

برآورد و پهنه‌بندی تابش خورشیدی با استفاده از پارامترهای اقلیمی در محیط GIS (مطالعه موردی: استان خراسان)

حسن رضائی^{*۱}

۱. استادیار گروه جغرافیا، دانشگاه امام علی (ع)، تهران، ایران.

* نویسنده مسئول، Email: rezaei_hasan63@yahoo.com

تاریخ دریافت: ۲۹ مهر ۱۴۰۰

تاریخ پذیرش: ۱۱ دی ۱۴۰۲

چکیده

مقدمه: تابش خورشید رسیده به زمین به عنوان یکی از عوامل مورد نیاز برای مطالعات منابع آب، محیط زیست، کشاورزی و پوشش نباتی، معماری همساز با اقلیم، طراحی سیستم‌های استفاده از انرژی پاک و موارد متعدد دیگر، کاربرد گسترده‌ای دارد. این در تمام ایستگاه‌های هواشناسی اندازه‌گیری نمی‌شود و از این رو روش‌های تجربی زیادی برای برآورد آن با استفاده از پارامتر هواشناسی ارائه شده است.

هدف: هدف از این مطالعه برآورد میزان تابش کل رسیده به سطح افقی با استفاده از عناصر اقلیمی (کمینه و بیشینه دما، میانگین رطوبت، سرعت باد، ساعت آفتابی و تبخیر و تعرق) طی دوره ۲۰ ساله و پهنه‌بندی آن در استان‌های خراسان می‌باشد.

روش شناسی: بدست آوردن تابش خورشیدی به روش پنمن-مانتیت، لایه‌های مورد نیاز (فراسنج‌های جوی، تغییرات ارتفاع، جهت شیب) در محیط GIS ایجاد می‌شود و میزان تابش خورشیدی در سطح استان مورد محاسبه قرار گرفت.

قلمرو جغرافیایی پژوهش: داده‌های مورد نیاز این تحقیق از ۱۵ ایستگاه هواشناسی وابسته به سازمان هواشناسی واقع در استان خراسان (رضوی، جنوبی، شمالی) جمع‌آوری شده است. این داده‌ها مربوط به سال‌های ۱۹۹۹ تا ۲۰۱۹ میلادی است و شامل مقادیر روزانه بیشینه و کمینه دمای هوا، رطوبت نسبی، ساعات آفتابی و سرعت باد است.

یافته‌ها و بحث: نتایج نشان داد که کمترین مربوط به ماه ژانویه و بیشترین میزان مربوط به ماه ژوئیه می‌باشد. توزیع تابش سالانه استان از جنوب و جنوب غربی به شمال و شمال شرقی روند کاهشی دارد. دامنه تغییرات تابش سالانه استان از ۱۳۰ تا ۴۰۴ $\text{mj/m}^2/\text{day}$ می‌باشد. همچنین با توجه به مدل رگرسیون گام‌به‌گام، تابش دریافتی در منطقه مورد مطالعه بیشترین همبستگی با ساعت آفتابی و دمای بیشینه دارد.

نتیجه‌گیری: از نظر پهنه‌بندی بیشترین میزان تابش در قسمت‌های جنوب غربی، جنوب و مرکز استان اتفاق افتاده است و کمترین آن مربوط به شمال و شمال شرقی استان می‌باشد.

کلیدواژه‌ها: تابش خورشیدی، پهنه‌بندی، عناصر اقلیمی، سامانه اطلاعات جغرافیایی، خراسان.

مقدمه

امروزه عوامل بسیاری از جمله گسترش فزاینده‌ی نیاز به انرژی، محدودیت منابع فسیلی، فاجعه‌ی آلودگی زیست محیطی ناشی از سوخت مواد فسیلی، گرم شدن هوا و اثر گلخانه‌ای و بسیاری از دیگر عوامل، سبب رویکرد دوباره علم به انرژی‌های تجدیدپذیر طبیعی شده؛ با این تفاوت که پیشرفت علم و فناوری، فصلی تازه در به کارگیری و تبدیل و مهار این انرژی‌ها گشوده است (Aznar et al, 2019:362). تابش خورشید منبع اصلی انرژی سیاره زمین و عامل اصلی کنترل حیات و آب و هوا در سطح زمین به شمار می‌آید (Del Geno et al, 2019:197) و تمام پدیده‌های روی زمین که در زندگی انسان موثر هستند در قلمرو مطالعه و تحقیق علم جغرافیا قرار می‌گیرند (مرادی، ۱۳۸۵). اندازه‌گیری شدت تابش خورشیدی، اگرچه در ایران دارای سابقه نسبتاً طولانی است و لیکن به دلیل هزینه بالا، اکثر ایستگاه‌های موجود در کشور مجهز به دستگاه اندازه‌گیری نیستند، در عوض، در غالب این ایستگاه‌ها پارامتر ساعت آفتابی به طور روزانه اندازه‌گیری می‌شود (یزدان‌پناه و همکاران، ۱۳۸۸: ۹۶). از آنجا که اطلاع از شدت تابش خورشیدی رسیده به سطح نسبت به زمان ساعت آفتابی اهمیت بیشتری دارد، لذا شناسایی روش‌های تخمین شدت تابش خورشیدی رسیده به سطح، از آمار موجود (ساعت آفتابی و غیره) از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است تا بتوان رابطه‌ای برای تخمین شدت تابش خورشیدی رسیده به سطح از روی داده‌های موجود به دست آورد. تابش خورشید رسیده به زمین، یکی از پارامترهای مهم در مدل‌های بیلان انرژی، رشد گیاهان، تولید محصول و تبخیر- تفرق واقعی و پتانسیل است (Mbangiwa et al, 2019). علیرغم اهمیت این پارامتر، اندازه‌گیری آن به طور محدودی انجام می‌شود و این نقیصه نه تنها در کشورهای در حال توسعه بلکه در کشورهای توسعه یافته نیز به چشم می‌خورد (Samani et al, 2000:257). دستگاه اندازه‌گیری این پارامتر گران بوده و غالب ایستگاه‌های هواشناسی فاقد آن می‌باشند. همچنین این دستگاه به علت حساس بودن، نیاز به مراقبت‌های زیاد دارد و باید مرتباً واسنجی شود. از این رو، مدل‌های تجربی زیادی برای تخمین این پارامتر با استفاده از پارامترهای ساده هواسنجی ارائه شده است. ساعات آفتابی روزانه، بیشینه دما و کمینه دمای روزانه هوا و رطوبت نسبی پارامترهایی هستند که در اکثر مدل‌های تجربی از آنها استفاده می‌شود (رحیمی‌خوب و و همکاران، ۱۳۸۸: ۵۴). دسترسی به پارامترهای هواشناسی که به عنوان ورودی مدل‌های تابش رسیده به زمین استفاده می‌شوند (Loghmari et al, 2018)، عامل مهمی در انتخاب مدل مناسب برای هر منطقه است. طی دهه‌های گذشته، محققان زیادی معادلات تجربی مختلفی برای تخمین تابش خورشید با استفاده از سایر پارامترهای هواشناسی ارائه نمودند که می‌توان آنها را در سه گروه مبتنی بر ابرناکی (De Souza et al, 2005:1204)، ساعت آفتابی (Angstrom, 1924:122) و دما (Tang et al, 2010:467) تقسیم‌بندی نمود. پهنه‌بندی تابشی یکی از ابزارهای شناسایی بشر از ویژگی‌های نواحی اقلیمی است (Attia et al, 2019) تا بتواند با برنامه‌ریزی مناسب با استفاده از این انرژی به توسعه پایدار برسد. افزایش روز افزون تقاضای انرژی، به کارگیری تمهیداتی جهت بهره‌برداری بهینه از منبع سرشار از انرژی خورشیدی در کشورمان امری ضروری به نظر می‌رسد. برنامه‌ریزی جهت بهره‌برداری بهینه از انرژی خورشیدی، نیازمند برآورد پتانسیل آن در مناطق مختلف کشور می‌باشد. در حال حاضر بیش از ۸۱ درصد از کل انرژی مصرفی جهان و بیش از ۹۵ درصد انرژی مصرفی در ایران را سوخت‌های فسیلی تامین می‌کنند (Afsharzade et al, 2016:744). ادامه روند مصرف سوخت‌های فسیلی، علاوه بر تشدید آلودگی هوا، آب و زمین، موجب تشدید گرمایش جهانی خواهد شد (Kopittke et al, 2019:105079). بر اساس پیش بینی آژانس بین‌المللی انرژی تا سال ۲۰۲۵ مصرف انرژی کشورهای در حال توسعه ۱۰۰ درصد و شرق اروپا ۸۰ درصد افزایش خواهد یافت (خسروی و همکاران، ۱۳۹۰).

تحقیقات فراوانی در ایران و جهان به منظور برآورد تابش خورشیدی در زمینه گوناگونی صورت گرفته است که می‌توان به تعدادی از آنها اشاره نمود. الیس و همکاران (Olseth et al, 2005:476)، مدلی را برای محاسبه تابش خورشید روی توپوگرافی‌ها و پهنه‌بندی تابش خورشید ارائه کردند. سوزن و همکاران (۲۰۰۴) در مقاله‌ای، پتانسیل تابش خورشیدی در ترکیه را به وسیله شبکه‌های عصبی مصنوعی برآورد کردند. آنان در مطالعه‌ی خود از داده‌های

هواشناسی و جغرافیایی (طول و عرض جغرافیایی، ارتفاع، میانگین ساعت آفتابی و میانگین دما) ۱۷ ایستگاه ترکیه به مدت سه سال برای ورودی مدل خود بهره گرفتند. ال_صبایی و ترابیا (۲۰۰۵) در پژوهشی میزان تابش خورشید در سطح افقی را برای مصر به دست آوردند. آنان پنج نقطه از مصر که دارای شرایط اقلیمی متفاوت داشتند و سه تا از این نقاط در شمال و یکی در مرکز و پنجمی هم در جنوب مصر قرار داشت انتخاب کردند. با استفاده از مدل‌های درجه‌ی اول، دوم و سوم آنگستروم برای هر یک از نقاط، میزان تابش خورشید را برآورد کردند و به این نتیجه رسیدند که روابط دوم و سوم آنگستروم از دقت تخمین بیشتری برای مصر برخوردار نبوده، ولی رابطه‌ی اول را برای برآورد تابش خورشید پیشنهاد و آن را برای سایر نقاط مصر معرفی کردند. رامچندرا (۲۰۰۷) در پژوهشی، تحت عنوان تعیین پتانسیل انرژی خورشیدی با استفاده از GIS چنین بیان می‌کند که پتانسیل انرژی‌های تجدیدپذیر و قابلیت دسترسی به این منابع نیاز به بررسی دارد که سیستم اطلاعات جغرافیایی و سنجش از دور (RS) در مقیاس‌های مکانی و زمانی و تقاضا از منابع تجدیدپذیر و برنامه‌ریزی برای آن کمک می‌کند. وی با استفاده از GIS نقشه‌ی پتانسیل انرژی خورشید را در ایالت کارانتکا در هند برای بهره‌برداری از این انرژی تهیه کرد. ایشان ضمن تجزیه و تحلیل نقشه‌های به دست آمده، مناطق و نواحی مستعد را شناسایی و میزان تابش رسیده به آنها را به دست آورد. باتلس و همکاران (۲۰۰۸) برای برآورد تابش خورشیدی در مناطقی با توپوگرافی متفاوت (نقشه‌های جهانی جو) از روش تحلیل تابش در نرم‌افزار Arc GIS به صورت ماهانه استفاده کردند. نتایج آنها روشن ساخت که در ماه‌های تابستان نسبت به ماه‌های زمستان، نرم-افزار برآورد دقیق‌تری از تابش خورشیدی ارائه می‌کند. پیدالا و همکاران (۲۰۰۸) برآورد تابش خورشیدی از مدل‌های توسعه یافته توزیعی Arc GIS و مدل رقمی زمین استفاده کردند. نتایج آنها مقدار ضریب همبستگی ۰/۷۸ را بین مقادیر اندازه‌گیری شده و مقادیر برآورد شده با مدل نشان داد. مارتینز و همکاران (۲۰۰۹) به منظور برآورد تابش روزانه خورشیدی در مناطقی با توپوگرافی متفاوت از مدل رقمی زمین و تصاویر ماهواره‌ای استفاده کردند، نتایج آنها مقادیر کم آماره‌های خطاسنجی MBE و RMSE را برای مقادیر برآورد شده نشان داد. گاستلی و چرابی (۲۰۱۰) برای اندازه‌گیری تابش خورشیدی در عمان از روش تحلیل تابش در نرم‌افزار Arc GIS استفاده کردند. نتایج آنها توان زیاد انرژی خورشیدی را در بیشتر مناطق عمان در طول یک سال نشان داد. به منظور برآورد تابش خورشیدی، بوش و همکاران (۲۰۱۰) از ترکیب روش رقمی زمین و تصاویر ماهواره‌ای استفاده کردند. نتایج آنها مقدار ریشه مربع میانگین خطا و میانگین خطای ارببی به ترتیب ۱۰ درصد و ۲ درصد را نشان داد. دورگا و همکاران (۲۰۱۹) در پژوهشی با عنوان، تکنیک مدل‌سازی مبتنی بر GIS چند معیاره برای شناسایی سایت‌های بالقوه مزرعه خورشیدی را بررسی کردند که در این پژوهش پارامترهای از قبیل شبکه جاده، ارتفاع، شیب و پارامترهای اقلیمی شامل مدت زمان تابش خورشیدی، دمای هوا و رطوبت نسبی، تابش خورشیدی جهانی، و تابش خورشیدی تاثیرگذار می‌باشد.

در یک مطالعه مروری باعنوان، پهنه‌بندی تابش خورشیدی مبتنی بر GIS برای ارزیابی سایت پرداختند و نتایج نشان داد که GIS برای مدیریت داده‌های مکانی مرتبط با منابع خورشیدی و شرایط مناسب سایت در مقیاس‌های مختلف مناسب است، کاربرد روش‌های مبتنی بر GIS در برنامه‌ریزی و طراحی سیستم انرژی خورشیدی می‌تواند بیشتر گسترش یابد (Choi, et al, 2019).

تانا و همکاران (۲۰۲۱) در پژوهشی با عنوان، ارزیابی تابش خورشیدی جهانی، بر اساس شاخص ابری و عامل دید آسمان به عنوان شاخص‌های بالقوه منبع انرژی خورشیدی در کشور غنا را بررسی کردند، نتایج نشان می‌دهد که دوره‌های خشک (نوامبر تا آوریل) با تشعشعات خورشیدی زیاد، ابرهای صاف و آسمان قابل مشاهده در نتیجه دماهای بالا، پوشش ابری کمتر و رطوبت نسبی کم مشخص می‌شوند، در حالی که شرایط معکوس در دوره‌های مرطوب (می تا اکتبر) مشاهده می‌شود.

گربو و همکاران (۲۰۲۲)، در پژوهشی با عنوان، رویکرد مبتنی بر GIS برای مدل‌سازی سایت‌های بالقوه انرژی خورشیدی متصل به شبکه در منطقه اتیوپی را بررسی کردند و تقریباً همه کشورها از جمله کشورهای در حال توسعه تمایل دارند از انرژی‌های تجدیدپذیر (تابش خورشیدی) به نفع بشریه عنوان انرژی پاک و سازگار با محیط زیست

استفاده کنند. نتایج نشان داد که ۱۱۲۹ کیلومتر مربع از مساحت منطقه برای توسعه مزارع خورشیدی ایده آل است. بنابراین خروجی این مطالعه برای سازمان‌های دولتی و کارآفرینان فعال در بهره‌برداری، تولید و ترویج منبع انرژی خورشیدی در منطقه مفید است.

هوپوس و رونیز (۲۰۲۳)، پهنه‌بندی تابش خورشیدی با استفاده از دمای هوا در محیط‌های گرمسیری و کوهستانی را بررسی کردند، تجزیه و تحلیل داده‌ها نشان داد که مدل هارگریوز سامانی برای منطقه اقیانوس آرام بهتر است، در حالی که مدل لجستیک برای مناطق آمازون بهتر است. علاوه بر این، روش کریجینگ معمولی بهترین تکنیک درون‌یابی است، زیرا سوگیری کمتری را ارائه می‌دهد.

زاهدی و همکاران (۲۰۲۳) به ارزیابی پتانسیل انرژی خورشیدی برای تولید برق در سواحل جنوب شرقی ایران پرداختند، در این پژوهش از داده‌های جغرافیایی تابش خورشیدی ایران برای تخمین توان انرژی الکتریکی از معیارهای محدودکننده فضایی برای امکان‌سنجی نصب پنل‌های فتوولتائیک در مقیاس نیروگاه استفاده شد. در نهایت، توان کل برق قابل استحصال از نقاط مناسب منطقه محاسبه شد، نتایج نشان داد که ۳۷/۵ درصد از مساحت مکران به عنوان مزارع خورشیدی با راندمان تبدیل ۱۵ درصد و ضریب مساحت ۷۰ درصد، قابل بهره‌برداری است. تولید برق سالانه برای منطقه قابل بهره‌برداری تقریباً ۱۷۲۰۰ گیگاوات ساعت است که می‌تواند موتور محرکه‌ای برای توسعه صنعتی، اقتصادی و اجتماعی منطقه مکران باشد.

در داخل کشور، صمیمی (۱۹۹۴)، با استفاده از یک اصول کلی مدلی را برای پیش‌بینی تابش خورشید در شهرهای ایران بر حسب ارتفاع ارائه داد. مقادیر پیش‌بینی شده در این مدل برازش خوبی با داده‌های اندازه‌گیری شده در یک دوره ۱۷ ساله در تهران و همچنین با دوره‌های کوتاه مدت سایر شهرها نشان داد. حیدری‌نبی و همکاران (۱۳۸۶)، در پژوهشی به بررسی برخی از مدل‌های یک یا چند متغیره آماری مبتنی بر نظریه همبستگی و قابلیت شبکه‌های عصبی مصنوعی در برآورد تابش روزانه خورشید پرداخته و به این نتیجه رسیدند که در بین هشت مدل مورد بررسی در مناطق مختلف، شبکه‌های عصبی مصنوعی در ردیف سه روش دارای کمترین خطا در برآورد قرار دارد. ابراهیم پور و همکاران (۱۳۸۸) در یک پژوهشی میزان تابش کلی را با روش‌های مختلف و یک روش پیشنهادی جدید مورد بررسی قرار دادند و نتایج حاصل از محاسبات انجام شده توسط این روش‌ها با داده‌های ماهانه و روزانه اندازه‌گیری شده توسط سازمان هواشناسی کشور برای شهرهای منتخب ایران مقایسه و به این نتیجه رسیدند، نتایج روزانه روش جدید به نتایج اندازه‌گیری شده بسیار نزدیکتر بوده و نتایج را با دقت بیشتری ارائه می‌کند. علیزاده و خلیلی (۱۳۸۸) معادله آنگسترم _ پرسکات که یکی از متداول‌ترین روش‌های تخمین تابش واقعی خورشید است، برای منطقه مشهد واسنجی و اعتبارسنجی کرده و ضرایب این معادله را با روش بهینه‌سازی حداقل مربعات خطا تعیین نمودند. همچنین یک رابطه رگرسیونی چند متغیره با در نظر گرفتن پارامترهای هواشناسی شامل ساعات آفتابی، دمای کمینه و بیشینه، میانگین درصد رطوبت نسبی و برای برآورد تابش منطقه مشهد به کار گرفتند و به این نتیجه رسیدند که معادله چند متغیره نسبت به رابطه آنگسترم _ پرسکات کمی از دقت بالاتر برخوردار است. خسروی و همکاران (۱۳۹۲)، برآورد و پهنه‌بندی تابش خورشیدی دریافتی در سطح افقی با استفاده از پارامترهای اقلیمی در محیط GIS در استان آذربایجان شرقی را بررسی کردند و نتایج نشان داد که کمترین میزان تابش مربوط به ماه ژانویه و بیشترین میزان آن مربوط به ماه ژوئن می‌باشد. توزیع تابش سالانه استان از جنوب غربی به شمال و شمال شرقی روند کاهشی نشان می‌دهد. میانگین تابش سالانه در استان، ۴۲۴۴ وات بر متر مربع در روز برآورد گردید. دامنه تغییرات تابش سالانه استان ۴۴۳ وات بر متر مربع در روز و ضریب تغییر پذیری مکانی آن ۲ درصد می‌باشد. قیصری و بیات‌ورکشی (۱۳۹۵)، به بررسی پارامترهای هواشناسی مؤثر در برآورد تابش خورشیدی پرداختند. در این مطالعه با استفاده از پارامترهای اقلیمی (کمینه دما، بیشینه دما، دمای میانگین، سرعت باد، رطوبت نسبی، بارندگی و ساعت آفتابی) به برآورد تابش کل رسیده به زمین در شهرهای ارومیه و بندر عباس طی سال‌های ۱۹۸۵ تا ۲۰۰۵ پرداخته شد. چنانچه در این تحقیق بیشترین همبستگی در ایستگاه ارومیه با ساعت آفتابی است که مقدار آن برابر است با ۰/۴۹۹ و برای ایستگاه بندرعباس با دمای بیشینه

است که مقدار آن ۰/۴۵۶ می‌باشد. مومن‌زاده و همکاران (۱۳۹۹) پهنه‌بندی و مکانیابی نیروگاه‌های خورشیدی با استفاده از AHP و GIS در استان یزد را بررسی کردند و نتایج نشان داد که ساعات آفتابی سالانه، مهمترین فراسنج اقلیمی است که میزان انرژی دریافتی از خورشید را نشان می‌دهد. بهترین مکان برای بهره‌برداری از انرژی خورشیدی شهرستان رباط‌پشت‌بادام، مهریز، میبد و مروست در اولویت اول و پس از آن شهرستان یزد در اولویت دوم، شهرستان ابرکوه و هرات در اولویت سوم تشخیص داده شدند. در نهایت مشخص شد که از لحاظ استقرار نیروگاه خورشیدی ۱۳/۶۳ درصد از مساحت استان در محدوده بسیار مطلوب، ۲۳/۰۶ درصد در محدوده مطلوب، ۳۶/۷۸ درصد در محدوده متوسط، ۲۶/۵۳ درصد در محدوده نامطلوب قرار دارد. جهان‌تیغ و پیری (۱۴۰۲) در پژوهشی با عنوان، تخمین میزان تابش خورشیدی در اقلیم‌های مختلف ایران با استفاده از روش‌های هیبریدی یادگیری ماشین پرداختند، نتایج نشان داد که روش ماشین بردار رگرسیونی به عنوان یکی از روش‌های هیبریدی، کارآمدی برای تخمین تابش خورشیدی را با توجه به ضریب همبستگی دارا می‌باشد.

در این پژوهش سعی بر برآورد و پهنه‌بندی انرژی تابش کل خورشیدی رسیده به سطح افقی با استفاده از پارامترهای اقلیمی در محیط GIS با روش IDW در گستره استان خراسان می‌باشد. هدف این تحقیق برآورد تابش افقی رسیده به سطح زمین در محدوده کل استان می‌باشد.

روش‌شناسی

مدل پنمن-مانتیت-فائو (PMF56)

این مدل ترکیبی توسط آلن و همکاران (۱۹۸۴) به شکل زیر ارائه گردید:

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \left[\frac{890}{T + 273} \right] U_2 (e_a - e_d)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)} \quad (1)$$

ET_0 : تبخیر-تعرق گیاه مرجع چمن (mm/d) که به عنوان تبخیر-تعرق از گیاه مرجع با ارتفاع فرضی ۰/۱۲ متر و یک مقاومت سطحی ثابت $70 s/m$ و آلبدو ۰/۲۳ تعریف شده است؛ R_n : تابش خالص در سطح محصول ($Mj/m^2.d$)؛ G : شار حرارتی خاک ($Mj/m^2.d$)؛ $\bar{T}$: متوسط درجه حرارت هوا؛ c : فشار بخار اشباع (kpa)؛ e_a : فشار بخار واقعی (kpa)؛ $(e_s - e_a)$: کمبود فشار بخار اشباع (kpa)؛ Δ : شیب منحنی فشار بخار در مقابل درجه حرارت (kpa/c)؛ γ : ثابت سایکرومتریک (kpa/c)؛ u_2 : سرعت باد در ارتفاع ۲ متری (m/s) (Cunha et al, 2021:7).

رگرسیون گام به گام

زمانی که تعداد عوامل ورودی مؤثر (N) بر پدیده‌ای کم باشند، می‌توان با بررسی تمام ترکیبات ممکن و مقایسه‌ی خطا در مدل‌های مختلف رگرسیونی، بهترین مدل رگرسیونی برای پیش‌بینی آن پدیده را بدست آورد. اما وقتی که تعداد پارامترهای ورودی افزایش می‌یابد ارزیابی کلیه‌ی رگرسیون‌های ممکن به حجم محاسبات زیادی نیاز دارد. بنابراین روش‌های مختلفی ایجاد شده است که صرفاً تعداد کمی از مدل‌های رگرسیون دارای زیر مجموعه‌ای از متغیرها را در یک زمان بررسی می‌کنند. این روش‌ها عموماً به روش‌های نوع گام به گام معروف هستند، روش‌های گام به گام را می‌توان در سه دسته کلی گزینش پیش‌رونده^۱ حذف پس‌رونده^۲ و رگرسیون گام به گام که ترکیبی از روش‌های پیشین است، تقسیم نمود (Abdelhafidi et al, 2021:206). در روش رگرسیون گام به گام پیش‌رونده که براساس مدل رگرسیون خطی بنا نهاده شده است، جهت قضاوت این که در هر مرحله آیا یک متغیر مستقل جدید باید به مدل افزوده شود یا خیر یک سطح انتخاب می‌کنند، که در این مطالعه سطح معنی‌داری α برابر ۰/۰۵ انتخاب شده است

¹. Food and Agriculture Organization

². Stepwise

³. Forward selection

⁴. Backward elimination

(Paulescu & Blaga, 2016:112). این روش با این فرض شروع می‌شود که هیچ متغیر مستقلی در مدل حضور ندارد و فقط عرض از مبدأ وجود دارد. اولین متغیر مستقل که برای ورود به معادله انتخاب می‌شود، آن است که بزرگ‌ترین همبستگی ساده را با متغیر وابسته Y دارد. سپس یک متغیر مستقل برای ورود به مدل برگزیده می‌شود. به بیان دیگر مدل رگرسیون ساده را برای هر یک از پارامترهای مستقل، را F برازش داده و برای هر مدل رگرسیون ساده آماری مقدار آماره F محاسبه می‌کنند. آن متغیر مستقلی که دارای F بزرگ‌تری است، برای افزودن به مدل انتخاب می‌شود. چنانچه F مربوط به این متغیر مستقل انتخاب شده از $(n-1)$ و F_{α} بزرگتر باشد، آنگاه متغیر مستقل مربوط به مدل افزوده می‌شود، در غیر این صورت افزودن این متغیر مستقل به مدل چندان مفید نخواهد بود. سرانجام مجموعه‌ای که با افزودن پارامتر مستقل دیگر در سطح α افزایش معنی‌داری در آماره F آن ایجاد نشود، به عنوان بهترین ترکیب ورودی برای مدل‌سازی انتخاب می‌گردد (Qiu et al, 2020:254).

میانمایی

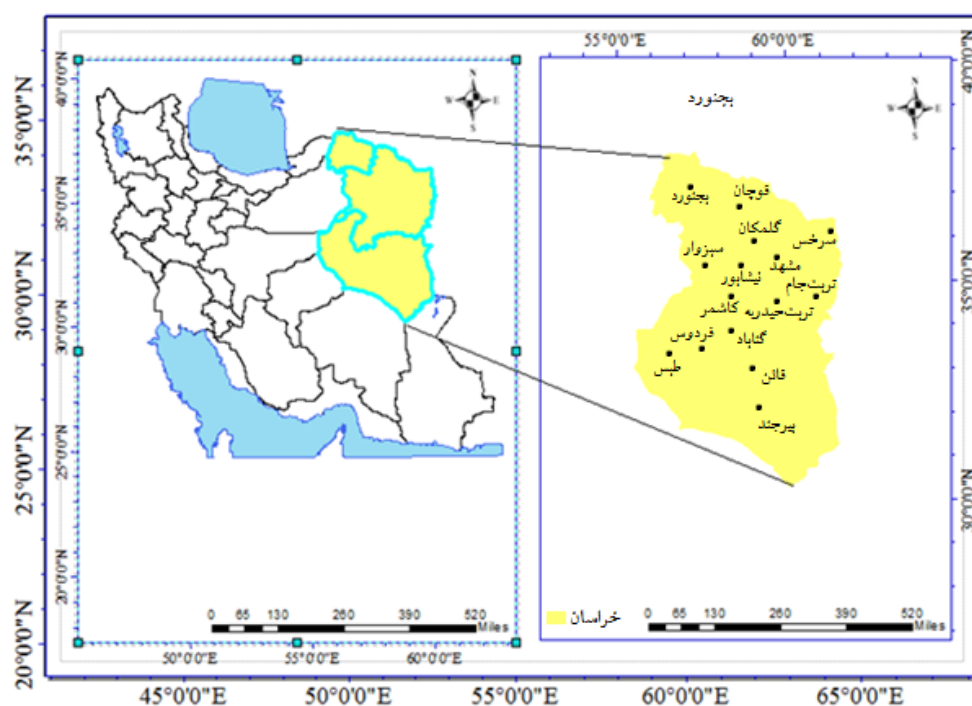
برای اجرای تحلیل عاملی روش میانمایی را انتخاب شد، زیرا داده‌های اقلیمی بر روی نقاط یا همان ایستگاه‌های هواشناسی اندازه‌گیری می‌شوند ولی غالباً نیازمند آگاهی‌های اقلیمی از یک پهنه هست. به منظور این کار نقاط یا گره‌گاه‌های مشخصی را با فواصل مناسب بر روی نقشه استان مشخص نموده تا مقدار عناصر اقلیمی را در هر نقطه برای استان اندازه‌گیری شود تا آمار بدست آمده از نقاط را پهنه‌ها تعمیم داده شود. این برآوردها که تمام پهنه را می‌پوشانند، از این پس مبنای همه داورها درباره اقلیم پهنه قرار می‌گیرد و از داده‌های ایستگاه‌ها به عنوان شاهد برای ارزیابی درجه قطعیت نتایج تحلیل استفاده می‌شود (Loghmari et al, 2018:839). در این پژوهش داده‌های نقطه‌ای فراهم شده از میانگین ماهانه عناصر اقلیمی روی ۱۵ ایستگاه هواشناسی استان خراسان طی فرایند میانمایی IDW به ماتریس‌هایی بر روی سراسر استان تبدیل شده و ماتریس اخیر داده‌های پهنه‌ای را فراهم نموده است. بر این اساس در هر مطالعه اقلیمی میانمایی یکی از گام‌های اصلی پژوهش به نظر می‌رسد که به یاری آن، شناختی را که از راه اندازه‌گیری عناصر اقلیمی بر روی نقاط (ایستگاه‌های دیده بانی هوا) به دست آورده شده را به پهنه‌های بزرگ بسط داده می‌شود تا رفتار اقلیم را در قلمرو مورد نظر کشف شود.

قلمرو جغرافیایی پژوهش

داده‌های مورد نیاز این تحقیق از ۱۵ ایستگاه هواشناسی وابسته به سازمان هواشناسی واقع در استان خراسان (رضوی، جمویی، شمالی) جمع‌آوری شده است. این داده‌ها مربوط به سال‌های ۱۹۹۹ تا ۲۰۱۹ میلادی است و شامل مقادیر روزانه بیشینه و کمینه دمای هوا، رطوبت نسبی، ساعات آفتابی و سرعت باد است. روزهایی که داده‌های ناقص داشتند، از تجزیه و تحلیل در این تحقیق حذف شدند. ارتفاعات اندازه‌گیری پارامترهای فوق ۲ متر (دمای هوا و رطوبت نسبی) و ۱۰ متر (سرعت باد) بالای سطح زمین است. برای تبدیل سرعت باد به ارتفاع ۲ متری از معادله لگاریتمی پروفیل سرعت باد استفاده شده است (۱). میانگین ماهانه مقادیر فوق برای برآورد تبخیر و تعرق گیاه مرجع به روش‌های مختلف استفاده شد. در جدول (۱) فهرست نام ایستگاه، ارتفاع از سطح دریا، متوسط روزانه کمینه و بیشینه دما، رطوبت نسبی، سرعت باد و ساعت آفتابی مشاهده شده در دوره سال‌های مورد مطالعه این تحقیق ارائه شده است. همانطور که در جدول ۱ ملاحظه می‌گردد، میانگین پارامترهای هواشناسی محل ایستگاه‌ها، تفاوت خیلی معنی‌داری ندارند. میانگین سالانه ماکزیمم و مینیمم دمای هوا از ۱۹/۴ تا ۲۶/۸ و ۶/۱ تا ۱۲/۹ درجه سانتیگراد تغییر می‌کند، که بیشترین و کمترین آن مربوط به خور می‌باشد. میانگین رطوبت نسبی از ۳۰ تا ۵۹ درصد و میانگین سرعت باد از ۱۰۹ تا ۴۲۶ کیلو متر بر روز تغییر می‌کند و بیشینه ساعت آفتابی به ترتیب مربوط به ایستگاه‌های خور (۹/۱) و بجنورد (۷/۵) می‌باشد. توزیع مکانی ایستگاه‌های مورد استفاده این تحقیق در شکل (۱) ارائه شده است (هواشناسی کشور، ۱۴۰۰).

جدول ۱. متوسط سالانه مقادیر هواشناسی ایستگاه‌های مورد استفاده در این تحقیق

ایستگاه	ارتفاع (M)	بیشینه دما (°C)	کمینه دما (°C)	رطوبت نسبی (%)	سرعت باد (KM/DAY)	ساعت آفتابی	تبخیر و تعرق	مختصات UTM	مختصات جغرافیایی (طول-عرض)
مشهد	۹۹۹/۲	۲۱/۲	۷/۳	۵۵	۱۷۸	۷/۹	۳/۸۵	زون ۴۰	۳۶°-۶۰°
گناباد	۱۰۵۶	۲۳/۹	۱۰/۹	۴۰	۱۳۱	۹	۴/۲۲	زون ۴۰	۳۴°-۵۸°
گلمکان	۱۱۷۶	۲۰/۴	۶/۷	۴۸	۲۷۲	۸	۴/۴	زون ۴۰	۳۶°-۵۱°
کاشمر	۱۱۰۹/۷	۲۳/۴	۱۲	۳۹	۱۲۸	۸/۷	۴/۱	زون ۴۰	۳۵°-۵۸°
سرخس	۲۳۵	۲۴/۸	۱۱/۲	۴۸	۱۸۱	۸	۴/۴۴	زون ۴۱	۳۶°-۶۱°
سبزوار	۹۷۲	۲۴/۳	۱۰/۷	۴۱	۲۷۹	۸/۳	۵/۴	زون ۴۰	۳۶°-۵۷°
ترت	۱۴۵۰	۲۱/۲	۸/۸	۴۷	۱۷۹	۸/۷	۴/۲	زون ۴۰	۳۴°-۵۹°
حیدریه									
ترت جام	۹۵۰/۴	۲۲/۵	۸/۸	۴۶	۳۴۱	۸/۶	۵/۵۳	زون ۴۱	۳۴°-۶۰°
نیشابور	۱۲۱۳	۲۲	۶/۸	۵۰	۱۰۹	۸/۵	۳/۵۶	زون ۴۰	۳۶°-۵۸°
قوچان	۱۲۸۷	۱۹/۴	۶/۱	۵۶	۱۵۹	۷/۷	۳/۴۸	زون ۴۰	۳۷°-۵۸°
فردوس	۱۲۹۳	۲۴/۴	۱۰/۲	۳۶	۲۰۵	۹/۱	۴/۹۷	زون ۴۰	۳۴°-۵۸°
بیرجند	۱۴۹۱	۲۴/۸	۸/۴	۳۷	۲۲۳	۸/۹	۵/۱۲	زون ۴۰	۳۲°-۵۹°
قاین	۱۴۳۲	۱۹/۸	۶/۹	۵۹	۱۹۵	۷/۵	۳/۷۲	زون ۴۰	۳۳°-۵۹°
طبس	۱۱۱۷/۴	۲۶/۸	۱۲/۹	۳۰	۴۲۶	۹/۲	۷/۶	زون ۴۰	۳۶°-۵۶°
بجنورد	۱۱۱۲	۱۹/۸	۶/۹	۵۹	۱۹۵	۷/۵	۳/۷	زون ۴۰	۳۷°-۵۹°



شکل ۱. نقشه موقعیت ایستگاه‌های هواشناسی مورد مطالعه این تحقیق در استان خراسان

یافته‌ها و بحث

با توجه به جدول ۲ نشان می‌دهد که بیشترین تابش خورشیدی استان در ماه ژولای ($404/9$) و کمترین آن مربوط به ماه ژانویه ($130/4$) می‌باشد. در مجموع ایستگاه خور دارای بیشترین تابش خورشیدی ($233/6$) و ایستگاه قوچان ($201/8$) دارای کمترین می‌باشد. با توجه به اینکه مقدار تبخیر و تعرق در این استان بیشتر از مقدار بارندگی است باید زمان آبیاری را مدیریت کرد و در ماه‌های ژولای، ژوئن و آگوست که میزان تبخیر و تعرق زیاد هست باید آبیاری در شب و اوایل صبح انجام گیرد.

جدول ۲. مقادیر تابش خورشیدی بدست آمده با روش پنمن-مانتیث ۵۶ در نرم افزار کراپ وات در ایستگاه‌های خراسان

ایستگاه	سالنامه	دسامبر	نوامبر	اکتبر	سپتامبر	آگوست	ژولای	ژوئن	می	آوریل	مارس	فوریه	ژانویه	مجموع
مشهد	۱۷/۴	۸/۱	۱۰/۵	۱۴/۹	۲۰/۸	۲۵/۴	۲۷/۱	۲۶/۸	۲۲/۹	۱۸/۱	۱۳/۸	۱۱/۲	۸/۷	۲۰۸/۳
گنایاد	۱۹	۹/۹	۱۲/۳	۱۷	۲۱/۷	۲۶/۱	۲۸/۱	۲۷/۳	۲۵/۲	۲۰/۳	۱۶/۹	۱۲/۷	۱۰/۴	۲۲۹/۲
گلمکان	۱۷/۴	۸/۲	۱۰/۵	۱۵	۲۰/۴	۲۵/۱	۲۶/۶	۲۶/۸	۲۳	۱۸/۸	۱۴	۱۱/۵	۸/۹	۲۰۱/۹
کاشمر	۱۸/۵	۹/۳	۱۱/۸	۱۶/۵	۲۱/۵	۲۵/۵	۲۷/۲	۲۶/۸	۲۴/۶	۲۰/۳	۱۵/۹	۱۲/۷	۹/۸	۲۰۸/۸
سرخس	۱۷/۵	۷/۵	۱۰/۲	۱۵/۲	۲۰/۷	۲۵/۲	۲۷/۲	۲۷/۷	۲۳/۷	۱۸/۹	۱۴/۲	۱۰/۸	۸/۲	۲۲۷/۹
سبزوار	۱۷/۸	۸/۷	۱۱/۲	۱۵/۷	۲۷/۷	۲۵	۲۶/۳	۲۶/۳	۲۳/۵	۱۹/۵	۱۵/۲	۱۱/۲	۹/۲	۲۲۱/۹
تربت ح	۱۸/۴	۹	۱۱/۷	۱۶/۲	۲۱/۵	۲۵/۸	۲۷/۴	۲۷/۲	۲۴/۳	۲۰/۱	۱۵/۵	۱۲/۵	۹/۶	۲۱۶/۴
تربت ج	۱۸/۳	۸/۷	۱۱/۴	۱۶/۴	۲۱/۷	۲۵/۴	۲۸	۲۷/۵	۲۴/۶	۱۹/۸	۱۵/۳	۱۱/۹	۹/۵	۲۲۰/۲
نیشابور	۱۸	۸/۵	۱۱/۲	۱۶	۲۱/۲	۲۵/۴	۲۷/۹	۲۶/۸	۲۳/۹	۱۹/۶	۱۵	۱۲/۱	۸/۸	۲۰۹/۵
قوچان	۱۶/۸	۷/۶	۹/۸	۱۴/۵	۱۹/۸	۲۴/۶	۲۶/۱	۲۶	۲۲/۴	۱۸/۳	۱۳/۶	۱۱	۸/۲	۲۰۱/۸
فردوس	۱۹/۱	۹/۹	۱۲/۵	۱۶/۷	۲۲/۱	۲۶	۲۷/۵	۲۷/۷	۲۴/۹	۲۱/۱	۱۶/۸	۱۳/۵	۱۰/۵	۲۲۹/۲
بیرجند	۱۹/۱	۱۰/۶	۱۲/۹	۱۷/۴	۲۱/۸	۲۵/۸	۲۷/۱	۲۶/۹	۲۴/۵	۲۰/۴	۱۶/۸	۱۳/۹	۱۱/۲	۲۲۹/۳
قاین	۱۷/۳	۶/۸	۱۰/۹	۱۵/۵	۲۰/۲	۲۴/۵	۲۵/۵	۲۵/۴	۲۲/۵	۱۸/۸	۱۴/۴	۱۲/۹	۹/۳	۲۰۶/۶
طیس	۱۹/۵	۱۰/۸	۱۳/۱	۱۷/۸	۲۲/۱	۲۵/۹	۲۷/۳	۲۷	۲۵/۱	۲۱/۳	۱۷/۶	۱۴/۲	۱۱/۴	۲۳۳/۶
بجنورد	۱۷/۳	۶/۸	۱۰/۹	۱۵/۵	۲۰/۲	۲۴/۶	۲۵/۶	۲۵/۴	۲۲/۶	۱۸/۹	۱۴/۵	۱۲/۱	۹/۵	۲۰۶/۶
مجموع	۲۷۱/۳	۱۳۰/۴	۱۷۰	۲۴۰	۳۲۳	۳۸۰/۳	۴۰۴/۹	۴۰۱/۶	۱۷	۲۹۴/۲	۱۵	۱۲	۱۲	۳۲۵۰

با توجه به جدول ۲ نشان می‌دهد که بیشترین تابش خورشیدی استان در ماه ژولای ($404/9$) و کمترین آن مربوط به ماه ژانویه ($130/4$) می‌باشد. در مجموع ایستگاه خور دارای بیشترین تابش خورشیدی ($233/6$) و ایستگاه قوچان ($201/8$) دارای کمترین می‌باشد. با توجه به اینکه مقدار تبخیر و تعرق در این استان بیشتر از مقدار بارندگی است باید زمان آبیاری را مدیریت کرد و در ماه‌های ژولای، ژوئن و آگوست که میزان تبخیر و تعرق زیاد هست باید آبیاری در شب و اوایل صبح انجام گیرد. بر اساس نتایج این آزمون در مرحله‌ی نخست ساعت آفتابی مهمترین پارامتری است که برای ورود به مدل انتخاب می‌شود. زیرا مطابق با نتایج جدول ۳ دارای بیشترین مقدار ضریب همبستگی با تابش خورشیدی به مقدار $0/98$ می‌باشد. بنابراین وقتی به مدل اضافه می‌شود مقدار ضریب تبیین $0/96$ درصد می‌باشد. در گام بعدی پارامتر دمای حداکثر با بیشترین مقدار F نسبت به سایر پارامترهای مستقل باقی مانده، به مدل اضافه شده، که باعث افزایش این ضریب به عدد $0/98$ درصد می‌شود. سپس از میان مجموعه پارامترهای باقی مانده پارامتری که می‌تواند با بیشترین مقدار F و معنی داری در سطح α برابر $0/05$ به مدل اضافه شود، دمای کمینه است که ضریب تبیین مدل را به 99 ارتقاء می‌دهد و به همین ترتیب پارامترهایی که در گام‌های بعدی می‌توانند در سطح α باعث ایجاد معناداری در مقدار آماره F شوند، پارامترهای سرعت باد و رطوبت نسبی می‌باشند، بنابراین بر اساس نتایج جدول ۳، مدل حاصل از روش رگرسیون گام به گام به روش پیشرو از تمام پارامترهای ورودی برای مدل سازی تابش استفاده

می‌نماید. نتایج گام به گام مدل‌های ایجاد شده در هر مرحله به همراه مقادیر P-Value آماره ی F و مقدار ضریب تبیین برای این آزمون در جدول ۴ ارائه شده است.

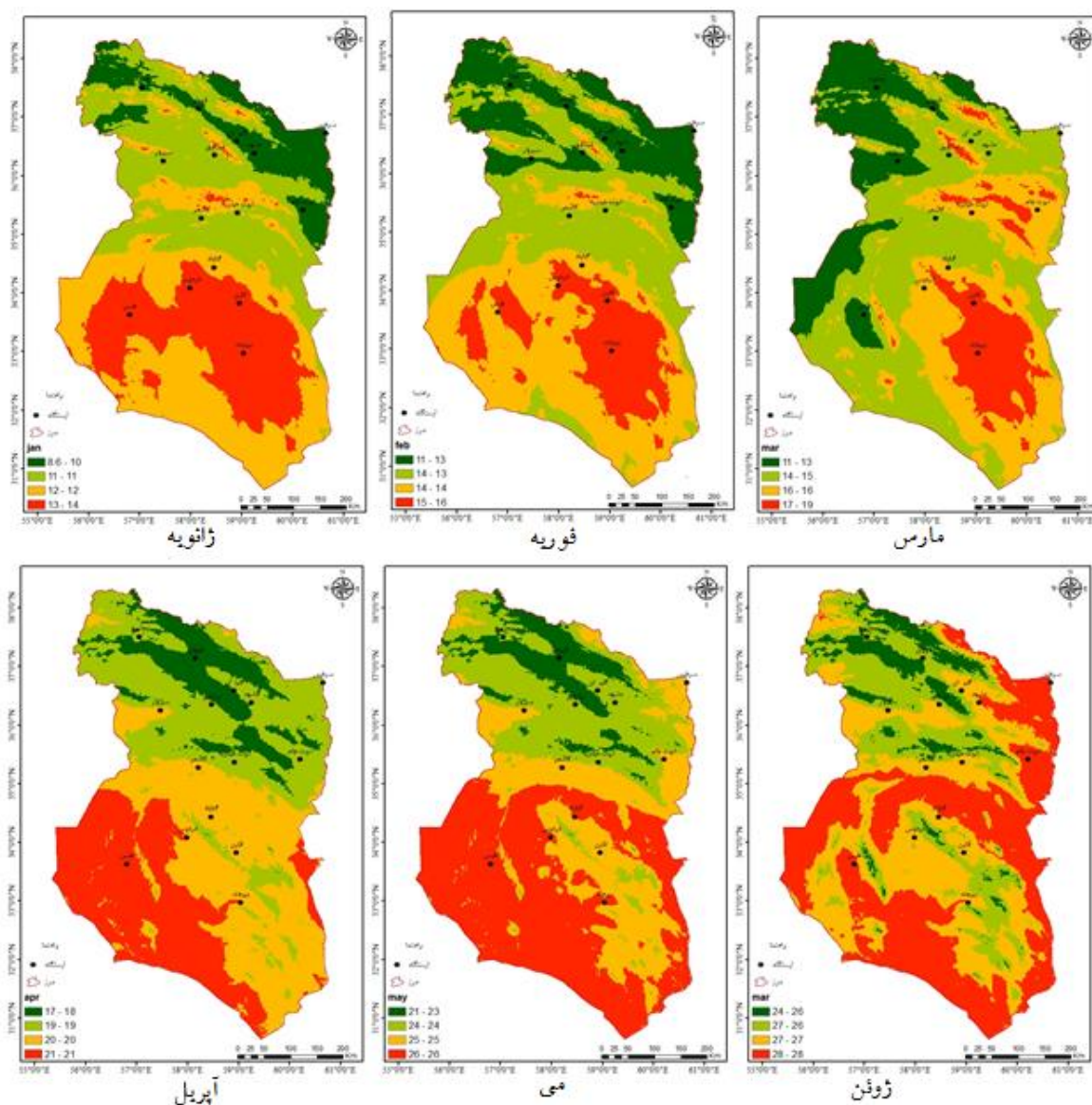
جدول ۳. میزان همبستگی تبخیر و تعرق با پارامترهای اقلیمی در ایستگاه‌های استان خراسان

همبستگی پیرسون	ساعت آفتابی	رطوبت نسبی	دمای بیشینه	دمای کمینه	سرعت باد	تابش
تابش	۰/۹۸	-۰/۹۰	۰/۹۷	۰/۹۶	۰/۹۴	۱

جدول ۴. مقادیر P-Value آماره ی F و مقدار ضریب تبیین در ایستگاه استان خراسان

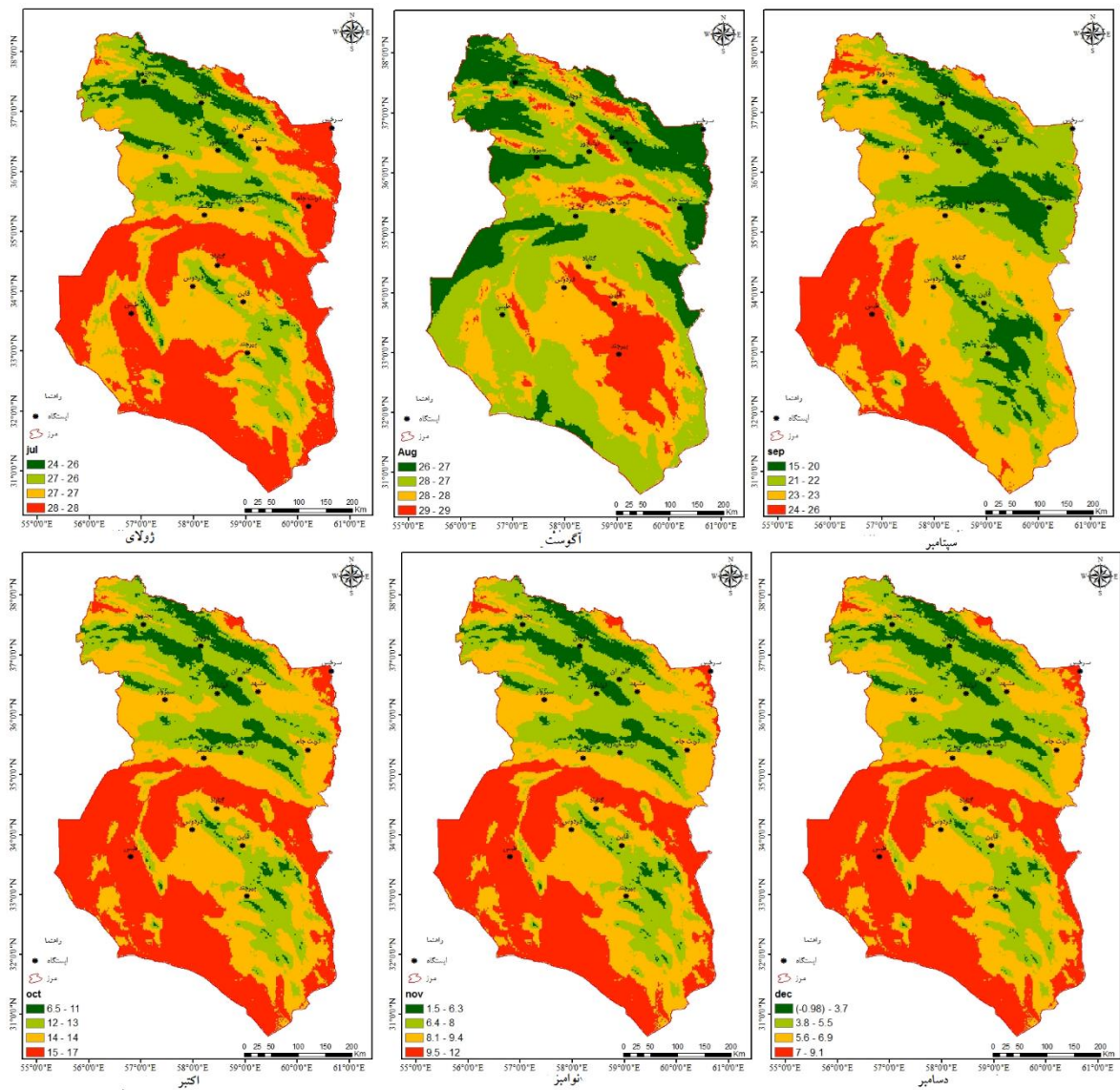
پارامتر اقلیمی	R-Square	P-Value	F	P-Value
سرعت باد	۰/۹	.۰۰۰	>۵۰	.۰۰۰
دمای کمینه	۰/۹۲	.۰۰۰	>۱۰۰	.۰۰۰
دمای بیشینه	۰/۹۴	.۰۰۰	>۱۵۰	.۰۰۰
رطوبت نسبی	۰/۸	.۰۰۱	>۵۰	.۰۰۱
ساعت آفتابی	۰/۹۶	.۰۰۰	>۳۰۰	.۰۰۰

همان‌طور که در نقشه ۲ مشاهده می‌شود، بیشترین تابش خورشیدی در ایستگاه‌های طبس، فردوس، بیرجند و قائن اتفاق افتاده و کمترین میزان تابش خورشیدی مربوط به ایستگاه‌های بجنورد، قوچان، گل‌مکان، تربت جام و سرخس می‌باشد. در ماه فوریه میزان تابش خورشیدی طبس، بیرجند و فردوس در بازه ۱۶-۱۵ مگاژول بر مجذور ثانیه در روز می‌باشد و تابش خورشیدی بین ۱۴-۱۳ در ایستگاه‌های تربت حیدریه، کاشمر، گناباد، مرزهای جنوبی و جنوب غربی و مرکز استان قرار دارند. در شکل ۳-۲ بیشترین میزان تابش خورشیدی در بیرجند و قائن (۱۹-۱۷) اتفاق افتاده است. میزان تابش خورشیدی ماه آوریل و می را نشان می‌دهد که مقدار تابش خورشیدی از مرکز به سمت جنوب بیشتر از مرکز به سمت شمال می‌باشد. میزان تابش خورشیدی ماه ژوئن بین ۲۹ تا ۲۴ مگاژول بر مجذور ثانیه در روز می‌باشد و میزان تابش خورشیدی مرزهای شرقی و جنوبی بیشتر از بقیه ایستگاه‌های استان می‌باشد.



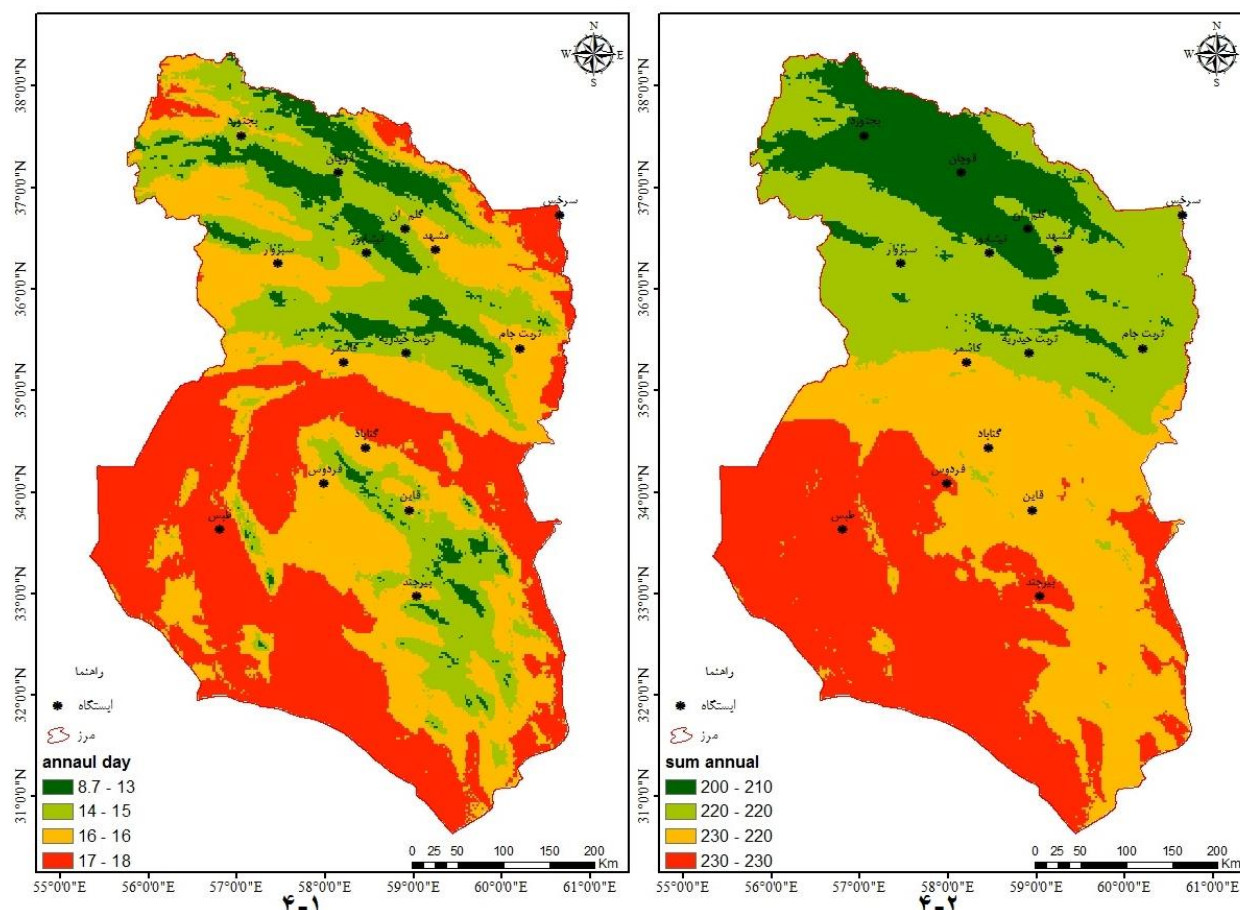
شکل ۲. پهنه‌بندی تابش خورشیدی خراسان بزرگ در شش ماهه اول سال میلادی (از ژانویه تا ژوئن).

در ماه ژوئای میزان تابش خورشیدی بیشتر استان در بازه بین ۲۶ تا ۲۸ مگاژول بر مجذور ثانیه در روز می‌باشد و تنها رشته کوه‌های استان (بینالود، هزار مسجد، آلاداغ و کوه‌های شمال تربت حیدریه) دارای تابش کمتری نسبت به بقیه ایستگاه‌ها بر خوردار می‌باشند. در ماه آگوست بیشترین میزان تابش خورشیدی در بازه ۲۶-۲۹ مگاژول بر مجذور ثانیه در روز می‌باشد که بیرجند و بجنورد به ترتیب بازه بالا و پائین را شامل می‌شوند. در ماه سپتامبر مقدار تابش خورشیدی نسبت به ماه قبل کمی کاهش پیدا کرده است و طبرستان با مقدار ۲۶ مگاژول بر مجذور ثانیه در روز رکورددار تابش در سطح منطقه است. از ماه اکتبر تا دسامبر مشاهده می‌شود که میزان تابش خورشیدی از گناباد به سمت مرزهای جنوبی بیشتر از گناباد به سمت مرزهای شمالی می‌باشد (شکل ۳).



شکل ۳. مکان‌یابی تابش خورشیدی خراسان بزرگ در شش ماهه دوم سال میلادی (از ژوئیه تا دسامبر).

در شکل ۱-۴ میانگین تابش خورشیدی روزانه در هر سال را در ایستگاه‌های مختلف نشان می‌دهد که بیشترین تابش مربوط به طبس و کمترین آن مربوط به رشته کوه‌های استان است. در مجموع سالیانه (۲-۴) تابش را نشان داد که طبس بیشترین و بجنورد و قوچان دارای کمترین تابش را دارا می‌باشد.



شکل ۴. پهنه‌بندی میانگین تابش خورشیدی سالیانه (۴-۲) و روزانه (۴-۱) خراسان بزرگ

نتیجه‌گیری

بشر از دیر باز با به کارگیری انرژی‌های فراوان و در دسترس طبیعت، در پی گشودن دریچه‌ای تازه به روی خویش بود تا از این رهگذر، بتواند افزون بر آسان کردن کارها، فعالیت‌های خود را با کمترین هزینه و بالاترین سرعت به انجام رساند و گامی برای آسایش بیشتر بر دارد. نخستین انرژی به کار رفته توسط بشر، انرژی خورشید بود و تابش خورشید منبع اصلی انرژی سیاره زمین و عامل اصلی کنترل حیات و آب و هوا در سطح زمین به شمار می‌آید. در این پژوهش، اطلاعات پارامترهای اقلیمی به صورت دقیق به عنوان داده ورودی مورد نیاز جهت استخراج تابش خورشیدی با روش پنمن مانیتیت انجام شد. یافته‌های این پژوهش نشان داد که بیشترین تابش خورشیدی استان در ماه ژوئیه (۴۰۴/۹) و کمترین آن مربوط به ماه ژانویه (۱۳۰/۴) می‌باشد. تانا و همکاران (۲۰۲۱) ارزیابی تابش خورشیدی جهانی، بر اساس شاخص ابری و عامل دید آسمان به عنوان شاخص‌های بالقوه منبع انرژی خورشیدی در کشور غنا را بررسی کردند، نتایج نشان داد که دوره‌های خشک (نوامبر تا آوریل) با تشعشعات خورشیدی زیاد، ابرهای صاف و آسمان قابل مشاهده در نتیجه دماهای بالا، پوشش ابری کمتر و رطوبت نسبی کم مشخص می‌شوند، در حالی که شرایط معکوس در دوره‌های مرطوب (می تا اکتبر) مشاهده می‌شود که با نتایج مطالعه حاضر به علت تفاوت عرض جغرافیایی همخوانی ندارد.

در مجموع ایستگاه خور طبس دارای بیشترین تابش خورشیدی (۲۳۳/۶) و ایستگاه قوچان (۲۰۱/۸) دارای کمترین است. با توجه به رگرسیون گام به گام ساعات آفتابی و دمای بیشینه بیشترین ضریب هم بستگی را با تشعشع خورشیدی دارد. دورگا و همکاران (۲۰۱۹) در پژوهشی با عنوان، تکنیک مدل‌سازی مبتنی بر GIS چند معیاره برای شناسایی سایت‌های بالقوه مزرعه خورشیدی را بررسی کردند که در این پژوهش پارامترهای اقلیمی شامل ساعت

آفتابی، دمای هوا و رطوبت نسبی، تاثیرگذار می‌باشد که با نتایج تحقیق حاضر همخوانی دارد. در تحقیق دیگری قیصری و بیات ورکشی (۱۳۹۵)، به بررسی پارامترهای هواشناسی مؤثر در برآورد تابش خورشیدی پرداختند. در این مطالعه با استفاده از پارامترهای اقلیمی (کمینه دما، بیشینه دما، دمای میانگین، سرعت باد، رطوبت نسبی، بارندگی و ساعت آفتابی) به برآورد تابش کل رسیده به زمین در شهرهای ارومیه و بندر عباس طی سال‌های ۱۹۸۵ تا ۲۰۰۵ پرداخته شد و بیشترین همبستگی در ایستگاه ارومیه با ساعت آفتابی (۰/۴۹۹) و برای ایستگاه بندرعباس با دمای بیشینه (۰/۴۵۶) می‌باشد، که با نتایج تحقیق حاضر همخوانی دارد. همچنین مومن‌زاده و همکاران (۱۳۹۹) به پهنه‌بندی و مکانیابی نیروگاه‌های خورشیدی با استفاده از AHP و GIS در استان یزد را بررسی کردند و نتایج نشان داد که ساعات آفتابی سالانه، مهمترین فراسنج اقلیمی است که میزان انرژی دریافتی از خورشید را نشان می‌دهد، که با نتایج تحقیق حاضر همخوانی دارد. از نظر پهنه‌بندی بیشترین میزان تابش در قسمت‌های جنوب‌غربی، جنوب و مرکز استان اتفاق افتاده است و کمترین آن مربوط به شمال و شمال شرقی استان می‌باشد.

به‌طور کلی برنامه‌ریزی‌های مختلف در زمینه کشاورزی، آب‌شناسی، معماری و انرژی تا حد زیادی وابسته به برآورد صحیح مقدار تابش خورشیدی است. همچنین توزیع فضایی و شدت تابش خورشیدی دو عامل مهم در توسعه انرژی خورشیدی هستند. بر اساس نتایج بدست آمده پیشنهاد می‌گردد:

- مکانیابی نیروگاه‌های خورشیدی جهت بهترین مکان برای بهره‌برداری از انرژی خورشیدی استان‌های خراسان جنوبی، رضوی و شمالی؛
- ارزیابی پتانسیل انرژی خورشیدی برای تخمین توان انرژی الکتریکی برای امکان سنجی نصب پنل‌های فتوولتائیک؛
- استفاده از پهنه‌بندی تابش خورشیدی دریافتی جهت معماری در استان‌های خراسان رضوی، شمالی و جنوبی؛ و
- همچنین برای پژوهش‌های آتی پیشنهاد می‌شود، محققین جهت مطالعات تابش خورشیدی از تصاویر ماهواره‌ای و روش‌های سنجش از دور به جای تحلیل زمان بر داده‌های اقلیمی و روش‌های تجربی استفاده نمایند و با یکدیگر مقایسه و بهترین روش استخراج گردد.

منابع

- ابراهیم پور، ع؛ معرفت، م؛ نیروی، ه. (۱۳۸۸). ارائه یک رابطه جدید برای تخمین میزان تابش کل در اقلیم‌های مختلف ایران «، فصلنامه فضای جغرافیایی، ۲۵: ۲۹-۱۸.
- اداره کل هواشناسی استان خراسان (۱۴۰۰)، داده‌های ماهانه عناصر اقلیمی طی سال‌های (۲۰۱۹-۱۹۹۹).
- حیدری نبی، م. (۱۳۸۶). برآورد تابش روزانه خورشید با استفاده از متغیرهای هواشناسی (مقایسه یافته‌های شبکه‌های عصبی مصنوعی با سایر مدل‌ها)، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی آب و خاک، دانشگاه تهران.
- خسروی، م. جهانبخش اصل، س، درخشی، ج (۱۳۹۰)، برآورد و پهنه‌بندی تابش خورشیدی دریافتی در سطح افقی با استفاده از پارامترهای اقلیمی در محیط GIS در استان آذربایجان شرقی، فصلنامه فضای جغرافیایی، شماره ۱۳، صص ۶۳-۳۹.
- رحیمی خوب، ع.، س. م. ر. بهبهانی و م. جمشیدی (۱۳۸۸). "ارزیابی روش‌های آزمایشی و مدل‌های شبکه عصبی برای برآورد تابش خورشید به سطح زمین در مطالعه موردی جنوب شرقی تهران"، مجله علم و فناوری کشاورزی و منابع طبیعی، خاک و علوم آب. ۵۳: ۵۰-۶۲.
- علیزاده، ا؛ خلیلی، ن. (۱۳۸۸). تعیین ضرایب معادله آنگسترم و توسعه یک معادله رگرسیونی برآورد تابش خورشیدی (مطالعه موردی: منطقه مشهد)، مجله آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)، ۱: ۲۳۸-۲۲۹.
- قیصری، س. پ، بیات ورکشی، م. (۱۳۹۵). بررسی پارامترهای هواشناسی مؤثر در برآورد تابش خورشیدی، اولین کنفرانس بین-المللی آب، محیط‌زیست و توسعه پایدار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.
- مرادی، ا. (۱۳۸۵). تهیه اطلس تابش خورشیدی ایران با استفاده از تصاویر ماهواره Meteosat، رساله دکتری، دانشگاه تربیت معلم (خوارزمی) تهران.
- مومن زاده، ز، کلانتری، س.، تازه، مهدی. و تقی زاده مهرجردی، ر. (۱۳۹۹). پهنه‌بندی و مکانیابی نیروگاه‌های خورشیدی با استفاده از AHP و GIS در استان یزد. علوم و تکنولوژی محیط زیست، ۲۲ (۱۲): ۲۵۹-۲۷۱.

- یزدان پناه، ح.، رمجریان و ح. برقی. (۱۳۸۸). برآورد کل تابش خورشید در سطح افقی زمین در اصفهان"، *مجله جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی*، ۱۰۴: ۳۷۵-۹۵.
- Afsharzade, N., Papzan, A., Ashjaee, M., Delangizan, S., Van Passel, S., & Azadi, H. (2016). Renewable energy development in rural areas of Iran. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 65, 743-755.
- Abdelhafidi, N., Bachari, N. E. I., & Abdelhafidi, Z. (2021). Estimation of solar radiation using stepwise multiple linear regression with principal component analysis in Algeria. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 133(2), 205-216.
- Angstrom, A. (1924). "Solar and terrestrial radiation", *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 50: 121-126.
- Aznar-Díaz, I., Hinojo-Lucena, F. J., Cáceres-Reche, M. P., Trujillo-Torres, J. M., & Romero-Rodríguez, J. M. (2019). Environmental attitudes in trainee teachers in primary education. the future of biodiversity preservation and environmental pollution. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16(3), 362.
- Attia, S., Lacombe, T., Rakotondramiarana, H. T., Garde, F., & Roshan, G. (2019). Analysis tool for bioclimatic design strategies in hot humid climates. *Sustainable cities and society*, 45, 8-24.
- Batles, F. J., Bosch, J. L., Tavor-Pescador, J., Martinez-Durban, M., Ortega, R., and Miralles, I., 2008, Determination of atmospheric parameter to estimate global radiation in areas of complex topography: Generation of global irradiation map: *Energy Conversion and Management*, 49, 336-345.
- Bosch, J. L., Batlles, F. J., Zarzalejo, L. F., and Lopez, G. (2010). Solar resources estimation combining digital terrain models and satellite images techniques: *Renewable Energy*, 35, 2853-2861.
- Cunha, A. C., Gabriel Filho, L. R. A., Tanaka, A. A., Goes, B. C., & Putti, F. F. (2021). Influence of The Estimated Global Solar Radiation On the Reference Evapotranspiration Obtained Through the Penman-Monteith Fao 56 Method. *Agricultural Water Management*, 243, 106491.1-21.
- Choi, Y., Suh, J., & Kim, S. M. (2019). GIS-based solar radiation mapping, site evaluation, and potential assessment: A review. *Applied Sciences*, 9(9), 1960.
- Doorga, J. R., Rughooputh, S. D., & Boojhawon, R. (2019). Multi-criteria GIS-based modelling technique for identifying potential solar farm sites: A case study in Mauritius. *Renewable energy*, 133, 1201-1219.
- De Souza, J.L., Nicacio, R.L. and Lima Moura, M.A. (2005). "Global solar radiation measurements in Maceio, Brazil", *Agricultural water Manage.* Vol. 30, PP. 1203-1220.
- Del Genio, A. D., Way, M. J., Kiang, N. Y., Aleinov, I., Puma, M. J., & Cook, B. (2019). Climates of Warm Earth-like Planets. III. Fractional Habitability from a Water Cycle Perspective. *The Astrophysical Journal*, 887(2), 197.
- El-Sebaei, A. A. and Trabea, A. A. (2005), "Estimation of Global Solar Radiation on Horizontal Surfaces over Egypt", *Egypt. J. Solids*, 28 (1): 129-136.
- Gastli, A., and Charabi, Y. (2010). Solar electricity prospects in Oman using GIS-based solar radiation maps: *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14, 790-797.
- Gerbo, A., Suryabhagavan, K. V., & Kumar Raghuvanshi, T. (2022). GIS-based approach for modeling grid-connected solar power potential sites: a case study of East Shewa Zone, Ethiopia. *Geology, Ecology, and Landscapes*, 6(3), 159-173.
- Hoyos, L. S., & Ruiz, B. J. (2023). Mapping of solar insolation using air temperature in tropical and mountainous environments. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 135(1), 12.
- Kopittke, P. M., Menzies, N. W., Wang, P., McKenna, B. A., & Lombi, E. (2019). Soil and the intensification of agriculture for global food security. *Environment international*, 132, 105078-105085.
- Loghmani, I., Timoumi, Y., & Messadi, A. (2018). Performance comparison of two global solar radiation models for spatial interpolation purposes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 837-844.
- Martinez-Durban, M., Zarzalejo, L. F., Bosch, J. L., Rosiek, S., Polo, J., and Batlles, F. J., (2009). Estimation of global daily irradiation in complex topography zones using digital elevation models and METEOSAT images: Comparison of the results: *Energy Conversion and Management*; 50, 2233-2238.
- Mbangiwa, N. C., Savage, M. J., & Mabhaudhi, T. (2019). Modelling and measurement of water productivity and total evaporation in a dryland soybean crop. *Agricultural and Forest Meteorology*, 266, 65-72.
- Olseth, J.A, Skartveit, A. Zou, H. (1995). "Spatially continuous mapping of solar resources in a complex high latitude topography", *Solar Energy*, 55(6): 475- 485
- Paulescu, E., & Blaga, R. (2016). Regression models for hourly diffuse solar radiation. *Solar Energy*, 125, 111-124.
- Piedallu, C., and Gegout, J., (2008), Efficient assessment of topographic solar radiation to improve plant distribution models: *Agricultural and Forest Meteorology*, 148: 1696 -1706.

- Qiu, J., An, X. J., Wu, Z. G., & Li, F. F. (2020). Forecasting solar irradiation based on influencing factors determined by linear correlation and stepwise regression. *Theoretical and Applied Climatology*, 140(1), 253-269.
- Ramachandra.T. V, (2007), "Solar energy potential assessment using GIS", *Energy Education Science and Technology Volume(issue) 18(2)*: 101-114
- Sozen Adnan, Erol Arcaklio, Mehmet Ozalp, (2004), "Estimation of solar potential in Turkey by artificial neural networks using meteorological and geographical data", *Energy Conversion and Management*, 45: 3033–3052.
- Samani, Z. (2000). "Estimation solar radiation and evapotranspiration using minimum climatological data", *J. Irrig. Drain. Eng.* 126(4):65-256.
- Samimi, J. (1994). "Estimation of height-dependent solar irradiation and application to the Solar climate of Iran", *Solar Energy*, 52: 401-409.
- Tang, W., Yang, K., He, J., and Qin, J. (2010). "Quality control and estimation of global solar radiation in China", *Solar Energy*. 84:466–475.
- Tanu, M., Amponsah, W., Yahaya, B., Bessah, E., Ansah, S. O., Wemegah, C. S., & Agyare, W. A. (2021). Evaluation of global solar radiation, cloudiness index and sky view factor as potential indicators of Ghana's solar energy resource. *Scientific African*, 14, e01061.
- Zahedi, R., Sadeghitabar, E., & Ahmadi, A. (2023). Solar energy potential assessment for electricity generation in the southeastern coast of Iran. *Future Energy*, 2(1), 15-22.