲	۰/۷۴۴
قازان‌قایه	۰/۹۶۲	۰/۹۵۲
گلیداغ	۰/۷۹۰	۰/۹۰۰
گمیشان	۰/۸۸۹	۰/۹۳۷
فرودگاه گرگان	۰/۶۴۷	۰/۶۱۵
اینچه برون	۰/۹۱۱	۰/۹۵۶
کلاله	۰/۷۳۹	۰/۶۱۳
مراوه‌تپه	۰/۶۴۳	۰/۳۹۹
مزرعه نمونه	۰/۵۳۶	۰/۵۸۴
مینودشت	۰/۷۷۵	۰/۷۵۲
نارلی آجی‌سو	۰/۸۳۸	۰/۸۶۱
بندر ترکمن	۰/۸۰۴	۰/۷۹۴
میانگین	۰/۷۷۰	۰/۷۹۰

مدل رگرسیون خطی، یافتن رابطه‌ای خطی بین داده‌های اندازه‌گیری شده و تخمین زده شده، است. این روش ساده معمولاً برای تصحیح داده‌های تابش خورشیدی مشتق از ماهواره استفاده می‌شود و نتایج خوبی را در مازورا آگیار و همکاران (۲۰۱۹)، پولو و همکاران (۲۰۱۶) و پولو و استالایو (۲۰۱۵) نشان می‌دهد. برازش حداقل مربعات خطی بین داده‌های تخمین زده شده (x_m) و مشاهدات (x_o) در یک دوره زمانی منتخب (برای مثال، یک سال) انجام می‌شود تا شیب (a) و عرض از مبدأ (b) به دست آید. روش حذف اریبی برای داده‌های برازش را می‌توان با استفاده از معادله زیر بیان کرد (ونگ و همکاران، ۲۰۲۱):

$$y = x_m - [(a - 1)x_o + b] \quad (۶)$$

چنین بیانی از y و x_m به یک تابع خطی f منجر می‌شود که می‌تواند برای تبدیل تمام داده‌های تخمین زده شده تاریخی به داده‌های اصلاح شده جدید، y_c ، استفاده شود.

$$y_c = f(x_m) \quad (۷)$$

f نشان‌دهنده تابع خطی حاصل از برازش مقادیر y_c اصلاح شده در برابر y اصلی است. در این پژوهش با روش حذف اریبی بر مبنای مطالعه پولو و همکاران (۲۰۲۰) کیفیت مجموعه داده‌ها ارتقاء یافته و مقادیر شیب و عرض از مبدأ به ترتیب برای داده‌های GEOS-5 برابر با ۰/۸۵ و ۰/۹- و برای ERA5 برابر با ۰/۹ و ۹- حاصل شده است.

۳-۲ پهنه‌بندی تابش خورشیدی استان گلستان

۳-۲-۱ پهنه‌بندی تابش خورشیدی سالانه

نتایج بررسی داده‌های تابش کل خورشیدی برآورد شده GEOS-5 و ERA5 با داده‌های اندازه‌گیری زمینی نشان می‌دهد با وجود اینکه دقت ERA5 و GEOS-5 در برآورد تابش نقاط مختلف استان متفاوت است، به‌طور کلی دقت این دو روش برای برآورد تابش استان مناسب است. جهت پهنه‌بندی، تابش ۱۲۰ نقطه در استان به‌صورت ماهانه و سالانه برآورد و نقشه پهنه‌بندی تابش

در این مطالعه همانند پژوهش پولو و همکاران (۲۰۲۰) داده‌های GEOS-5 و ERA5 نسبت به داده‌های اندازه‌گیری زمینی تابش فراتخمین هستند و در حقیقت، یک اریبی بین داده‌های برآورد شده با داده‌های ERA5 و GEOS-5 و داده‌های اندازه‌گیری زمینی وجود دارد. تقریباً در هر پروژه انرژی خورشیدی، داده‌های تابش خورشیدی با دقت زیاد برای قابلیت ذخیره‌سازی مورد نیاز است. جهت بهبود این مجموعه داده‌ها، مقایسه با اندازه‌گیری‌های زمینی در یک دوره زمانی کوتاه می‌تواند برای اصلاح برخی جنبه‌ها، اغلب اریبی، استفاده شود. در پژوهش پولو و همکاران (۲۰۲۰)، از بیش از ده راهکار مختلف برای ارزیابی بهبود دقت داده‌ها استفاده شده است. اثربخشی این روش‌ها همگن نیست، اما می‌توان به پیشرفت‌های درخور توجهی در بیشتر مجموعه‌های داده دست یافت. بسیاری از روش‌ها از راهکارهای حذف اریبی الهام گرفته شده‌اند. هدف حذف اریبی با استفاده از

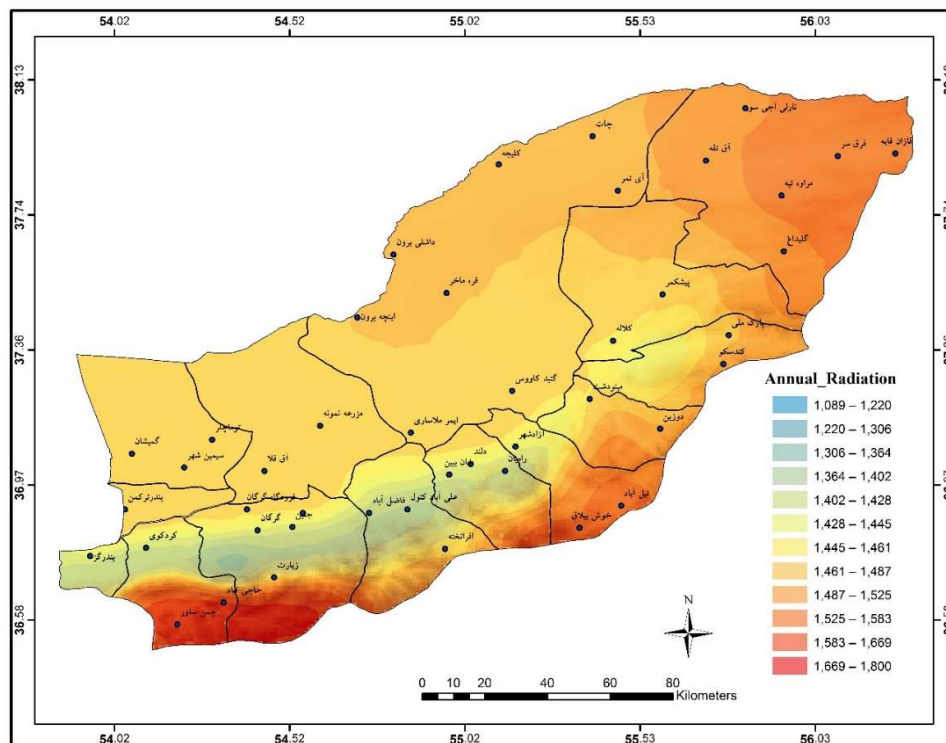
سالانه در بیشترین وسعت استان که شامل مناطق شمالی استان گلستان با دشت‌های وسیع است، حدود ۱۴۶۰ تا ۱۵۲۵ کیلووات بر مترمربع در سال (میانگین ۱۵۰۰ کیلووات بر مترمربع در سال) است.

نقشه هم‌پوشانی تابش دریافتی استان با کوهساری استان گلستان (شکل ۶) نشان‌دهنده صحت خوب پهنه‌بندی در استان است. در این پهنه‌بندی مناطق جنگلی و مرطوب استان در محدوده حداقل تابش دریافتی سالانه (۱۱۰۰ تا ۱۲۰۰ کیلووات بر مترمربع در سال) واقعند و مناطق خشک و کم‌باران بیشترین مقدار تابش خورشیدی دریافتی سالانه را دارند (۱۶۰۰ تا ۱۸۰۰ کیلووات بر مترمربع در سال). همچنین تغییرات تابش دریافتی با عرض جغرافیایی به علت تمایل و افزایش زاویه تابش به سطح افقی نیز در این پهنه‌بندی مشاهده می‌شود.

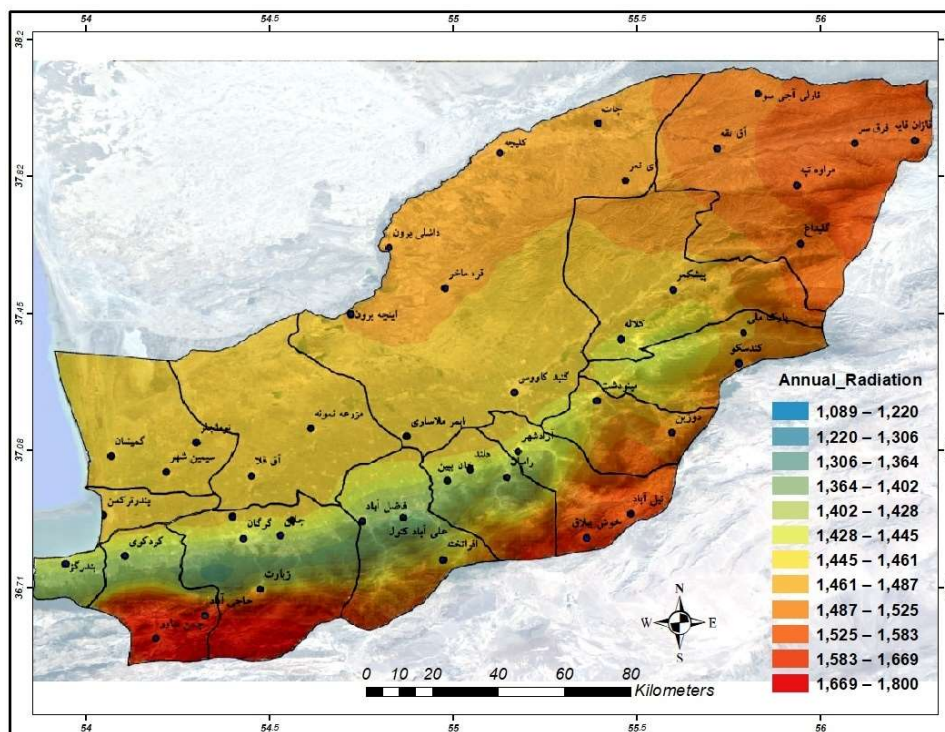
استان گلستان به صورت ماهانه و سالانه در محیط GIS ترسیم شده است. برای درون‌یابی از روش کریجینگ استفاده شده است (شکل ۵).

پهنه‌بندی تابش خورشیدی سالانه استان نشان می‌دهد میانگین مجموع تابش سالانه استان گلستان ۱۴۸۵ کیلووات بر مترمربع در سال است که از ۱۰۸۹ در نواحی کوهستانی جنگلی استان تا ۱۸۰۰ در ارتفاعات جنوب غرب استان گلستان در مرز با استان سمنان، که آب‌وهوای نیمه‌خشک و سرد کوهستانی دارد، متغیر است.

تابش سالانه مناطق شمال شرق استان در شهرستان مراوه تپه به علت آب‌وهوای نیمه‌خشک و بهره بردن از ساعت آفتابی، ۱۵۰۰ تا ۱۶۰۰ کیلووات بر مترمربع در سال است. این مناطق پتانسیل مناسبی جهت بهره‌برداری از انرژی خورشیدی دارند. همچنین مجموع تابش خورشیدی



شکل ۵. نقشه میانگین مجموع سالانه تابش (برحسب کیلووات بر مترمربع در سال) استان گلستان.



شکل ۶. نقشه هم‌پوشانی میانگین مجموع سالانه تابش گلستان (برحسب کیلووات بر مترمربع در سال) با کوهساری استان گلستان.

۲-۲-۳ پهنه‌بندی تابش خورشیدی ماهانه

پهنه‌بندی تابش خورشیدی ماه ژانویه استان نشان می‌دهد میانگین تابش خورشیدی در این ماه، ۷۳ کیلووات بر مترمربع در ماه است که از ۵۰ کیلووات بر مترمربع در ماه در نواحی کوهستانی جنگلی علی‌آباد کتول، آزادشهر و مینودشت تا ۹۵ کیلووات بر مترمربع در ماه در ارتفاعات جنوب غرب در چمن‌ساور متغیر است. در ماه فوریه میانگین تابش خورشیدی ۸۵ کیلووات بر مترمربع در ماه است که این مقادیر تابش ماهانه از ۵۵ کیلووات بر مترمربع در ماه در نواحی کوهستانی جنگلی مینودشت و آزادشهر تا ۱۱۸ کیلووات بر مترمربع در ماه در ارتفاعات حاجی‌آباد و چمن‌ساور متفاوت است. میانگین ماهانه تابش خورشیدی در پهنه‌بندی تابش خورشیدی ماه مارس در استان گلستان، ۱۱۰ کیلووات بر مترمربع در ماه است که از ۱۰۰ کیلووات بر مترمربع در ماه در نواحی

کوهستانی جنگلی کردکوی تا مینودشت تا مقدار ۱۲۸ کیلووات بر مترمربع در ماه در ارتفاعات جنوب غرب حاجی‌آباد و چمن‌ساور متغیر است. تابش خورشیدی ماه آوریل استان نشان می‌دهد میانگین تابش خورشیدی این ماه ۱۴۰ کیلووات بر مترمربع در ماه است که از ۱۲۳ کیلووات بر مترمربع در ماه در نواحی کوهستانی جنگلی استان تا ۱۶۰ کیلووات بر مترمربع در ماه در ارتفاعات جنوب گلیداغ، پارک ملی، خوش‌ییلاق، حاجی‌آباد و چمن‌ساور متغیر است. گلیداغ، مراوه‌تپه و آق‌تقه، داشلی‌برون و اینچه‌برون در محدوده ۱۴۵ تا ۱۵۵ کیلووات بر مترمربع قرار دارند. در ماه مه تابش خورشیدی استان نشان می‌دهد میانگین تابش خورشیدی ماه مه به علت گذار از فصل بهار به تابستان نسبت به ماه آوریل افزایش داشته و ۱۸۶ کیلووات بر مترمربع در ماه است که از ۱۶۰ کیلووات بر مترمربع در ماه در نواحی

استان گلستان تغییر می‌کند. محدوده تابش دریافتی در این ماه در شمال شرق استان گلستان بین ۱۵۰ تا ۱۶۰ کیلووات بر مترمربع است.

نتایج این بررسی نشان می‌دهد در ماه اکتبر میانگین تابش خورشیدی ماهانه استان گلستان ۱۱۴ کیلووات بر مترمربع در ماه است که از ۱۰۱ کیلووات بر مترمربع در ماه در نواحی کوهستانی جنگلی استان تا ۱۳۴ کیلووات بر مترمربع در ماه در ارتفاعات جنوب استان شامل چمن‌ساور، خوش‌یلاق، دوزین و پارک ملی گلستان متغیر است. در ماه نوامبر به علت گذار به فصل زمستان، مقدار تشعشع خورشیدی دریافتی ناشی از ساعات آفتابی کم، کاهش چشمگیری یافته است. پهنه‌بندی تابش خورشیدی ماه نوامبر استان نشان می‌دهد میانگین تابش خورشیدی ماه نوامبر استان گلستان ۷۴ کیلووات بر مترمربع در ماه است که از ۵۲ کیلووات بر مترمربع در ماه در نواحی کوهستانی جنگلی استان تا ۹۶ کیلووات بر مترمربع در ماه در ارتفاعات جنوب غرب استان گلستان متغیر است. میانگین تابش خورشیدی ماه دسامبر استان گلستان ۶۵ کیلووات بر مترمربع در ماه است و کمترین تابش دریافتی ماهانه در استان مربوط به این ماه است که بازه تغییرات آن از ۴۸ کیلووات بر مترمربع در ماه در نواحی کوهستانی جنگلی علی‌آباد تا مینودشت تا ۹۳ کیلووات بر مترمربع در ماه در ارتفاعات جنوب غرب استان گلستان است.

نتایج پهنه‌بندی تابش خورشیدی ماهانه شامل میانگین تابش خورشیدی، کمینه و بیشینه تابش خورشیدی و منطقه رخداد آنها به تفکیک هر ماه خلاصه‌وار در جدول ۱۰ ارائه شده است.

۴ نتیجه‌گیری

ایران به سبب قرار گرفتن در موقعیت جغرافیایی خاص، تنوع آب‌وهوایی و پتانسیل زیادی از نظر انرژی‌های تجدیدپذیر دارد. کشور ایران با میانگین ۳۰۰ روز آفتابی

کوهستانی جنگلی استان تا ۲۱۵ کیلووات بر مترمربع در ماه در ارتفاعات جنوب غرب استان متغیر است. همچنین در این ماه نواحی شمالی و شمال شرق استان در محدوده ۲۰۰ تا ۲۱۰ کیلووات بر مترمربع در ماه قرار گرفته‌اند. پهنه‌بندی تابش خورشیدی ماه ژوئن نشان می‌دهد میانگین تابش خورشیدی، ۲۰۲ کیلووات بر مترمربع در ماه است که از ۱۸۰ کیلووات بر مترمربع در ماه در نواحی کوهستانی جنگلی تا ۲۳۳ کیلووات بر مترمربع در ماه در ارتفاعات جنوب استان تغییر می‌کند و بیشترین تابش دریافتی در استان مربوط به این ماه است. مناطق شمال شرق استان در محدوده تابش دریافتی ماهانه ۲۱۰ تا ۲۲۶ کیلووات بر مترمربع در ماه قرار دارند.

پهنه‌بندی تابش خورشیدی ماه ژوئیه استان بیانگر میانگین تابش خورشیدی ۲۰۱ کیلووات بر مترمربع در ماه است و دامنه نوسان آن از ۱۷۸ کیلووات بر مترمربع در ماه در نواحی کوهستانی جنگلی تا ۲۳۰ کیلووات بر مترمربع در ماه در ارتفاعات جنوب استان متغیر است. شایان ذکر است تابش دریافتی در این ماه اندکی از ماه ژوئن کمتر است. همچنین محدوده تابش دریافتی شمال شرق استان در ماه ژوئیه ۲۱۶ تا ۲۳۰ کیلووات بر مترمربع است. در ماه اوت میانگین تابش خورشیدی ماهانه استان گلستان ۱۹۱ کیلووات بر مترمربع در ماه است که از ۱۶۳ کیلووات بر مترمربع در ماه در نواحی کوهستانی جنگلی استان تا ۲۲۲ کیلووات بر مترمربع در ماه در ارتفاعات جنوب غرب و شمال شرق استان متغیر است. تابش دریافتی در منطقه شمال و شمال شرق استان در این ماه بین ۲۰۰ تا ۲۲۰ کیلووات بر مترمربع در ماه است. در ماه سپتامبر به علت گذار فصلی به سمت پاییز، تابش دریافتی در استان کاهش می‌یابد. میانگین تابش خورشیدی ماه سپتامبر استان گلستان ۱۵۳ کیلووات بر مترمربع در ماه است و از ۱۴۳ کیلووات بر مترمربع در ماه در نواحی کوهستانی جنگلی تا ۱۶۷ کیلووات بر مترمربع در ماه در ارتفاعات جنوب غرب

تصادفی بودن آنها در سطح ۹۵ درصد پذیرفتنی است. همچنین مقایسه داده‌های اندازه‌گیری زمینی تابش ایستگاه‌های استان با داده‌های تابش خورشیدی GEOS-5 و ERA5 نشان می‌دهد از نظر شاخص‌های خطای MAE، MBE و RMSE، به‌طور کلی خطای GEOS-5 در برآورد تابش ماهانه ایستگاه‌های استان کمتر از ERA5 است. میانگین ضریب تعیین ERA5 و GEOS-5 در برآورد تابش ماهانه ایستگاه‌های استان به ترتیب برابر با ۰/۹۹۵ و ۰/۹۸۸ است که مقادیر بسیار خوبی هستند؛ بنابراین طبق شاخص‌های خطای مورد بررسی، دقت ERA5 و GEOS-5 برای برآورد تابش ایستگاه‌های استان گلستان مناسب و پذیرفتنی است. همچنین نتایج مقایسه میانگین ماهانه تابش ERA5 و GEOS-5 با داده‌های اندازه‌گیری زمینی با استفاده از آزمون T نشان می‌دهد اختلاف معنی‌داری در داده‌های ایستگاه‌های مورد بررسی وجود ندارد. به‌طور کلی هر دو خروجی برای برآورد تابش خورشیدی در استان مناسب هستند و دقت برآورد تابش استان در سطح اعتماد ۹۵ درصد تأیید می‌شود؛ بنابراین می‌توان از داده‌های ERA5 و GEOS-5 برای نقاط فاقد ایستگاه استفاده کرد. پس از اطمینان از صحت داده‌های مورد استفاده، با تلفیق داده‌های اندازه‌گیری زمینی و GEOS-5 و ERA5 نقشه‌های پهنه‌بندی تابش کل خورشیدی دریافتی در استان گلستان به‌صورت ماهانه و سالانه ترسیم و تهیه شد.

پهنه‌بندی تابش خورشیدی سالانه استان گلستان حاکیست دامنه نوسان تابش سالانه، از ۱۰۸۹ کیلووات بر مترمربع در سال در نواحی کوهستانی جنگلی تا ۱۸۰۰ کیلووات بر مترمربع در سال در ارتفاعات جنوب غرب استان گلستان متغیر است و میانگین مجموع تابش سالانه استان، ۱۴۸۵ کیلووات بر مترمربع در سال است. منطقه بیشینه تابش سالانه، در ارتفاعات جنوب غرب استان واقع

در سال در بیش از دوسوم مساحت کشور و میانگین تابش ۴/۵ تا ۵/۵ کیلووات بر مترمربع در روز یکی از کشورهای است که پتانسیل زیادی در زمینه انرژی خورشیدی دارد. استان گلستان دشت‌های وسیعی دارد. میانگین ساعات آفتابی سالانه ایستگاه‌های همدیدی استان ۲۳۹۲ ساعت (۶/۶ ساعت آفتابی در روز) است. بیشترین ساعت آفتابی سالانه مربوط به مراوه‌تپه به میزان ۲۷۳۱/۵ ساعت و کمترین آن مربوط به علی‌آباد به میزان ۲۱۴۵/۱ ساعت است. میانگین تعداد روزهایی که بیش از ۱۰ ساعت آفتابی در روز در استان دارند، ۹۲/۴ روز است که بیشترین آن مربوط به مراوه‌تپه و اینچه‌برون به ترتیب برابر با ۱۲۲ و ۱۱۷ روز در سال است. بیشترین ساعت آفتابی ماهانه ایستگاه‌های استان گلستان مربوط به ماه اوت با میانگین ۲۷۶ ساعت و کمترین آن مربوط به ماه فوریه با میانگین ۱۳۳/۸ ساعت است.

با توجه به اینکه تاکنون پژوهشی درباره تابش دریافتی در مکان‌های مختلف استان گلستان انجام نشده است، در این پژوهش با به‌کارگیری داده‌های تابش و ساعات آفتابی ایستگاه‌های دیده‌بانی و استفاده از داده‌های تابش خورشیدی GEOS-5 و ERA5 برای مناطقی که پوشش ماهواره‌ای ندارند یا برای پر کردن خلاءهای زمانی هنگام استفاده از داده‌های ایستگاه‌های تابش‌سنجی و تصاویر ماهواره‌ای، پتانسیل‌سنجی استفاده از انرژی نو و تجدیدپذیر خورشیدی در استان گلستان انجام، نقشه‌های اطلس انرژی خورشیدی تهیه و در نتیجه، امکان جستجوی مختصات مکانی مناسب برای نیروگاه خورشیدی در نقاط مختلف استان فراهم شده است.

در بخش روش کار، خلاءهای آماری داده‌های شدت تابش و ساعت آفتابی ایستگاه‌های هواشناسی در استان گلستان که در دوره ۲۰۱۴ تا ۲۰۲۰ هستند، با استفاده از روش نسبت‌ها تکمیل شده است. برای آزمون همگنی داده‌ها نیز از روش RUN-TEST استفاده شده که

جدول ۱۰. مشخصات پهنه‌بندی تابش خورشیدی ماهانه در استان گلستان.

نام ماه	میانگین تابش خورشیدی ماهانه (kW/m ² /month)	کمینه تابش خورشیدی ماهانه (kW/m ² /month) منطقه رخداده: استان گلستان	بیشینه تابش خورشیدی ماهانه (kW/m ² /month) منطقه رخداده: استان گلستان
ژانویه	۷۳	۵۰ نواحی کوهستانی جنگلی (علی‌آباد کتول، آزادشهر و مینودشت)	۹۵ ارتفاعات جنوب غرب (چمن‌ساور)
فوریه	۸۵	۵۵ نواحی کوهستانی جنگلی (مینودشت و آزادشهر)	۱۱۸ ارتفاعات جنوب غرب (حاجی‌آباد و چمن‌ساور)
مارس	۱۱۰	۱۰۰ نواحی کوهستانی جنگلی (کردکوی تا مینودشت)	۱۲۸ ارتفاعات جنوب غرب (حاجی‌آباد و چمن‌ساور)
آوریل	۱۴۰	۱۲۳ نواحی کوهستانی جنگلی	۱۶۰ ارتفاعات جنوب (گلیداغ، پارک ملی، خوش‌بیلاق، حاجی‌آباد و چمن‌ساور)
مه	۱۸۶	۱۶۰ نواحی کوهستانی جنگلی	۲۱۵ ارتفاعات جنوب غرب
ژوئن	۲۰۲	۱۸۰ نواحی کوهستانی جنگلی	۲۳۳ ارتفاعات جنوب
ژوئیه	۲۰۱	۱۷۸ نواحی کوهستانی جنگلی	۲۳۰ ارتفاعات جنوب
اوت	۱۹۱	۱۶۳ نواحی کوهستانی جنگلی	۲۲۲ ارتفاعات جنوب غرب و شمال شرق
سپتامبر	۱۵۳	۱۴۳ نواحی کوهستانی جنگلی	۱۶۷ ارتفاعات جنوب غرب
اکتبر	۱۱۴	۱۰۱ نواحی کوهستانی جنگلی	۱۳۴ ارتفاعات جنوب (چمن‌ساور، خوش‌بیلاق، دوزین و پارک ملی)
نوامبر	۷۴	۵۲ نواحی کوهستانی جنگلی	۹۶ ارتفاعات جنوب غرب
دسامبر	۶۵	۴۸ نواحی کوهستانی جنگلی (علی‌آباد تا مینودشت)	۹۳ ارتفاعات جنوب غرب

است و آب‌وهوای خشک و سرد کوهستانی دارد. همچنین تابش سالانه در مناطق شمال شرق استان گلستان

به علت آب‌وهوای نیمه‌خشک و بهره بردن از ساعات آفتابی سالانه زیاد، ۱۵۰۰ تا ۱۶۰۰ کیلووات بر مترمربع در

سال است.

نقشه هم‌پوشانی تابش دریافتی استان با کوهساری استان گلستان نشان‌دهنده کیفیت مناسب پهنه‌بندی در استان گلستان است. نتایج این هم‌پوشانی بیانگر کمینه تابش سالانه دریافتی در مناطق جنگلی و مرطوب استان و بیشینه تابش سالانه دریافتی در مناطق خشک و کم‌باران است؛ بنابراین مناطق شمال شرق و جنوب غرب استان گلستان پتانسیل مناسبی جهت بهره‌برداری از انرژی خورشیدی دارند. در پژوهش‌های آینده می‌توان از منابع اطلاعات داده‌های دیگر نیز استفاده و با بهره‌گیری از شاخص‌های آماری مختلف، نتایج را با هم مقایسه کرد.

منابع

اسفندیاری، ع.، ۱۳۹۰، پتانسیل سنجی احداث نیروگاه‌های خورشیدی با بررسی پارامترهای اقلیمی در استان خوزستان با استفاده از GIS: همایش ملی ژئوماتیک، تهران.

تاتاری، م.، کوچکی، ع. ر.، نصیری محلاتی، م.، ۱۳۸۸، پیش‌بینی عملکرد گندم دیم در استان خراسان با استفاده از داده‌های بارندگی و خاک با بکارگیری انواع مدل‌های رگرسیونی: مجله پژوهش‌های زراعی ایران، ۷(۲)، ۳۶۵-۳۵۷. حجازی‌زاده، ز.، کربلایی درئی، ع.، کربلایی، م.، ۱۳۹۷، برآورد تابش خورشیدی دریافتی سطح زمین در استان اصفهان با مدل برد و هول استورم: نشریه جغرافیا و توسعه، ۱۶(۵۱)، ۱۵۹-۱۷۴.

حیدری، م.، ۱۳۸۶، مکان‌یابی ساخت نیروگاه‌های خورشیدی در ایران: ماهنامه نفت و انرژی، ۲(۱۷)، ۳۸-۴۹.

خوش‌اخلاق، ف.، ۱۳۸۶، مکان‌یابی نیروگاه خورشیدی با توجه به پارامترهای اقلیمی: نشریه سپهر، ۷۵-۸۰. درخشی، ج.، ۱۳۸۹، برآورد و پهنه‌بندی تابش خورشیدی

در سطح افقی با استفاده از پارامترهای اقلیمی در محیط GIS، مطالعه موردی: استان آذربایجان شرقی، پایان‌نامه کارشناسی ارشد جغرافیا، دانشگاه سیستان و بلوچستان.

سبزی‌پرور، ع. ا.، ختار، ب.، محب‌زاده، ح.، ۱۳۹۴، بررسی و مقایسه توانایی GIS در پهنه‌بندی توزیع فصلی و سالانه تابش خورشیدی کل (بررسی موردی: استان‌های مرکزی ایران): مجله ژئوفیزیک ایران، ۲۹(۲)، ۱۴-۲۹.

غلام‌نیا، ا.، مبین، م. ح.، جباللی، ع.، علیپور، ح.، ۱۳۹۵، مدل‌سازی و پهنه‌بندی انرژی خورشیدی دریافتی در سطح زمین در مناطق خشک و نیمه‌خشک مرکزی ایران: نشریه آب و خاک، ۳(۴)، ۱۲۹۴-۱۳۰۸.

فتح‌نیا، ا.، رجایی، س.، ۱۳۹۴، برآورد اثر پارامترهای هواشناسی با تأکید بر تغییرات رطوبت نسبی بر کاهش تابش دریافتی سطح زمین به منظور ایجاد سایت خورشیدی: مجله فیزیک زمین و فضا، ۳، ۴۸۷-۴۹۷.

فرجی‌مهیاری، خ.، خانعلی، م.، فرجی‌مهیاری، ز.، ۱۳۹۴، ارزیابی مدل‌های تجربی برآورد تابش خورشیدی روزانه بر پایه دمای هوا در چهار منطقه آب و هوایی ایران: فصلنامه انرژی ایران، ۱۸(۴)، ۱۷-۲۶.

لطفی، ح.، ۱۳۹۰، برآورد تابش خالص خورشیدی با کاربرد داده‌های سنجنده MODIS: پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه شیراز.

مجرد، ف.، فتح‌نیا، ا.، رجایی، س.، ۱۳۹۴، برآورد تابش خورشیدی دریافتی سطح زمین در استان کرمانشاه: مطالعات جغرافیایی مناطق خشک، ۱۹، ۵۵-۶۹.

معینی، س.، جوادی، ش.، کوکبی، م.، دهقان‌منشادی، م.، ۱۳۸۹، برآورد تابش خورشیدی در ایران با استفاده از یک مدل بهینه: نشریه انرژی ایران، ۱۳(۲)، ۱-۱۰.

- Space Flight Center, Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC),
Accessed: 10.5067/Aura/OMI/DATA2031.
- Mazorra Aguiar, L., Polo, J., Vindel, J.M.M., and Oliver, A., 2019, Analysis of satellite derived solar irradiance in islands with site adaptation techniques for improving the uncertainty: *Renew Energy*, **135**, 98–107, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.11>.
- Polo, J., and Estalayo, G., 2015, Impact of atmospheric aerosol loads on concentrating solar power production in arid-desert sites: *Solar Energy*, **115**, 621–631, <https://doi.org/10.1016/j.solener.2015.03.031>.
- Polo, J., Fernández-Peruchena, C., Salamalikis, V., et al., 2020, Benchmarking on improvement and site-adaptation techniques for modeled solar radiation datasets: *Solar Energy*, **201**, 469–479, <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.03.040>.
- Polo, J., Wilbert, S., Ruiz-Arias, J. A., et al., 2016, Preliminary survey on site-adaptation techniques for satellite-derived and reanalysis solar radiation datasets: *Solar Energy*, **132**, 25–37, <https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.03.001>.
- Ramachandra, T. V., 2007, Solar energy potential assessment using GIS: *Energy Education Science and Technology*, **18**(2), 101-114.
- Rinaldy, M., Losavio, N., and Flagella, Z., 2003, Evaluation of OILCROP-SUN model for sunflower in southern Italy: *Agricultural systems*, **78**: 17-30.
- Ruiz-Arias, J. A., Gueymard, C. A., Santos-Alamillos, F. J., and Pozo-Vázquez, D., 2015, Do spaceborne aerosol observations limit the accuracy of modeled surface solar irradiance?: *Geophysical Research Letters*, **42**(2), 605–612, <https://doi.org/10.1002/2014GL062309>.
- Sianturi, Y., Marjuki, K., and Sartika, K., 2020, Evaluation of ERA5 and MERRA2 reanalyses to estimate solar irradiance using ground observations over Indonesia region: *Proceedings of the International Energy Conference ASTEchnova 2019*, Yogyakarta, Indonesia, 6 April 2020.
- 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
- موقری، ع.، خسروی، م.، ۱۳۹۳، محاسبه، ارزیابی و تحلیل توزیع مکانی شاخص پرتو فرابنفش در گستره ایران: نشریه تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی، **۱۴**(۳۴).
- موقری، ع.، طاوسی. ط.، ۱۳۹۲، امکان‌سنجی و پهنه‌بندی مکان‌های مستعد جهت استقرار پنل‌های خورشیدی با تکیه بر فراسنج‌های اقلیمی در استان سیستان و بلوچستان: *مجله پژوهش‌های برنامه‌ریزی و سیاست‌گذاری انرژی*، **۱**(۱)، ۹۹–۱۱۴.
- مومن‌زاده، ز.، کلانتری، س.، تازه، م.، تقی‌زاده مهرجردی، ر.، ۱۳۹۹، پهنه‌بندی و مکان‌یابی نیروگاه‌های خورشیدی با استفاده از AHP و GIS در استان یزد: *فصلنامه علوم و تکنولوژی محیط زیست*، **۲۲**(۱۲)، ۲۵۹–۲۷۱.
- یزدان‌پناه، ح.، میرمجریان، ر.، برقی، ح.، ۱۳۸۹، برآورد تابش کلی خورشید در سطح افقی زمین در اصفهان: *مجله جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی*، **۲۱**(پیاپی ۳۷)، ۹۵–۱۰۴.
- Bunn, P. T. W., Holmgren, W. F., Leuthold, M., and Castro, C. L., 2020, Using GEOS-5 forecast products to represent aerosol optical depth in operational day-ahead solar irradiance forecasts for the southwest United States: *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, **12**(5), 053702.
- De Martonne, E., 1926, Une nouvelle fonction climatologique: L'indice d'aridité: *La Meteorologie*, 449-458.
- ECMWF, 2017, ERA5 data documentation: European Centre for Medium-range Weather Forecast (ECMWF), <https://software.ecmwf.int/wiki/display/CKB/ERA5+data+documentation>.
- Hasanpur Kashani, M., and Dinpashoh, Y., 2012, Evaluation of efficiency of different estimation methods for missing climatological data: *Journal of stochastic environment research risk assessment*, **26**, 59-71.
- Joiner, J., 2018, GEOS-5 FP-IT Assimilation Geo-located to OMI/Aura UV-2 1-Orbit L2 Support Swath 13x24km V3: NASA Goddard

- and satellite-based data: *Solar Energy*, **164**, 339–354,
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.02.059>.
- Wang, Y., Zhao, X., Mamtimin, A., Sayit, H., Abulizi, S., Maturdi, A., Yang, F., Huo, W., Zhou, C., Yang, X., and Liu, X., 2021, Evaluation of reanalysis datasets for solar radiation with in-situ observations at a location over the Gobi Region of Xinjiang, China: *Remote Sensing*, **13**, 4191, <https://doi.org/10.3390/rs13214191>.

Searching suitable areas for installing solar panels in Golestan province using observation, ERA5 and GEOS-5 data

Sakineh Khansalari^{*1}, Mohammad Kordjazi², Osman Majidi³, Abdoljabbar Mollaarazi³ and Abbas Ranjbar Saadatabadi⁴

¹ Assistant Professor, Atmospheric science and Meteorological Research Center, Tehran, Iran

² M.Sc. Graduate, Deputy of Development and Forecasting of Golestan Province, Gorgan, Iran

³ M.Sc. Graduate, Golestan province Meteorological Administration, Gorgan, Iran

⁴ Associate Professor, Atmospheric science and Meteorological Research Center, Tehran, Iran

(Received: 15 May 2022, Accepted: 01 October 2022)

Summary

Due to its special geographical location, Iran has a high potential for the use of renewable energy. At present, electricity in Golestan province is supplied from Neka and Aliabad Katoul power plants, which due to the increase in population, it is necessary to build new power plants. In this study, the annual and monthly solar energy atlas maps were prepared using solar radiation data recorded in meteorological stations, GEOS-5, and ERA5 data to help decision-makers to locate suitable places for the establishment of solar power plants in different parts of Golestan province. In recent years, along with other kinds of data, the use of reanalysis data of numerical forecasting models has become popular, especially for those areas which are not covered by satellites and also to fill data gaps. To reach the goal of this study, statistical gaps in meteorological station data in the selected period (from 2014 to 2020) have been filled using the ratio method; then RUN-TEST method has been used to test the homogeneity of the data. To check the accuracy of data, the Absolute Error (MAE), Mean Bias Error (MBE), Mean Square Error (RMSE), and Coefficient of Determination (R^2) between actual radiation values and GEOS-5 data as well as ERA5 data were calculated. The results show that although the accuracy varies across different locations and periods in the province, in general both outputs are suitable for estimating solar radiation and the correlation coefficients in both methods are significant at 95% confidence level. Annual solar radiation zoning of Golestan province indicates the range of annual radiation varies from 1089 kW/m²/year in forested mountainous areas up to 1800 kW/m²/year in the southwestern heights where the average of total annual radiation is 1485 kW/m²/year. The region of maximum annual radiation is located in the southwestern heights of Golestan province. In this area, solar rays strike the ground more vertically than in the other parts of the province, and also it has a semi-arid and cold mountainous climate. Moreover, the northeastern region of Golestan province has suitable annual solar radiation (1500 to 1600 kW/m²) due to its semi-arid climate and the high annual sunshine hours. The overlap map of the received radiation of Golestan province with its topography shows the appropriate quality of zoning in this area. The results of this overlap map indicate that the annual solar radiation is minimum in forested and wet areas and is maximum in semi-arid and low rainfall areas of the province. Therefore, the northeastern and southwestern regions of Golestan province have a good potential for utilizing solar energy.

Keywords: Radiation zoning, solar power plant, GEOS-5 data, ERA5 data, Golestan province

*Corresponding author:

Khansalari@yahoo.com