



Optimal Location of Solar Collector Installation Using GIS-AHP Method in Khorasan Razavi Province

Alireza Ahmadi¹, Reza Ghaffarpour^{2*}

¹Master's student in Energy Systems, Faculty of Civil Engineering, Water and Energy, Imam Hossein Comprehensive (AS) University, Tehran, Iran. Email Address: a.ahmadi@ihu.ac.ir

²Correspondence: Assistant Professor, Department of Electrical Engineering, Imam Hossein Comprehensive (AS) University, Tehran, Iran. Email Address: rghaffarpour@ihu.ac.ir

ARTICLE INFO

Article history:

Article Type: Research paper

Received: 19 May 2025

Received in revised form: 12 July 2025

Accepted: 20 September 2025

Available online: 22 October 2025

Keywords:

Location

Solar Collectors

AHP

GIS

Khorasan Razavi

ABSTRACT

Given the increasing population growth rate, declining precipitation levels, and the escalating demand for water resources especially in arid and semi arid regions such as those found in Iran the utilization of renewable energy sources, particularly solar energy, has become essential for water purification and supply, thereby contributing to the enhancement of freshwater production rates. The objective of this study is to assess the potential of Khorasan Razavi Province in terms of key environmental criteria for the deployment of solar collectors, using remote sensing data and Geographic Information System (GIS) tools, applying the Analytical Hierarchy Process (AHP) method. In this regard, the criteria of solar radiation, temperature, and wind speed are first analyzed using ArcGIS software 10.8.2. Subsequently, the criteria are weighted based on expert judgment using the AHP technique, followed by the integration and overlay of the relevant spatial layers. The results of the AHP analysis indicated that solar radiation had the highest weight with a score of 0.533. Moreover, the integrated spatial analysis revealed that over 40% of Khorasan Razavi Province possesses suitable potential for solar collector installation. These suitable areas correspond to the counties of Torbate Jam, southern Bakharz, Zaveh, Torbate Heydariyeh, southern Kuhsorkh, Sheshtamad, Sabzevar, Bardaskan, Khalilabad, western Mahvelat, and northern Bajestan. Overall, the use of GIS in combination with the AHP weighting method has proven to be effective in identifying optimal zones for the deployment of solar powered purification systems.

Cite this article: A. Ahmadi and R. Ghaffarpour, "Optimal Location of Solar Collector Installation Using GIS-AHP Method in Khorasan Razavi Province," Journal of Passive Defence, vol. 16, no. 3, pp. 111-128, 2025. [DOR: 20.1001.1.20086849.1404.16.3.9.7](https://doi.org/10.1001.1.20086849.1404.16.3.9.7)



Publisher: Imam Hossein University.

© The Author(s).



پدافند غیرعامل



سال پانزدهم، شماره ۳، پائیز ۱۴۰۴ (سالی ۶۳): صص ۱۲۸-۱۱۱

شاپای چاپی: ۶۹۴۹-۲۰۰۸ | شاپای الکترونیکی: ۲۹۸۰-۸۰۳۰

مکان‌یابی بهینه استقرار کلکتورهای خورشیدی با استفاده از روش GIS - AHP در استان

خراسان رضوی

علیرضا احمدی^۱، رضا غفارپور^{۲*}

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد سیستم‌های انرژی، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران، ایران. رایانامه: a.ahmadi@ihu.ac.ir
^۲ استادیار، گروه مهندسی برق، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران، ایران. رایانامه: rghaffarpour@ihu.ac.ir

چکیده

با توجه به افزایش نرخ رشد جمعیت، کاهش میزان بارندگی، نیاز روزافزون جوامع انسانی به آب و نقش حیاتی آن در دنیا و به‌ویژه مناطق دارای اقلیم نیمه‌خشک و خشک در کشور، لذا استفاده از منابع انرژی‌های تجدید پذیر به‌ویژه انرژی خورشیدی در راستای تصفیه و تأمین آب و در نتیجه کمک به افزایش نرخ تولید آب شیرین امری ضروری است. هدف از این پژوهش پتانسیل‌سنجی استان خراسان رضوی از نظر معیارهای محیطی مؤثر برای استقرار کلکتورهای خورشیدی با استفاده از داده‌های دورسنجی و سامانه اطلاعات جغرافیایی GIS به روش AHP است. در این راستا ابتدا به بررسی معیارهای تابش، میزان دما، سرعت باد، با استفاده از نرم‌افزار Arc GIS 10.8.2 پرداخته می‌شود. سپس اقدام به وزن دهی معیارها بر اساس نظرات کارشناسان با استفاده از روش AHP و تلفیق و هم‌پوشانی لایه‌ها شد. نتایج AHP نشان داد که شاخص میزان تابش با مقدار ۰/۵۳۳ بالاترین امتیاز را داشت. همچنین نتایج تلفیق داده‌های مورد بررسی نشان داد که بیش از ۴۰ درصد از استان خراسان رضوی دارای پتانسیل مناسبی از نظر استقرار کلکتورهای خورشیدی است که این مناطق منطبق بر شهرستان‌های تربت‌جام، بخش جنوب باخزر، زاوه، تربت‌حیدریه، جنوب کوهسرخ، ششتمد، سبزوار، بردسکن، خلیل‌آباد، غرب مه ولات و شمال بجستان بود. به‌طور کلی استفاده از GIS و روش وزن دهی AHP برای تعیین مناطق استقرار سامانه تصفیه‌کننده‌های خورشیدی عملکرد مناسبی ارائه داده است.

مشخصات مقاله

تاریخچه مقاله:

نوع مقاله: علمی پژوهشی
دریافت: ۱۴۰۴/۰۲/۲۹
بازنگری: ۱۴۰۴/۰۴/۲۱
پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۲۹
ارائه آنلاین: ۱۴۰۴/۰۷/۳۰

کلیدواژه‌ها:

مکان‌یابی
کلکتورهای خورشیدی
AHP
GIS
خراسان رضوی

استناد: احمدی، علیرضا، غفارپور، رضا، "مکان‌یابی بهینه استقرار کلکتورهای خورشیدی با استفاده از روش GIS - AHP در استان خراسان رضوی"،

نشریه پدافند غیرعامل، دوره ۱۶، شماره ۳، صفحات ۱۲۸-۱۱۱، ۱۴۰۴. [DOR: 20.1001.1.20086849.1404.16.3.9.7](https://doi.org/10.1001.1.20086849.1404.16.3.9.7)

ناشر: دانشگاه جامع امام حسین (ع).

© نویسندگان



۱- مقدمه

یکی از بحرانی‌ترین مسائل در سراسر جهان کمبود شدید آب شیرین و دسترس بودن آب شیرین به‌ویژه در مناطق آب و هوای خشک است. این امر نگرانی‌های قرن جدید در زمینه آب شیرین و کاهش منابع آن مربوط به گرمایش جهانی، هزینه‌های کیفیت و تأمین آب شیرین را افزایش داده است [۱]. یکی از حیاتی‌ترین تهدیدات جوامع بشری و مانع توسعه پایدار، کمبود آب به دلیل رشد اقتصادی و جمعیت است و از بزرگ‌ترین چالش‌های قرن حاضر است که می‌تواند سرمنشاء بسیاری از تحولات مثبت و منفی جهان قرار گیرد [۲]. ایران به دلیل شرایط اقلیمی خاص خود، همواره با کمبود منابع آبی روبه‌رو بوده است. با افزایش تقاضای آب در بخش‌های مختلف به‌ویژه کشاورزی و تغییرات اقلیمی، نیاز به مدیریت بهتر منابع آب بیش‌ازپیش احساس می‌شود. تغییرات اقلیمی، کاهش بارش‌ها و افزایش مصرف آب در بخش کشاورزی، لزوم به‌کارگیری فناوری‌های نوین را برای مدیریت بهینه منابع آبی ضروری کرده است [۳]. بحران مربوط به تأمین آب در مناطق خشک نشان‌دهنده یک معضل پیچیده است که با تغییرات آب و هوایی، گسترش شهری و رشد جمعیت شناختی تشدید می‌شود. این مناطق که بخش قابل‌توجهی از سطح زمین را تشکیل می‌دهند، با کمبودهای حاد آب روبرو هستند که هم یکپارچگی زیست‌محیطی و هم پیشرفت اجتماعی و اقتصادی را به خطر می‌اندازد. این مشکل هم توسط پدیده‌های طبیعی و هم تأثیرات انسان‌زا هدایت می‌شود و اجرای چارچوب‌های مدیریت جامع برای تضمین استفاده پایدار و دسترسی به منابع آب را ضروری می‌کند [۴، ۵].

۱-۱- بیان مسئله

آب و انرژی از مهم‌ترین عوامل توسعه پایدار آینده محسوب می‌شوند؛ ازاین‌رو مدیریت منابع آب در مناطق خشک و نیمه‌خشک از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. ایران با قرارگیری در اقلیم‌های خشک و نیمه‌خشک، جزو کشورهای دارای تنش شدید آبی است [۲]. به‌طوری‌که حدود ۷۰ درصد از مساحت آن در این اقلیم‌ها قرار دارد [۶]. استان خراسان رضوی نیز با قرار گرفتن در رده‌های بالای جدول خشک‌سالی کشور، با بحران‌های جدی ناشی از کم‌آبی، برداشت بی‌رویه منابع زیرزمینی، شور شدن آب‌ها و خشک‌سالی‌های مکرر مواجه است [۷].

در این میان، انرژی خورشیدی به‌عنوان یکی از منابع مهم تجدیدپذیر، می‌تواند راهکاری مؤثر برای تأمین و تصفیه آب در مناطق کم‌برخوردار ارائه دهد [۸]. کلکتورهای خورشیدی با تبدیل انرژی تابشی خورشید به گرما، امکان تبخیر و تقطیر آب‌شور یا آلوده را فراهم کرده و آب شیرین تولید می‌کنند. این سامانه‌ها در دو نوع اصلی شامل کلکتورهای تخت (مناسب برای مناطق با تابش متوسط) و کلکتورهای متمرکزکننده (ویژه مناطق با تابش بالا) طراحی شده‌اند [۹]. در این راستا، فناوری GIS به‌عنوان ابزاری قدرتمند در تحلیل مکانی و مدیریت بهینه منابع انرژی تجدیدپذیر کاربرد دارد [۱۰]. GIS با تجزیه و تحلیل اطلاعات مکانی از جمله منابع آب، مناطق آلوده و شرایط جغرافیایی، می‌تواند مکان‌های مناسب برای استقرار سامانه‌های خورشیدی را شناسایی کند. گزارش‌های وزارت نیرو نشان می‌دهند که بیش از ۸۰ درصد دشت‌های خراسان رضوی در وضعیت بحرانی قرار دارند و شهرهایی مانند تایباد، خواف، زاوه و سرخس با چالش‌های مضاعف کم‌آبی، شورش‌دگی و پراکندگی جمعیت مواجه‌اند [۱۱]. در چنین شرایطی، استفاده از سامانه‌های خورشیدی غیرمتمرکز می‌تواند راهکاری عملی برای تأمین آب سالم در مناطقی باشد که فاقد زیرساخت‌های شبکه‌ای هستند. به‌ویژه در مناطق جنوبی استان که پتانسیل بالای تابش خورشیدی دارند، بهره‌برداری از انرژی خورشیدی در روستاها و مناطق دوردست امکان‌پذیر و ضروری است. البته موفقیت این طرح‌ها وابسته به مکان‌یابی دقیق و مبتنی بر شاخص‌های علمی است؛ زیرا استقرار در مکان‌های نامناسب می‌تواند بهره‌وری را کاهش و هزینه‌ها را افزایش دهد. علاوه بر این، بر اساس سند راهبردی پدافند غیرعامل، توسعه زیرساخت‌های غیرمتمرکز و تاب‌آور، یکی از الزامات امنیت ملی و منطقه‌ای به‌شمار می‌رود. ازاین‌رو، مکان‌یابی سامانه‌های تصفیه خورشیدی با استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره مانند AHP در بستر GIS با در نظر گرفتن شرایط اقلیمی، منابع آب، زمین‌شناسی و پراکنش جمعیت می‌توان نقش به‌سزایی در کاهش آسیب‌پذیری آبی و ارتقای تاب‌آوری و امنیت منابع آب منطقه ایفا نماید.

۲-۱- اهمیت و ضرورت تحقیق

از کل منابع آبی روی زمین حدود ۹۷/۵ درصد را آب‌شور تشکیل می‌دهد که در دریاها و دریاچه‌ها است. ۲/۵ درصد باقیمانده، آب شیرینی است که در زمین وجود دارد و شامل ۰/۳ درصد آب

مستقل از شبکه‌های آسیب‌پذیر هستند [۱۶].

در شرایط اضطراری مانند حملات سایبری، تهدیدات ترکیبی یا خشک‌سالی‌های شدید، استفاده از کلکتورهای خورشیدی مستقل از شبکه سراسری می‌تواند به‌طور حیاتی در تأمین آب شرب و بهداشتی مناطق کم‌آب کمک کند. توسعه زیرساخت‌های انرژی تجدیدپذیر محلی در نواحی با تابش بالا و دسترسی محدود به منابع پایدار، مطابق نقشه مکان‌یابی و اسناد بالادستی پدافند غیرعامل، مصداق عملی زیرساخت تاب‌آور و امن است. این رویکرد با کاهش وابستگی به زیرساخت‌های متمرکز و بهره‌گیری از منابع بومی و پاک، افزایش تاب‌آوری ملی در برابر تهدیدات مختلف را هدف قرار می‌دهد. [۱۷]. بر اساس بند ۲ فصل ۴ نقشه راه ملی پدافند غیرعامل ضروری است توسعه زیرساخت‌های غیرمتمرکز تولید انرژی به‌ویژه از منابع تجدیدپذیر نظیر انرژی خورشیدی و بادی در نقاط آسیب‌پذیر و حاشیه مرزهای کشور با هدف افزایش تاب‌آوری و کاهش وابستگی به شبکه سراسری برق در دستور کار قرار گیرد [۱۸]. در نتیجه، مکان‌یابی هدفمند سامانه‌های خورشیدی تصفیه آب در این پژوهش می‌تواند هم‌راستا با سیاست‌های کلان امنیت آبی و انرژی کشور در زمان بحران محسوب شود. لذا هدف اصلی از این پژوهش، مکان‌یابی بهینه استقرار کلکتورهای خورشیدی با استفاده از روش GIS - AHP در استان خراسان رضوی با تأکید بر معیارهای محیطی است که با استفاده از یک رویکرد یکپارچه و هوشمندانه می‌تواند به بهره‌وری بالا، کاهش هزینه‌ها و ارتقاء کیفیت آب در استان خراسان رضوی و در نتیجه افزایش تاب‌آوری جوامع انسانی کمک شایانی کند. استفاده از انرژی خورشیدی با توجه به تحلیل‌های GIS و AHP این امکان را فراهم می‌آورد که در مناطق مختلف استان با نیازها و ویژگی‌های خاص، کلکتورهای خورشیدی به بهترین شکل ممکن عمل کنند.

۳-۱- مبانی نظری تحقیق

سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) نوعی فناوری است که با استفاده از آن، امکان مدیریت و سازمان‌دهی داده‌های مکانی و توصیفی بر روی زمین و زیر زمین و در فضا با هدف تصمیم‌گیری بهینه میسر می‌گردد [۱۹]. مکان‌یابی در واقع تجزیه و تحلیل هم‌زمان اطلاعات فضایی و داده‌های توصیفی به‌منظور یافتن یک یا چند موقعیت با ویژگی‌های تعیین شده مورد نظر کاربر می‌باشد [۲۰].

رودخانه‌ها، ۳۰/۸ درصد آب‌های زیرزمینی و ۶۸/۹ درصد یخچال‌ها و پوشش دائمی برف کوه‌ها است [۱۲]. اگرچه آب دوسوم سطح زمین را می‌پوشاند اما تنها بخش کوچکی از این آب برای مصرف و استفاده انسان مناسب است [۱۳]. میزان منابع آب شیرین موجود بر روی زمین کمتر از ۳ درصد است. بیشتر منابع آب شیرین جهان به شکل یخچال‌های طبیعی در قطب شمال و جنوب است و تنها ۰/۳۶ درصد آن یخ‌زده نیست و قابل بهره‌برداری است [۲، ۱۴، ۱۵]. منابع آبی فراوانی در سرتاسر جهان وجود دارد، با این حال کمتر از ۱ درصد آن برای مصارف خانگی و صنعتی به دلیل شوری بالای آب دریا مناسب است [۵، ۱۳، ۱۵]. تغییرات اقلیمی، رشد جمعیت، الگوهای ناپایدار مصرف و آلودگی منابع آبی، این ذخایر محدود را تحت فشار بی‌سابقه‌ای قرار داده‌اند. بر اساس گزارش اخیر سازمان ملل متحد تا سال ۲۰۳۰ تقاضای جهانی برای آب شیرین تا ۴۰ درصد از عرضه پیشی خواهد گرفت و نزدیک به نیمی از جمعیت جهان در مناطقی با تنش آبی شدید زندگی خواهند کرد [۷]. در چنین شرایطی، بهره‌گیری از سامانه‌های خورشیدی به‌عنوان راهکاری نوین، کم‌هزینه و بومی، می‌تواند نقش مهمی در تأمین پایدار آب شرب ایفا کند. تابش خورشیدی بالا با میانگین بیش از ۵۳۰۰ کیلووات‌ساعت بر مترمربع در طول سال در مناطق جنوب استان بستر مناسبی برای بهره‌برداری از انرژی‌های تجدیدپذیر فراهم کرده است. از سوی دیگر، استقرار سامانه‌های مستقل و غیرشبکه‌ای با تأکید بر انرژی‌های بومی، همسو با راهبردهای پدافند غیرعامل و ارتقای تاب‌آوری زیرساخت‌های حیاتی است. با این حال، جانمایی غیراصولی یا سلیقه‌ای این سامانه‌ها می‌تواند منجر به هدررفت منابع مالی و کاهش کارایی شود.

با توجه به تنش آبی شدید در شرق ایران و به‌ویژه استان خراسان رضوی، ضرورت طراحی راهکارهایی مبتنی بر منابع انرژی بومی و پایدار، از جمله سامانه‌های خورشیدی با تکیه بر تحلیل‌های مکانی و رویکردهای پدافند غیرعامل، می‌تواند نقش مهمی در تأمین آب امن و تاب‌آور ایفا کند. استان خراسان رضوی، به‌عنوان یکی از پهناورترین و پرجمعیت‌ترین استان‌های شرقی کشور، با چالش‌های جدی در حوزه تأمین آب سالم و پایدار به‌ویژه در مناطق کم‌برخوردار و محروم مواجه است. شهرستان‌هایی نظیر تایباد، خواف و سرخس، علاوه بر مشکلات ساختاری در تأمین آب به‌دلیل موقعیت ژئوپلیتیکی، از منظر پدافند غیرعامل نیز نیازمند راهکارهای تاب‌آور، غیرمتمرکز و

۴-۱- پیشینه تحقیق

در راستای اهداف پژوهش در ادامه به بررسی مطالعات مرتبط پرداخته شد.

پاک اندیش [۲۱] در مقاله‌ای بخشی از سواحل جنوبی استان بوشهر را برای مکان‌یابی تأسیسات آب‌شیرین‌کن مورد ارزیابی قرار داد. نتایج تجزیه و تحلیل اطلاعات با روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP) در نرم‌افزار Expert Choice و GIS انجام شده است. ۱۳ معیار در قالب سه معیار عمده دسترسی، حریم‌ها و عوامل طبیعی وزن دهی شد. نتایج تحقیق نشان می‌دهد ۱۳/۱۵ درصد مناطق از پتانسیل خیلی بالا، ۲۸/۳۷ درصد از پتانسیل بالا، ۳۰/۴۵ درصد از پتانسیل متوسط، ۲۱/۴۵ و ۶/۵۷ درصد به ترتیب از پتانسیل کم و خیلی کم برخوردار هستند. نقاط شهری کاک، آبدانف، بردستان و سیراف پتانسیل خیلی بالایی برای احداث تأسیسات دارند و به‌صورت کلی بخش شمالی محدوده مورد مطالعه برای این منظور مناسب‌تر است.

حاجی کریمی و همکاران [۲۲] در مطالعه‌ای به پهنه‌بندی مناطق پتانسیل آب زیرزمینی در دشت مهران استان ایلام از طریق روش‌های AHP و GIS پرداختند. برای رسیدن به این هدف از معیارهای زمین‌شناسی، اقلیم، هیدرولوژی، پوشش گیاهی و توپولوژی (طبقات ارتفاع و شیب توپوگرافی)، استفاده نموده‌اند و به کمک روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP) در نرم‌افزار IDRISI وزن دهی انجام شد. با استفاده از روش‌های AHP-WLC، AHP-OWA، نقشه‌ی نهایی پتانسیل‌یابی آب زیرزمینی در منطقه‌ی مورد مطالعه تهیه گردید. در مجموع ۵ پهنه با پتانسیل یابی خیلی کم، کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد شناسایی گردید. نتایج نشان داد که پهنه با پتانسیل یابی بالا منطبق بر رسوبات آبرفتی و پهنه با پتانسیل کم منطبق بر مناطق با حداکثر شیب و رسوبات رسی و ماری می‌باشد.

سیلاخوری و همکاران [۲۳] در پژوهشی به‌منظور ارزیابی خطر و ریسک بیابان‌زایی در منطقه‌ای باشتین سبزوار از روش تاپسیس (TOPSIS)، فازی و سیستم اطلاعات جغرافیایی استفاده نمودند. بدین منظور شش شاخص مؤثر در بیابان‌زایی شامل زمین‌شناسی، خشکی، بارندگی سالانه، شوری خاک، بافت خاک و درصد پوشش گیاهی بر اساس مدل IMDPA طبقه‌بندی و نقشه بندی شدند. سپس وزن شاخص‌ها با استفاده از فرآیند تحلیل سلسله مراتبی AHP تعیین گردیدند. به‌منظور تلفیق شاخص

استاندارد شده وزنی و محاسبه‌ی خطر بیابان‌زایی از روش TOPSIS و عملگرها Fuzzy در محیط نرم‌افزار GIS استفاده شد. نتایج نشان داد که شوری آب و خاک مؤثرترین شاخص‌ها در بیابان‌زایی می‌باشند. کلاس‌های بحرانی خطر بیابان‌زایی حدود ۵۰ درصد منطقه را پوشش داده‌اند و این مناطق بیش‌تر اطراف کال شور سبزوار و جنوب اراضی کشاورزی این شهر می‌باشد. غرب شهرستان سبزوار و در امتداد جاده‌ی سبزوار-تهران می‌تواند اولویت اجرای برنامه‌های مهار بیابان‌زایی باشد.

شهبازی و همکاران [۲۴] در پژوهشی به بررسی عوامل مؤثر بر مکان‌یابی و طراحی مدل شبکه توزیع برق نیروگاه‌های خورشیدی، بادی و کوچک مقیاس گازی پرداخته‌اند. نقشه‌های مربوط به معیارها در محیط سیستم اطلاعات جغرافیایی تهیه شده و سپس با توجه به اهمیت تلفیق اطلاعات، فرآیند تحلیل شبکه‌ای برای وزن دهی به لایه‌ها انتخاب و به کمک نرم‌افزار سوپر دسیژن اجرا شده است. طبق نتایج مناطقی از شهرهای خدابنده، ایجرود، ماهنشان برای احداث نیروگاه بادی و مناطقی از خدابنده و ایجرود برای احداث نیروگاه خورشیدی و خدابنده، زنجان و ماهنشان برای احداث نیروگاه کوچک مقیاس گازی مناسب هستند.

طیار و همکاران [۲۵] به ارزیابی مکان‌های مناسب برای احداث نیروگاه‌های خورشیدی در مقیاس بزرگ با بهره‌گیری از سامانه‌های اطلاعاتی جغرافیایی با روش‌های فرآیند تحلیل سلسله مراتبی (AHP) و تاپسیس (TOPSIS) در استان کربلا کشور عراق پرداختند. بر اساس روش TOPSIS 7291 ناحیه با مساحت بالای ۱۰ هکتار به‌صورت ۴۱/۷۵ کیلومترمربع (گزینه)، بسیار عالی و ۲۴۴/۸۶ کیلومترمربع (گزینه) دارای ظرفیت عالی، ۳۴۲/۵۳ کیلومترمربع (گزینه) دارای ظرفیت بسیار خوب، ۲۵۶/۱۱ کیلومترمربع (گزینه) دارای ظرفیت متوسط، ۱۵۵/۹۲ کیلومترمربع (گزینه) دارای ظرفیت ضعیف و ۳۴/۰۵ کیلومترمربع (گزینه) دارای ظرفیت بسیار ضعیف دسته‌بندی شدند.

طاحونی و ارگانی [۲۶] در مطالعه‌ای با استفاده از معیارهای اقلیمی (تابش افقی، میانگین بارش و ساعات آفتابی)، اوروگرافی (ارتفاع، شیب و جهت شیب) و اقتصادی (فاصله از شهرهای اصلی و راه‌ها) در بستر GIS و همچنین ترکیب شبکه عصبی مصنوعی و روش بهترین-بدترین به‌عنوان یکی از روش‌های MCDM به

راه‌اندازی کمتری نسبت به دستگاه تقطیر خورشیدی دارد. ولی در طولانی مدت، هزینه دستگاه تصفیه آب خانگی بعد از ۴ سال و سامانه تقطیر خورشیدی بعد از ۳ سال از راه‌اندازی برگردانده می‌شود. لذا با توجه به موقعیت جغرافیایی ایران می‌توان با استفاده از انرژی‌های خورشیدی، سامانه‌های تقطیر خورشیدی را به‌جای استفاده از دستگاه‌های تصفیه آب خانگی برای روستاها و خانوارهای کم‌جمعیت استفاده نمود.

همت اسفه و همکاران [۳۰] در پژوهشی با شبیه‌سازی‌های عددی، فرآیند بهینه‌سازی ابعادی سیستم تصفیه آب خورشیدی همراه با بهینه‌سازی ویژگی‌های سیستم خنک‌کننده ترموالکتریک متصل به آن را با استفاده از روش تاگوچی و روش الگوریتم NSGA-II برای جمعیت روستایی استان سیستان و بلوچستان مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد از میان چهار پارامتر مورد بررسی، مهم‌ترین و مؤثرترین آن‌ها نرخ خنک‌شدگی، طول تصفیه، ارتفاع کوتاه تصفیه و طول دستگاه خنک‌کننده (TEC) به ترتیب هستند. تولید آب در سمت راست تصفیه‌گر خورشیدی (جایی که دستگاه TEC نصب شده است) به نسبت دمای آب در تصفیه‌گر خورشیدی، ۲۰ تا ۶۰ درصد بیشتر است. بهبود نرخ تولید آب ۲۵ تا ۵۵ درصد برای تصفیه‌گر خورشیدی مجهز به TEC بیشترین تولید آب در نرخ خنک‌شدگی ۶۰ وات بر مترمربع، طول ۱۴ TEC سانتی‌متر، ارتفاع کوتاه تصفیه ۶ سانتی‌متر و طول تصفیه ۴۰ سانتی‌متر رخ داده است.

رازقی و همکاران [۲] در بررسی‌ای نسبت به تصمیم‌گیری چند معیاره برای انتخاب مکان مزرعه خورشیدی برای تأمین انرژی دستگاه‌های اسمز معکوس و تولید آب شیرین با استفاده از GIS در شهرستان خوانسار با مساحت ۹۵۹۱۷۱۴۷/۱۶ مترمربع که در استان اصفهان و در بخش مرکزی ایران نمودند. به‌طور هم‌زمان ۱۶ لایه داده شامل پارامترهای اقتصادی، زیست‌محیطی، فنی و زمین‌شناسی در نظر گرفته شده است. سامانه‌های اطلاعات جغرافیایی برای تولید لایه‌های داده و اعمال معیارها و محدودیت‌های حذف، استفاده می‌شوند. حدود ۱۶۰ شهر در ایران دارای مساحتی در حدود ۴۹۸۰۷۷/۴۹۸۰۷۷ تا ۱۴۴۴۴۰۶۸۵۱۲۰ مترمربع، دارای منابع آب شور و به‌طور هم‌زمان پتانسیل استفاده از انرژی خورشیدی به‌عنوان یکی از منابع انرژی تجدید پذیر برای تأمین انرژی دستگاه‌های نمک‌زدایی اسمز معکوس را دارند که بیشتر این مناطق در شرق ایران قرار دارند و این مناطق دارای تنش آبی

شناسایی مکان‌های مناسب برای نصب صفحات خورشیدی در استان آذربایجان شرقی پرداخته شده است. همان‌گونه که مشخص است، مناطق شمال شرقی استان نسبت به دیگر مناطق دارای کمترین میزان مطلوبیت‌اند. علت عمده این امر عبارت است از: کم بودن میزان تابش افق جهانی GHI و همچنین ساعات آفتابی به‌عنوان دو عامل مهم و تعیین‌کننده در این مناطق می‌باشند.

جیمالاکوی و تسوتسوس [۲۷] در یک بررسی با هدف ارائه و آزمایش روشی برای شفاف‌سازی و اولویت‌بندی مناسب‌ترین مکان‌ها برای مکان‌یابی تأسیسات برق خورشیدی است. با استفاده از سامانه‌های اطلاعات جغرافیایی و فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP)، مناطق مکان‌یابی پایدار توصیه‌شده برای مکان‌یابی مزارع تولید برق خورشیدی شناسایی می‌شوند که امکان استفاده از یک رویکرد تصمیم‌گیری چند معیاره فضایی را فراهم می‌کند. این روش، مناطق موجود برای مکان‌یابی مزارع خورشیدی را بر اساس معیارهای حذف تعریف شده از قانون فعلی شناسایی می‌کند. درنهایت، این روش برای مطالعه موردی واحد منطقه‌ای ریتمینو مدیترانه به کار گرفته شد که در آن نتایج، از نظر حداکثر توان بالقوه قابل‌تولید از مناطق دارای اولویت بالا، ۵۳۰ مگاوات بر ثانیه برای فتوولتائیک و ۳۰ مگاوات برای سامانه‌های انرژی خورشیدی متمرکز است.

گونون [۲۸] در این پژوهش به بررسی تجزیه و تحلیل جغرافیایی یکپارچه با استفاده از روش GIS-AHP برای انتخاب مکان، توسعه و گسترش مزارع فتوولتائیک خورشیدی در کوه‌رمان‌ناراش ترکیه پرداختند. در محیط GIS، نقشه‌های متعلق به چهارده زیر معیار از سه معیار اصلی (جغرافیا، اقلیم و موقعیت مکانی) و همچنین نقشه تناسب حاصل از مجموع وزنی آن‌ها تهیه شد. بر اساس نتایج تعیین شد که مناطق البیستان و افس مناسب‌ترین مناطق برای احداث مزارع فتوولتائیک خورشیدی و مناطق اندیرین و اونیکیسوبات نامناسب برای این موضوع می‌باشند.

احمدی و همکاران [۲۹] در مطالعه‌ای نسبت به بررسی جایگزینی استفاده از سامانه تقطیر خورشیدی به‌جای دستگاه‌های تصفیه آب خانگی در تأمین آب آشامیدنی پرداخته‌اند. در مبحث بررسی اقتصادی از دو روش روابط ریاضی اکسل و نرم‌افزار کامفر استفاده شده است. در این پژوهش نشان داده می‌شود که هزینه‌های دستگاه تصفیه خانگی هزینه

بالایی هستند.

رومرو راموس و همکاران [۳۱] در مطالعه‌ای، پتانسیل سنجی منطقه جنوب شرقی اسپانیا برای احداث نیروگاه‌های حرارتی خورشیدی را با استفاده از روش GIS-AHP برای پاسخگویی به نیازهای گرمایی مکان‌های صنعتی مورد بررسی قرار دادند. نتیجه نهایی بیانگر یک مقیاس مناسب جغرافیایی است که نشان می‌دهد حدود ۵ درصد (۱۴۸۲ کیلومتر مربع) از کل قلمرو جنوب شرقی اسپانیا برای توسعه آتی تأسیسات تولیدی تغذیه شده توسط نصب‌های حرارتی خورشیدی مناسب است و تخمین می‌زند ۴۲ درصد نیاز به انرژی با کلکتورهای تاج‌شکلی (۹/۵ تراوات ساعت در سال) و ۶۵ درصد نیاز به انرژی با کلکتورهای خطی فرنل (۱۴/۷ تراوات ساعت در سال) در مناطقی با امتیاز بیشتر از ۷ امتیاز می‌تواند تأمین شود.

عبدالله خان و همکاران [۳۲] در مطالعه‌ای اقدام به بررسی انتخاب مکان نیروگاه برق فتوولتائیک خورشیدی با استفاده از فن بهینه‌سازی چند معیاره غیرخطی به نام FUCOM مبتنی بر GIS در کشور پاکستان کردند. نتایج نشان داد که ۲/۰۲ درصد از مساحت موردبررسی مناسب برای نصب نیروگاه‌های برق فتوولتائیک خورشیدی است. منطقه مناسب به مناطق مناسب‌ترین، معمولی، کمی مناسب، بسیار مناسب و بسیار مناسب تقسیم می‌شود. این مطالعه ده عامل را که در چهار دسته‌بندی جغرافیایی، فنی، اقتصادی و آسیب‌پذیری در برابر سیل جای دارند، تحلیل کرده است.

نوری و همکاران [۳۳] در مطالعه‌ای نسبت به شناسایی مکان‌های مناسب برای برداشت آب باران در استان سلیمانیه، اقلیم کردستان عراق است. این فرآیندها با استفاده از فن‌های سنجش‌ازدور، سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) و تصمیم‌گیری چند معیاره (MCDM) انجام شده است. برای یافتن مکان‌های مناسب برای برداشت آب از مدل فرآیند تحلیل سلسله مراتبی (AHP) استفاده شده است. معیارهای در نظر گرفته شده رواناب، شیب، نوع خاک، پوشش زمین و تراکم زهکشی بودند. نتایج نشان داد در مجموع مناطق بسیار مناسب ۳۲ درصد مساحت، منطقه خوب ۱۱ درصد مساحت و ۲۸ درصد مناطق باقی‌مانده کمتر و مطلوب نیست.

گوپی و موسامی [۳۴] در تحقیقی به بررسی استفاده از بازتابنده‌های داخلی در دستگاه تقطیر خورشیدی پله‌ای در

بازدهی آن‌ها پرداختند. نتایج نشان داد که بازده دستگاه تقطیر خورشیدی با استفاده از بازتابنده‌های شیشه‌ای داخلی افزایش یافته است. همچنین طراحی این دستگاه شامل صفحات داخلی بازتابنده برای بهبود جذب انرژی خورشیدی و کاهش اتلاف حرارت بود. علاوه بر این نتایج نشان داد که بازدهی روزانه این دستگاه ۷۵ درصد بالاتر از دستگاه‌های استاندارد بوده است و هزینه تولید آب مقطر نیز کاهش یافت، زیرا اجزای ارزان قیمت مانند صفحات آهنی رنگ‌شده و مواد عایق حرارتی استفاده شد.

۲- روش تحقیق

با توجه به اینکه هدف حاکم در تحقیق حاضر به صورت کاربردی بوده و روش آن تحلیلی می‌باشد. به منظور گردآوری اطلاعات این تحقیق از منابع علمی معتبر داخلی و خارجی و همچنین از نظر اساتید دانشگاهی خبره این حوزه به روش تهیه و توزیع پرسشنامه استفاده شده است. سپس به منظور امکان‌سنجی تعیین مکان بهینه استقرار کلکتورهای خورشیدی مبتنی بر سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) در استان خراسان رضوی مراحل انجام تحقیق به شرح زیر پرداخته شد:

در این تحقیق شناسایی شاخص‌های مؤثر بر مکان‌یابی تأکید بر پارامترهای محیطی دما، تابش خورشید و سرعت باد با لحاظ نمودن شرایط منطقه استان خراسان رضوی بر اساس مطالعات صورت گرفت. پس از شناسایی عوامل مؤثر در مکان‌یابی کلکتورهای خورشیدی، باید لایه‌های اطلاعاتی مرتبط تهیه شوند. در این تحقیق، به دلیل ماهیت روابط میان داده‌ها و برای سهولت در پردازش و امکان هم‌پوشانی لایه‌ها، ساختار رستری به دلیل صریح بودن و قابلیت انجام عملیات هم‌پوشانی نسبت به ساختار برداری انتخاب شد به همین دلیل، داده‌های برداری برای دقت بیشتر به داده‌های رستری تبدیل شده‌اند. در ساختار رستری، اطلاعات به صورت شبکه‌ای از پیکسل‌ها نمایش داده می‌شوند که هر پیکسل حاوی یک مقدار عددی است. هر پیکسل نمایانگر بخشی از سطح زمین است و دقت هندسی ساختار رستری به ابعاد پیکسل‌ها بستگی دارد. در ادامه با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP) و اعمال نظر کارشناسان در قالب مقایسه زوجی با استفاده از نرم‌افزار Expert Choice به منظور هم‌پوشانی و امتیازدهی معیارها به کار گرفته شد که روند اجرای این تحقیق در شکل (۱) نشان داده شده است.

داده‌های SolarGIS در بازه ۵/۲ تا ۵/۶ کیلووات ساعت بر مترمربع در سال با دقت قابل قبولی با مقادیر ثبت شده در ایستگاه‌های محلی (۵/۱ تا ۵/۵ کیلووات ساعت بر مترمربع) مطابقت دارد. همچنین، سرعت متوسط باد در داده‌های Global Wind Atlas (در ارتفاع ۱۰۰ متر) در نواحی جنوب شرقی استان بین ۴/۵ تا ۵/۳ متر بر ثانیه گزارش شده که با داده‌های میدانی ایستگاه تایباد (میانگین ۴/۷ متر بر ثانیه در ارتفاع ۱۰ متر با ضریب مقیاس‌پذیری) همبستگی مناسبی دارد. این مقایسه‌ها حاکی از آن است که داده‌های جهانی استفاده شده در این مطالعه از اعتبار کافی برخوردار بوده و می‌توانند در مدل‌سازی و مکان‌یابی سامانه‌های انرژی تجدیدپذیر در مناطق خشک و مرزی، از جمله خراسان رضوی، مورد استفاده قرار گیرند [۳۵].

جدول (۱): معیارهای محیطی مورد مطالعه، منبع و نحوه محاسبه

معیار	منبع	روش تهیه
سرعت باد	پایگاه globalwindatlas	پردازش شاخص Wind Speed در نرم‌افزار GIS
تابش دمای هوا	پایگاه solargis	پردازش شاخص GHI در نرم‌افزار GIS
دمای هوا	پایگاه solargis	پردازش شاخص Temp در نرم‌افزار GIS

۱-۲- منطقه مورد مطالعه

استان خراسان رضوی دارای وسعتی بیش از ۱۲۷ هزار کیلومترمربع است که در شمال شرقی کشور ایران واقع شده و این استان بین مختصات جغرافیایی ۳۳ درجه و ۵۲ دقیقه تا ۳۷ درجه و ۴۲ دقیقه عرض شمالی و ۵۶ درجه و ۱۹ دقیقه تا ۶۱ درجه و ۱۶ دقیقه طول شرقی قرار دارد. این مساحت حدود ۷/۱ درصد از کل مساحت ایران را تشکیل می‌دهد. آب و هوای استان خراسان رضوی تنوع قابل توجهی دارد و بسته به منطقه، تغییرات زیادی را نشان می‌دهد اما به‌طور کلی جزو مناطق نیمه‌خشک کشور به شمار می‌رود. این استان دارای آب و هوای نیمه‌خشک و معتدل است، اما به دلیل وجود ارتفاعات و دشت‌های گسترده، شرایط جوی مناطق مختلف آن متفاوت است [۳۶].

استان خراسان رضوی از شمال با کشور ترکمنستان و از شرق با کشور افغانستان مرز مشترک دارد. در داخل کشور، استان خراسان رضوی از شمال غربی با استان خراسان شمالی، از غرب با استان سمنان و از جنوب با استان خراسان جنوبی هم‌مرز است



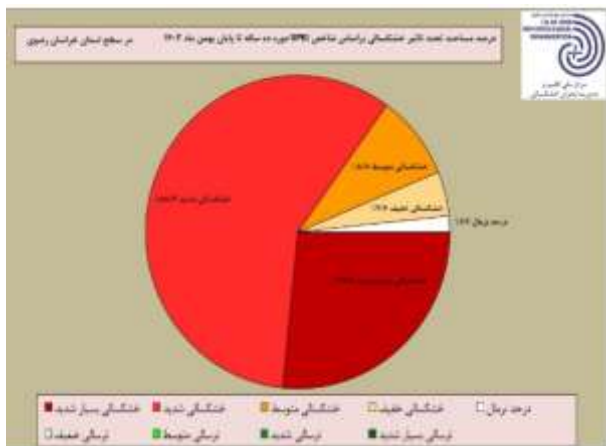
شکل (۱): روند اجرای این پژوهش

در انتها با استفاده از سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) ارزش لایه‌ها مشخص شد و پس از ترکیب تمامی لایه‌ها، مناطق بهینه استقرار کلکتورهای خورشیدی در استان خراسان رضوی مشخص گردید. معیارهای مورد مطالعه، منبع و نحوه محاسبه هر یک از معیارها در جدول (۱) آمده است.

داده‌های مورد استفاده در این پژوهش به‌صورت میانگین بلندمدت سالانه از سال ۱۹۹۹ تا ۲۰۱۹ توسط پلتفرم آنلاین solargis و globalwindatlas تأمین مالی و تهیه شده است که به‌وسیله برنامه کمک به مدیریت بخش انرژی (ESMAP) راه اندازه شده است. این صندوق امانی چند اهداکننده‌ای توسط بانک جهانی اداره می‌شود و تحت یک ابتکار جهانی در زمینه نقشه‌برداری از منابع انرژی تجدیدپذیر مشغول فعالیت است. همچنین دقت مکانی داده‌های مورد بررسی در این پژوهش به‌منظور پتانسیل‌سنجی استقرار کلکتورهای خورشیدی حدود یک کیلومترمربع است.

به‌منظور افزایش دقت تحلیل‌های مکانی و اطمینان از صحت داده‌های مورد استفاده در این پژوهش، داده‌های تابش خورشیدی استخراج شده از پایگاه SolarGIS و داده‌های سرعت باد از Global Wind Atlas با داده‌های ثبت شده در ایستگاه‌های سینوپتیک سازمان هواشناسی در استان خراسان رضوی، از جمله ایستگاه‌های مشهد، تایباد، گناباد و سبزوار، مقایسه شدند. نتایج این مقایسه نشان داد که میانگین سالانه تابش خورشیدی در

همچنین در شکل (۴) درصد مساحت تحت تأثیر خشک‌سالی بر اساس شاخص SPEI دوره ده‌ساله تا پایان بهمن‌ماه سال ۱۴۰۳ در سطح استان خراسان رضوی نشان داده شده است [۳۷].



شکل (۴): درصد مساحت خشک‌سالی بر اساس شاخص SPEI دوره ده‌ساله تا بهمن‌ماه سال ۱۴۰۳ در استان خراسان رضوی [۳۷]

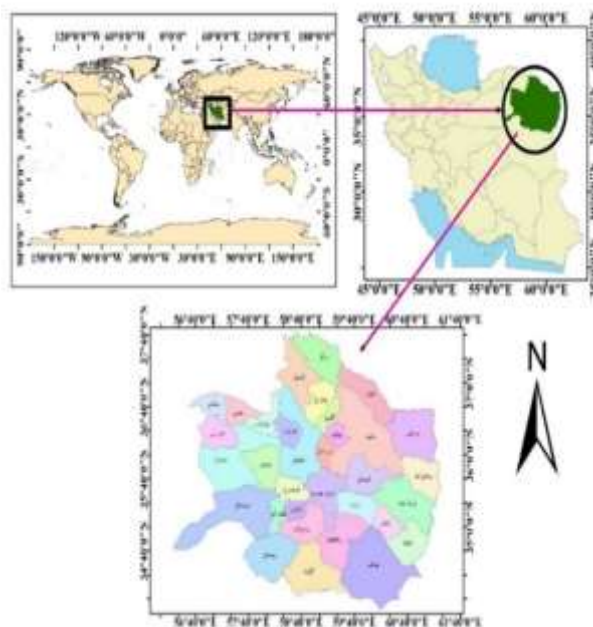
۲-۲- مدل فرآیند تحلیل سلسله مراتبی

روش تحلیل سلسله مراتبی^۲ (AHP) یکی از روش‌های کارآمد و پرکاربرد است که می‌توان آن را در محیط GIS پیاده‌سازی کرد. این روش امکان تجزیه و تحلیل مسائل پیچیده را فراهم می‌آورد و در فرآیند تصمیم‌گیری، عوامل ذهنی و عینی را به‌طور هم‌زمان در نظر می‌گیرد. روش مذکور با ارائه یک ساختار منظم، اولویت‌های گروه تصمیم‌گیری را از طریق مقایسه‌های زوجی مشخص و به‌صورت وزن‌هایی عددی تعیین می‌کند. در این فرآیند، پارامترهای شناسایی‌شده وزن دهی شده و پس از مقایسه در نرم‌افزار Expert Choice، امتیازدهی و سپس کلاس‌بندی می‌شوند.

در این روش پرسشنامه‌ها دارای معیارهای اولویت‌بندی می‌باشند که پرسشنامه‌ها به‌صورت کتبی به ۱۰ نفر از کارشناسان شامل متخصصان و اساتید دانشگاه با تحصیلات دکترا در حوزه‌های مختلف مانند مدیریت منابع آب، مکانیک، منابع طبیعی، محیط‌زیست و سیستم انرژی ارسال و تکمیل شد.

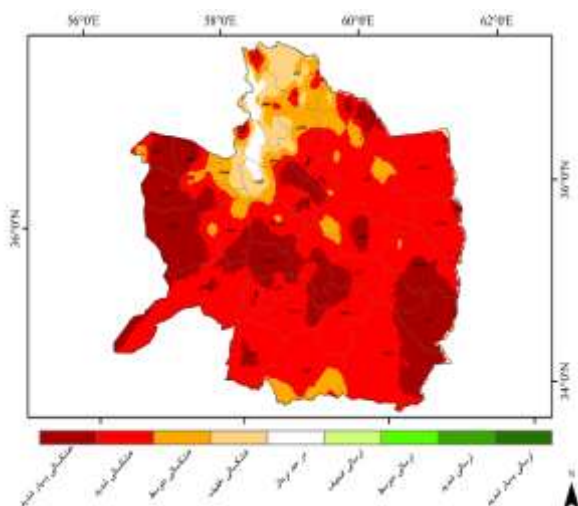
در این پژوهش برای تعیین وزن نهایی معیارها در مدل تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP)، از نظرات ۱۰ کارشناس خبره در حوزه‌های مرتبط با GIS، منابع آب، انرژی خورشیدی، محیط‌زیست و پدافند غیرعامل بهره گرفته شد. به منظور جمع‌بندی نظرات فردی کارشناسان، از روش میانگین هندسی استفاده شد که در ادبیات تصمیم‌گیری چندمعیاره به‌عنوان روشی معتبر

که این تنوع مرزی باعث شده که استان خراسان رضوی از نظر اقتصادی، فرهنگی و اقلیمی تنوع زیادی داشته باشد.



شکل (۲): موقعیت جغرافیایی استان خراسان رضوی در ایران و جهان استان خراسان رضوی از تنوع اقلیمی برخوردار است اما به‌طور کلی جزو مناطق نیمه‌خشک کشور به‌شمار می‌رود.

در شکل (۳) پهنه‌بندی خشک‌سالی هواشناسی بر اساس شاخص بارش- تبخیر و تعرق استاندارد شده^۱ (SPEI) در دوره ۱۲۰ ماهه تا پایان بهمن ۱۴۰۳ در سطح استان خراسان رضوی نشان داده شده است [۳۷].



شکل (۳): پهنه‌بندی خشک‌سالی هواشناسی بر اساس شاخص SPEI دوره ۱۲۰ ماهه تا پایان بهمن‌ماه سال ۱۴۰۳ در سطح استان خراسان رضوی [۳۷]

² Analytical Hierarchy Process

¹ Standardized Precipitation Evapotranspiration Index

۲-۳- ماتریس مقایسه زوجی^۴

برای انجام مقایسه زوجی معیارها، از اولویت‌های نسبی ذکر شده در جدول (۲) استفاده می‌شود. در این ماتریس، هر معیار به صورت جداگانه در برابر معیارهای دیگر ارزیابی می‌شود. این روش شامل ارزیابی معیارهای موجود در ردیف‌ها (افقی) در رابطه با معیارهای موجود در ستون‌ها (عمودی) با مقادیر مربوطه مستند شده است.

جدول (۲): اولویت‌های نسبی جهت مقایسه دوبه‌دو

شدت اهمیت	تعریف
۱	اهمیت برابر
۲	اهمیت برابر تا اهمیت متوسط
۳	اهمیت متوسط
۴	اهمیت متوسط تا اهمیت قوی
۵	اهمیت قوی
۶	اهمیت قوی تا اهمیت خیلی قوی
۷	اهمیت خیلی قوی
۸	اهمیت خیلی قوی تا فوق‌العاده قوی
۹	اهمیت فوق‌العاده قوی

مقایسه‌های زوجی بین معیارها/گزینه‌ها با استفاده از مقیاس ۱ تا ۹ ساعتی انجام می‌شود که ماتریس مقایسه زوجی A به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$A = [a_{ij}] \quad \text{یا} \quad A = \begin{bmatrix} 1 & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ \frac{1}{a_{12}} & 1 & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{1}{a_{1n}} & \frac{1}{a_{2n}} & \dots & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

شرط ماتریس:

$$a_{ij} = 1/a_{ji} \quad (2)$$

۲-۴- بردار اولویت^۵

بردار اولویت در روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP) نشان‌دهنده وزن نسبی معیارها است که از ماتریس مقایسه زوجی استخراج می‌شود. این بردار به تصمیم‌گیرنده کمک می‌کند تا اهمیت هر معیار را نسبت به دیگر معیارها محاسبه نماید. برای محاسبه وزن‌های نسبی معیارها، از رابطه ۳ استفاده می‌شود [۳۹]:

برای دستیابی به اجماع گروهی شناخته می‌شود. پس از تشکیل ماتریس مقایسه زوجی نهایی، شاخص سازگاری (CR) محاسبه گردید که مقدار آن کمتر از ۰/۱ بود. این امر نشان‌دهنده سازگاری قابل قبول در ارزیابی‌ها است و اعتبار ساختار سلسله‌مراتبی را تأیید می‌کند (Saaty, 2008). این مدل شکلی از روش تصمیم‌گیری چند معیاره است که توسط توماس ال ساعتی [۳۸] در سال ۱۹۷۷ معرفی و اصلاح شد.

در ادامه لایه‌های مکانی مورد استفاده شامل تابش خورشیدی، دما و سرعت باد به‌منظور هم‌مقیاس‌سازی، در محیط نرم‌افزار ArcGIS استانداردسازی شدند. برای این منظور از روش باز طبقه‌بندی خطی (Linear Reclassification) استفاده گردید؛ به‌گونه‌ای که مقادیر خام هر لایه با توجه به نقش آن در مکان‌یابی بهینه، به مقیاسی بین ۱ (کمترین مطلوبیت) تا ۹ (بیشترین مطلوبیت) تبدیل شدند. در مرحله پایانی لایه‌های استاندارد شده با استفاده از ابزار برهم‌نهی وزن‌دار (Weighted Overlay) و با در نظر گرفتن وزن‌های به‌دست‌آمده از AHP تلفیق شدند. حاصل این فرآیند نقشه نهایی اولویت‌بندی مکان‌های مناسب برای استقرار کلکتور خورشیدی در سطح استان خراسان رضوی بود.

برای مکان‌یابی سامانه‌های کلکتور خورشیدی، لایه‌های مکانی متعددی از جمله تابش خورشیدی، دما و سرعت باد به‌صورت رستری تهیه شدند. از آنجا که این لایه‌ها دارای واحدهای اندازه‌گیری متفاوتی مانند کیلووات‌ساعت بر مترمربع، درجه و کیلومتر بر ساعت بودند، لازم بود قبل از ترکیب در یک مدل تصمیم‌گیری، به‌صورت عددی هم‌مقیاس شوند. این مرحله تحت عنوان استانداردسازی انجام شد.

این روش از یک مقیاس عددی بین ۱ تا ۹ برای ارزیابی اولویت‌ها از نظر کمی و کیفی استفاده می‌کند. یک رویکرد کلیدی برای ادغام فرآیند سلسله‌مراتبی تحلیلی (AHP) با لایه‌های سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS)، روش ترکیب خطی وزن‌دار است. در این روش، یک ماتریس مقایسه زوجی بر اساس بینش متخصصان متعدد ساخته شده و متعاقباً میانگین هندسی آن‌ها محاسبه می‌شود. این تجزیه و تحلیل شامل سه مرحله است: ساخت ماتریس مقایسه زوجی^۱، تعیین وزن معیارها^۲ و ارزیابی شاخص سازگاری برای اعتبارسنجی نتایج^۳ استفاده می‌شود.

¹ Pairwise Comparison Matrix

² Criterion Weights Computation

³ Consistency Ratio Estimation

⁴ Pairwise Comparison Matrix

⁵ Priority Vector

تصادفی (RI) محاسبه می‌شود.

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (5)$$

در رابطه فوق، RI مقادیر پیش تعیین شده برای ماتریس‌های تصادفی (بر اساس اندازه ماتریس) است. این شاخص که در جدول (۳) ارائه شده به‌عنوان معیاری برای ارزیابی سازگاری یک ماتریس مقایسه زوجی در نظر گرفته می‌شود و بر اساس ماتریس‌هایی که به‌صورت تصادفی ایجاد شده‌اند، محاسبه می‌گردد.

جدول (۳): شاخص‌های پایبندی تصادفی در مدل AHP [۴۰]

<i>n</i>	۱	۲	۳	۴	۵
RI	۰	۰	۰/۴۱۶	۰/۸۵۱	۱/۱۱۵
<i>n</i>	۶	۷	۸	۹	۱۰
RI	۱/۱۵۰	۱/۳۴۵	۱/۳۳۴	۱/۳۱۵	۱/۴۲۰

۲-۷- تجمیع وزن‌ها^۲

در این مرحله، مقادیر هر ستون در ابتدا در ماتریس مقایسه زوجی جمع می‌شوند. پس از آن، هر عنصر درون ماتریس بر مجموع ستون مربوطه خود تقسیم می‌شود و در نتیجه ایجاد یک ماتریس استاندارد می‌شود. بعد، میانگین عناصر از هر ردیف با استفاده از این ماتریس استاندارد محاسبه می‌شود. برای دستیابی به این هدف، مجموع مقادیر استاندارد شده برای هر ردیف بر تعداد معیارها تقسیم می‌شود. میانگین‌های به دست آمده تخمین وزن نسبی معیارهای مورد مقایسه را ارائه می‌دهد و اهمیت نسبی آن‌ها را منعکس می‌کند [۴۱].

وزن نهایی گزینه‌ها از ترکیب خطی وزن‌های سطوح مختلف سلسله‌مراتب مطابق رابطه ۶ محاسبه می‌شود:

$$S_i = \sum_{j=1}^n \omega_j \cdot S_{ij} \quad (6)$$

ω_j : وزن معیار/زیرمعیار

S_i : امتیاز گزینه در معیار *i*

۲-۸- تحلیل حساسیت

در این پژوهش به‌منظور تحلیل حساسیت، وزن معیار تابش از ۰/۵۳۳ به ۰/۴ کاهش داده شد که در نتیجه وزن معیار دما از ۰/۳۳۲ به ۰/۴۵ افزایش یافت (تعدیل معادل ۲۵ درصد). نتایج تحلیل نشان داد که مناطق جنوبی استان مانند شهرستان‌های

$$A \cdot \omega = \lambda_{max} \cdot \omega \quad (3)$$

λ_{max} : بزرگ‌ترین مقدار ویژه

ω : بردار ویژه متناظر با λ_{max} که وزن‌ها را نشان می‌دهد

۲-۵- شاخص سازگاری^۱

در این مرحله وزن اختصاص داده شده به هر معیار با مقادیر مربوطه از ستون متناظر ماتریس مقایسه زوجی اولیه ضرب می‌شود. به‌عنوان مثال، وزن معیار اول در مقادیر ستون اول و وزن معیار دوم در ستون دوم محاسبه می‌گردد. در پایان مجموع عناصر در هر ردیف ماتریس حاصل بردار مجموع وزنی را ایجاد می‌کند. با تقسیم این بردار بر وزن‌های هر اندازه‌گیری، بردار سازگاری تولید می‌شود. به دنبال این، محاسبه مقادیر λ و شاخص سازگاری ضروری است. مقدار λ نشان‌دهنده میانگین عناصر درون بردار سازگاری است. شاخص سازگاری نشان می‌دهد که در ماتریس‌های مثبت با دو سویه، مقدار λ به‌طور مداوم برابر یا بیشتر از تعداد معیارها (*n*) است. اگر ماتریس سازگاری کامل را نشان دهد، مقدار λ_{max} دقیقاً با تعداد معیارها مطابقت خواهد داشت.

$\lambda_{max} - n$ به‌عنوان یک متریک برای سنجش درجه ناهماهنگی عمل می‌کند. درنهایت، نسبت سازگاری نیز از طریق رابطه ۴ تعیین می‌شود.

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (4)$$

n: تعداد معیارها/گزینه‌ها

۲-۶- نسبت سازگاری^۲

نرخ ناسازگاری نشان‌دهنده این است که مقایسات از ثبات و پایداری برخوردار هستند یا خیر. در نرم‌افزارهای مختص روش AHP این نرخ به‌صورت خودکار توسط نرم‌افزار محاسبه می‌شود چنانچه این نرخ از ۰/۱ کمتر باشد نشان از سازگاری ماتریس است و اگر از ۰/۱ بیشتر باشد باید در مقایسات زوجی تجدید نظر نمود. در مواقعی که در یک مسئله تصمیم‌گیری تعداد عوامل زیاد باشد در بیشتر مواقع نرخ ناسازگاری بسیار زیاد می‌شود و رفع کردن آن نیازمند تغییرات زیاد در ماتریس مقایسه زوجی است پیشنهاد می‌شود که در چنین مواقعی از روش AHP بهبود یافته استفاده شود. نسبت سازگاری (CR) با تقسیم CI بر شاخص

^۱ Consistency Index

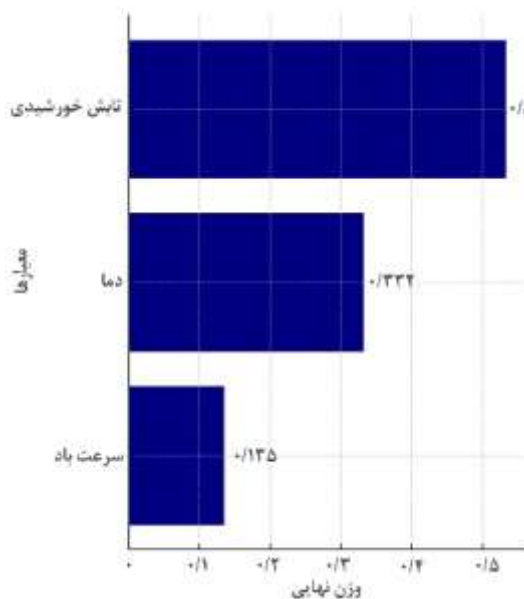
^۲ Consistency Ratio

^۳ Aggregation of Weights

۳- نتایج و بحث

در این پژوهش پس از شناسایی معیارهای مؤثر در مکان‌یابی کلکتورهای خورشیدی و انجام تحلیل‌های چندبعدی با استفاده از نرم‌افزار GIS، نقشه‌های مربوط به پارامترهای تأثیرگذار در این فرآیند تهیه شد. بعد از وزن دهی معیارهای مؤثر بر اساس مدل AHP، از نرم‌افزار GIS برای همپوشانی نقشه‌ها استفاده شد تا نقشه نهایی مکان‌یابی کلکتورهای خورشیدی محاسبه گردد. در این فرآیند، تمامی پارامترهای شناسایی شده وزن دهی می‌شوند و سپس از طریق مقایسه زوجی در نرم‌افزار Expert Choice 11 امتیازدهی شده و پس از آن، به کلاس بندی پرداخته شد. بعد از کلاس بندی، برای هر کلاس امتیازی تعیین گردید که در وزن اختصاصی آن ضرب شده و به هر پارامتر ارزش مشخصی اختصاص داده می‌شود. در نهایت، مجموع این مقادیر برای به دست آوردن نقشه نهایی استفاده شد و پرسشنامه‌های مدل AHP توسط کارشناس متخصص در حوزه‌های مختلف مانند مکانیک، منابع طبیعی، محیط زیست، انرژی تکمیل و امتیازدهی شد.

در واقع با استفاده از سامانه اطلاعات جغرافیایی می‌توان اطلاعات کیفی را از طریق روش‌های تحلیلی مناسب، مانند AHP به اطلاعات کمی تبدیل کرد و سپس به همراه سایر اطلاعات مکانی مورد تجزیه و تحلیل قرار داد [۴۲]. روش AHP چارچوبی ساختاریافته و منسجم برای تصمیم‌گیری ارائه می‌دهد و به متخصصان اجازه می‌دهد تا عوامل مختلف مؤثر در صنعت آب را اولویت بندی و ارزیابی کنند [۴۳].



شکل (۵): نمودار اولویت بندی معیارهای مورد مطالعه

تایید و خواف همچنان در اولویت زیاد برای استقرار کلکتورهای خورشیدی قرار دارند و شهرستان‌های سبزوار و ششتمد جای خود را به نیشابور و فریمان می‌دهند. این موضوع نشان می‌دهد که پایداری اولویت مناطق بر اساس معیار تابش نسبتاً بالاست، اما تغییرات وزنی بر نواحی با رتبه متوسط تأثیرگذار است که در جدول (۴) نتایج بیان شده است.

جدول (۴): تحلیل حساسیت مکان‌یابی با تغییر وزن معیارها

معیارها	وزن اولیه	وزن پس از تغییر	تأثیر بر اولویت مناطق
تابش خورشیدی	۰/۵۳۳	۰/۴	کاهش نسبی وزن این معیار موجب شد برخی مناطق با پتانسیل متوسط تابش مانند نیشابور و فریمان در اولویت قرار گیرند، اما مناطق با تابش بالا مانند تایباد و خواف همچنان در رتبه بالا باقی ماند
دما	۰/۳۳۲	۰/۴۵۰	افزایش وزن دما باعث ارتقای رتبه مناطقی با دمای بالاتر شد؛ به‌ویژه نواحی جنوبی و جنوب‌غربی استان
سرعت باد	۰/۱۳۵	۰/۱۵۰	تغییر ناچیز داشته و اثر محسوسی در نتایج نهایی نداشت

تحلیل فوق نشان می‌دهد که نتایج مکان‌یابی نسبت به تغییر وزن معیار تابش حساسیت کمتری دارد، در حالی که دمای هوا می‌تواند تأثیر قابل توجهی بر رتبه بندی مناطق با پتانسیل متوسط ایجاد کند. این پایداری، اعتبار نسبی نتایج مکان‌یابی اولیه را تقویت می‌کند.

در این پژوهش برای پتانسیل سنجی مکان بهینه استقرار کلکتور محدودیت‌های زیر وجود داشت.

الف) عدم دسترسی به داده‌های لحظه‌ای و به‌روز اقلیمی، مانند تابش خورشیدی سطح زمین به تفکیک فصل.

ب) عدم لحاظ محدودیت‌های کالبدی مانند شیب و جهت شیب زمین به دلیل نبود داده‌های رقومی با تفکیک بالا.

ج) عدم لحاظ پارامترهای اجتماعی-اقتصادی مانند هزینه زمین، مالکیت، یا جمعیت در مدل.

دمای محیط به طور مستقیم بر فرآیند تبخیر تأثیر می‌گذارد؛ به این معنا که با افزایش دما، میزان تبخیر نیز افزایش می‌یابد. در انتخاب مکان مناسب برای کلکتورهای خورشیدی، باید مناطقی با دمای بالاتر مدنظر قرار گیرند. دمای بالاتر محیط به بهبود عملکرد این سامانه‌ها و افزایش بازده تولید آب شیرین کمک می‌کند؛ بنابراین، تحلیل دما در مکان‌یابی این سامانه‌ها اهمیت ویژه‌ای دارد که مطابق جدول (۶-ب) و شکل (۶-ب) ارزش‌گذاری شده است.

عامل مؤثر دیگر در انتخاب مکان مناسب برای کلکتورهای خورشیدی، ارزیابی سرعت باد در منطقه است. افزایش سرعت باد، تبخیر را در آن ناحیه تسریع می‌کند و این فرآیند به بهبود عملکرد سامانه تصفیه کمک می‌کند. در واقع، تبخیر بیشتر موجب افزایش کارایی و تولید آب شیرین می‌شود؛ بنابراین، مناطقی با سرعت باد مناسب، گزینه‌های بهتری برای نصب این سامانه‌ها هستند که مطابق جدول (۶-ج) و شکل (۶-ج) ارزش‌گذاری شده است.

جدول (۶): ارزش‌گذاری لایه‌های الف) تابش، ب) دما، ج) سرعت باد

میزان امتیاز	دسته‌بندی زیر لایه‌های تابش	الف
۱	کمتر از ۵۱۰۰	
۳	۵۱۰۰-۵۲۰۰	
۵	۵۲۰۰-۵۳۰۰	
۷	۵۳۰۰-۵۴۰۰	
۸	بیش از ۵۴۰۰	

میزان امتیاز	دسته‌بندی زیر لایه‌های دما	ب
۲	کمتر از ۱۲	
۴	۱۲-۱۵	
۶	۱۵-۱۷	
۶	۱۷-۱۹	
۶	بیش از ۱۹	

میزان امتیاز	دسته‌بندی زیر لایه‌های سرعت باد	ج
۷	کمتر از ۲/۹	
۶	۲/۹-۳/۵	
۵	۳/۵-۴	
۴	۴-۴/۵	
۳	بیش از ۴/۵	

همان‌طور که مشاهده می‌شود نرخ سازگاری ۰/۰۰۰۱۴ درصد بوده که نشان دهنده دقت قابل قبول این مقایسه زوجی است. همچنین مجموع ضریب اهمیت معیارهای مورد بررسی یک می‌باشد که نشان دهنده نسبی بودن اهمیت هر یک از معیارها می‌باشد.

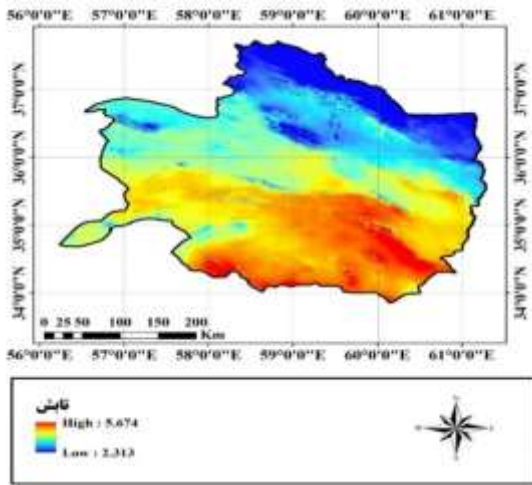
مقدار $CR = 0/1 < 0/00014$ بوده که نشان‌دهنده سازگاری مطلوب ماتریس مقایسه زوجی و حاکی از اعتبار بالای ساختار تصمیم‌گیری و دقت نظرات کارشناسی می‌باشد.

به‌منظور استفاده از انرژی خورشیدی در کلکتورهای خورشیدی، بررسی شدت تابش خورشید در مناطق مختلف خراسان رضوی برای تعیین مکان مناسب ضروری است. در این فرآیند، وزن هر معیار بر اساس اهمیت آن در راستای هدف تعیین می‌شود. ابتدا، معیارهای اصلی هر لایه به‌طور زوجی مقایسه می‌شوند. این مقایسه‌ها کمک می‌کنند تا اهمیت نسبی هر معیار نسبت به دیگر معیارها مشخص گردد. به‌این ترتیب، اولویت‌بندی صحیح برای تصمیم‌گیری در انتخاب مکان به دست می‌آید.

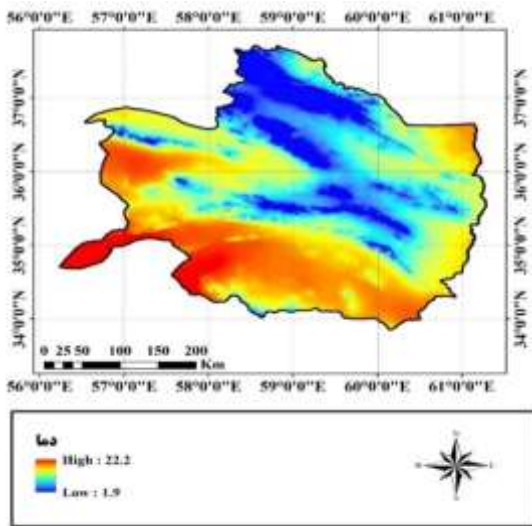
جدول (۵): معیارهای محیطی در مکان‌یابی کلکتورهای خورشیدی

زیر معیارها	امتیاز
تابش	۰/۵۳۳
دما	۰/۳۳۲
سرعت باد	۰/۱۳۵

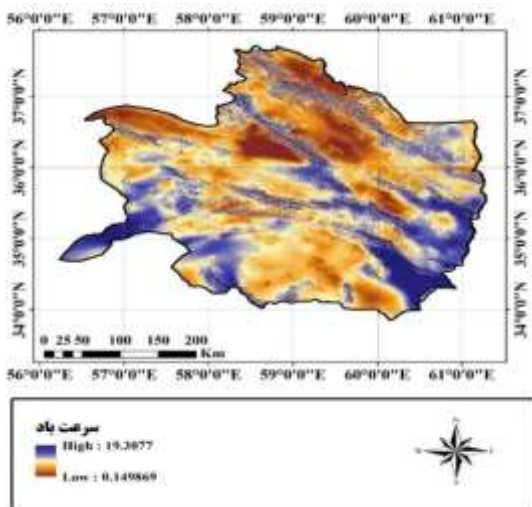
بر اساس جدول (۵) بیشترین و کمترین امتیاز لایه‌ها به ترتیب به معیار تابش با مقدار ۰/۵۳۳ و سرعت باید با مقدار ۰/۱۳۵ مشاهده شد؛ بنابراین حساسیت معیار تابش بیشتر، دما و سرعت باد در مراحل بعدی قرار گرفته است. از آنجایی که این سامانه‌ها برای عملکرد خود به نور خورشید وابسته هستند، انتخاب مناطقی با تابش مناسب حائز اهمیت است؛ بنابراین باید مناطقی انتخاب شوند که بیشترین میزان تابش را دریافت می‌کنند. در مقابل مناطقی که میزان تابش خورشید در آن‌ها پایین باشد برای احداث این سامانه‌ها مناسب نخواهند بود. بنابراین ارزیابی دقیق پتانسیل تابشی مناطق مختلف برای تصمیم‌گیری اهمیت بالایی دارد. بر اساس نظرات کارشناسان، میزان تابش کمتر از ۵۱۰۰ کیلووات ساعت بر مترمربع از کمترین امتیاز برخوردار است، در حالی که مقادیر بین ۵۱۰۰ تا ۵۲۰۰ کیلووات ساعت بر مترمربع بالاترین امتیاز را کسب کرده است. این مقادیر به‌طور خاص در جدول (۶-الف) و شکل (۶-الف) ارزش‌گذاری شده‌اند.



الف



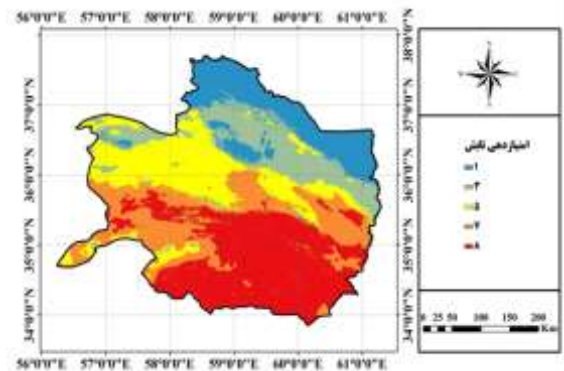
ب



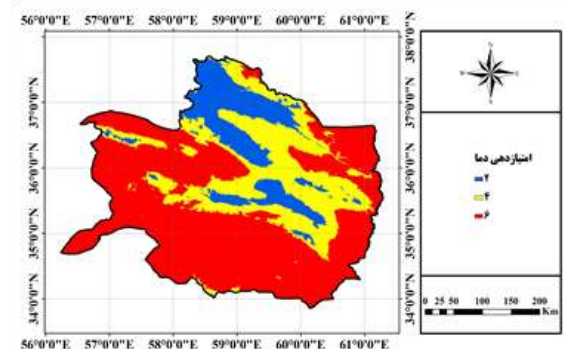
ج

شکل (۷): نقشه‌های معیار محیطی (الف) لایه تابش، (ب) دما

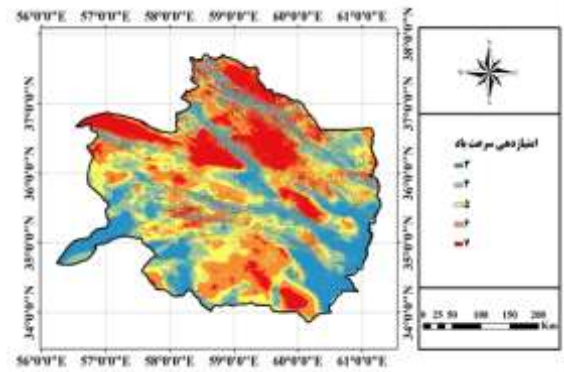
(ج) سرعت باد (متر بر ثانیه)



الف



ب



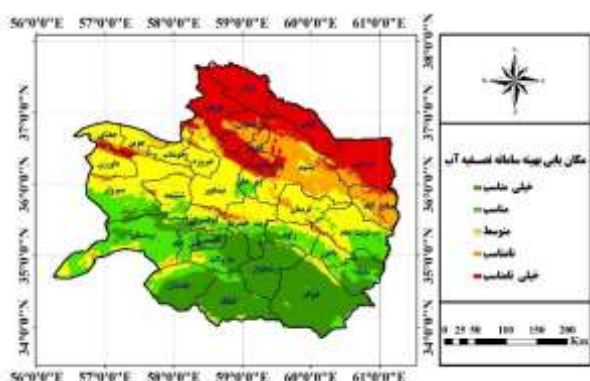
ج

شکل (۶): نقشه امتیازبندی شده لایه‌های محیطی: (الف) تابش، (ب)

دما، (ج) سرعت باد

میزان تابش خورشیدی تأثیر مستقیمی بر کارایی کلکتورهای خورشیدی دارد. بر اساس شکل (۷-الف)، مناطقی با بیشترین میزان تابش به رنگ قرمز در مناطق مرکزی به سمت جنوب نمایش داده شده‌اند، در مقابل، کمترین میزان تابش با رنگ آبی نشان داده شده و عمدتاً مربوط به مناطق شمال شرقی، شمالی و شمال غربی استان خراسان رضوی می‌باشد. همچنین بر اساس نقشه امتیازدهی تابش طبق نظر کارشناسان، امتیازها از کم به زیاد به ترتیب ۱، ۳، ۵، ۷ و ۸ مشاهده شدند.

شکل (۸) که بیانگر نقشه مکان‌یابی بهینه استقرار کلکتورهای خورشیدی استان خراسان رضوی است مناطق مناسب و خیلی مناسب در بخش شمال غربی استان در امتداد مرکز و شرق و بخش کمی از مناطق جنوبی به رنگ سبز کم‌رنگ و سبز پررنگ قرار گرفته است. مناطق نامناسب و خیلی نامناسب در امتداد شمال و به سمت غرب و در امتداد مرز افغانستان به سمت جنوب ادامه یافته است. همچنین در بخش‌هایی در امتداد جنوب شرقی به سمت غرب به صورت یک پهنه به رنگ نارنجی کم‌رنگ و قرمز پررنگ مشاهده می‌شود.



شکل (۸): نقشه مکان‌یابی بهینه استقرار کلکتورهای خورشیدی بر

اساس معیارهای محیطی

بر اساس جدول (۷) و شکل (۹)، حدود ۴۰ درصد از استان خراسان رضوی دارای پتانسیل مناسبی از نظر استقرار کلکتورهای خورشیدی می‌باشد. همچنین ۳۰ درصد از مناطق این استان دارای پتانسیل نامناسبی برای استقرار این سامانه‌ها هستند و بقیه مناطق از نظر استقرار کلکتورهای خورشیدی دارای پتانسیل متوسط هستند.

نقشه نهایی پتانسیل استقرار کلکتورهای خورشیدی در استان خراسان رضوی از طریق ترکیب خطی وزنی لایه‌های محیطی در محیط ArcGIS 10.8.2 تولید شد. داده‌های میانگین بلندمدت (۲۰۱۹-۲۰۰۰) معیارهای تابش جهانی، دمای سطحی و سرعت باد با دقت مکانی ۱ کیلومتر مربع از پلتفرم‌های Solargis و Global Wind Atlas استخراج گردید. پس از امتیازدهی هر لایه بر اساس نظر کارشناسان مطابق جدول (۵)، وزن‌های نهایی به روش AHP مطابق جدول با نرخ سازگاری قابل قبول (CR=۰/۰۰۰۱۴) تعیین شد. با اعمال فرمول ترکیبی در ابزار محاسبه‌گر رستری پتانسیل خروجی استان به ۵ کلاس پتانسیل شامل مناطق خیلی مناسب (۲۳/۸۳ درصد مساحت) عمدتاً در جنوب استان (تایباد، خواف)، مناطق خیلی نامناسب

مطابق با شکل (۷-ب) که بیانگر میانگین دمای سطحی است از شمال به سمت جنوب و جنوب غربی استان خراسان رضوی افزایش میانگین دمای سطحی مشاهده گردید. به طوری که هرچه دمای سطحی زمین بیشتر باشد فرآیند تبخیر افزایش پیدا می‌کند. بر اساس این نقشه بالاترین میانگین دما با ۲۲/۲ درجه سانتی‌گراد به رنگ قرمز منطبق بر مناطق جنوب غربی و غرب و در مقابل مناطق مرکزی و شمالی به سمت مرکز استان کمترین میانگین دما با مقدار ۱/۹ درجه سانتی‌گراد مشاهده شد. همچنین بر اساس نقشه امتیازدهی لایه دمایی بر اساس نظرات کارشناسان، در سه گروه با امتیازهای ۲، ۴ و ۶ مشاهده شدند که این نقشه بیانگر پتانسیل بالای دمایی استان از نظر میزان دما است.

با توجه به نقشه سرعت باد منطقه مطالعاتی، بیشترین سرعت باد در استان خراسان رضوی، در مناطق شرقی و جنوبی استان، مانند منطقه‌ی سرخس و تایباد، معمولاً بین ۳۰ تا ۴۰ کیلومتر بر ساعت ثبت می‌شود. در فصول گرم سال و در هنگام وقوع بادهای موسوم به «۱۲۰ روزه سیستان» این میزان می‌تواند افزایش یابد. کمترین سرعت باد معمولاً در مناطق مرکزی استان، مانند شهر مشهد، در روزهای آرام و بدون وزش خاص، به کمتر از ۵ کیلومتر بر ساعت می‌رسد. بر اساس شکل (۷-ج)، مناطق جنوب شرق و جنوب غربی استان بیشترین سرعت باد با مقادیر حدود ۱۹ متر بر ثانیه را تجربه می‌کنند. در مقابل، در مناطق شمالی و شمال غربی و بخش‌هایی از جنوب استان، سرعت باد تا مقدار کمتر از یک متر بر ثانیه کاهش یافته و در سطح پایین‌تری قرار دارد. علاوه بر این بر اساس نقشه امتیازدهی سرعت باد، اغلب مناطق شمالی، شمال غربی رو به سمت مرکز و بخش‌های کوچکی از مناطق جنوبی دارای امتیاز بالا و در نتیجه پتانسیل بادی قابل توجهی است.

نحوه محاسبه نقشه نهایی پتانسیل استان خراسان رضوی برای استقرار کلکتورهای خورشیدی به شرح زیر است که همان میانگین حسابی لایه‌ها در نرم‌افزار GIS صورت گرفت.

$$\text{(وزن لایه اول} * \text{ارزش لایه اول} + \text{وزن لایه دوم} * \text{ارزش لایه دوم} + \dots + \text{وزن لایه n ام} * \text{ارزش لایه n ام}) / \text{(مجموع وزن‌ها)}$$

پس از تهیه شاخص‌های مطالعاتی اقدام به تلفیق آن‌ها در نرم‌افزار GIS شد. بدین منظور ابتدا طبق فرمول بالا نقشه نهایی از مجموع وزن هر لایه در ارزش آن لایه تقسیم بر تعداد لایه‌ها به دست آمد. سپس مساحت هر یک از کلاس‌ها محاسبه شد. طبق

ارتفاعی در بازه ۱۵۰۰ تا ۲۰۰۰ متر، به دلیل سایه‌اندازی طبیعی کوه‌ها افزایش ابرناکی به‌ویژه در زمستان و بهار و جهت نامناسب شیب زمین نسبت به خورشید در بسیاری از دامنه‌ها تابش کمتری در محدوده ۴۱۰۰ تا ۴۷۰۰ kWh/m² در سال دریافت می‌کنند. به‌طور خاص، شیب جنوب‌شرق و جنوب‌غربی با زاویه ۱۰ تا ۲۵ درصد در ارتفاعات میانی، بهترین شرایط جذب تابش را دارند.

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش بر اساس نتایج AHP بیشترین امتیاز لایه‌ها به ترتیب به معیار تابش با مقدار ۰/۵۳۳، معیار دما با مقدار ۰/۳۳۲ و معیار سرعت باد با مقدار ۰/۱۳۵ اختصاص داده شد. همچنین بر اساس نقشه نهایی و محاسبه مساحت لایه نهایی از نظر استقرار کلکتورهای خورشیدی، حدود ۴۰ درصد از استان خراسان رضوی دارای پتانسیل مناسبی است. علاوه بر این ۳۰ درصد از مناطق این استان دارای پتانسیل نامناسبی برای استقرار این سامانه‌ها هستند. بر اساس نقشه نهایی و محاسبه مساحت لایه نهایی استان خراسان رضوی مکان‌های بهینه استقرار سامانه کلکتورهای خورشیدی بر اساس شهرستان‌های استان خراسان رضوی در ۵ کلاس، ۲۳/۸۳ درصد از مساحت این استان دارای پتانسیل خیلی مناسب، ۱۶/۱۱ درصد از مساحت این استان دارای پتانسیل مناسب، ۲۹/۶۴ درصد از مساحت این استان دارای پتانسیل متوسط، ۱۰/۸۴ درصد از مساحت این استان دارای پتانسیل نامناسب و ۱۹/۵۸ درصد از مساحت این استان دارای پتانسیل خیلی نامناسب دسته‌بندی شدند که در کل استان از نظر استقرار سامانه تصفیه‌کننده خورشیدی دارای پتانسیل قابل قبولی است.

در این تحقیق مکان‌های بهینه استقرار سامانه تصفیه‌کننده خورشیدی بر اساس شهرستان‌های استان خراسان رضوی در ۵ کلاس دسته‌بندی شدند.

الف) خیلی مناسب شامل شهرستان‌های نوار جنوبی نظیر تایباد، خواف، رشت خوار، گناباد، بجستان، شرق مه ولات، کاشمر و بخش‌هایی از جنوب تربت‌حیدریه و غرب زواره.

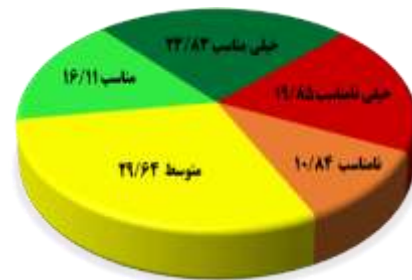
ب) مناسب شامل شهرستان‌های تربت‌جام، بخش جنوب باخزر، زاوه، تربت‌حیدریه، جنوب کوهسرخ، ششتمد، سبزواری، بردسکن، خلیل‌آباد، غرب مه ولات و شمال بجستان.

ج) متوسط شامل شهرستان‌های جغتای به سمت جوین و

۱۹/۵۸ درصد مساحت) در نواحی شمالی (سرخس، درگز) و سایر سطوح با پتانسیل نامناسب، متوسط و مناسب تقسیم‌بندی شد.

جدول (۷): درصد مساحت تفکیکی استان خراسان رضوی

تناسب	مساحت (درصد)
خیلی نامناسب	۱۹/۵۸
نامناسب	۱۰/۸۴
متوسط	۲۹/۶۴
مناسب	۱۶/۱۱
خیلی مناسب	۲۳/۸۳
مجموع	۱۰۰



شکل (۹): نمودار درصد مساحت تفکیکی مناطق استان خراسان رضوی بر اساس معیارهای محیطی

همان‌طور که از بخش تحلیل نتایج مربوط به مکان‌یابی حاصل گردید، تمرکز پتانسیل بالا در مناطق جنوبی استان مانند تایباد، خواف، بجستان ناشی از ترکیب دمای بالا، تابش مستقیم زیاد و کمترین میزان ابرناکی است. در مقابل، نواحی شمالی و ارتفاعات بینالود به دلیل ابرناکی بیشتر و تابش کمتر، پتانسیل کمتری دارند. همچنین نقش فلات‌های جنوبی و دشت‌های باز در ارتقاء شاخص تابش کاملاً مشهود است.

با بررسی تحلیل‌های مکانی مبتنی بر داده‌های ارتفاع رقومی زمین، مناطق جنوبی و شرقی استان مانند تایباد، خواف، تربت‌جام و زاوه دارای ارتفاعی بین ۷۰۰ تا ۹۰۰ متر از سطح دریا هستند. این نواحی به دلیل ارتفاع پایین‌تر، اقلیم بیابانی گرم و خشک، میزان ابرناکی بسیار کم و فقدان عوارض کوهستانی در افق محلی در طول سال، میزان تابش خورشیدی بالایی خشک ایران کاملاً هم‌راستا است.

در مقابل، ارتفاعات شمالی و مرکزی استان مانند رشته‌کوه بینالود و مناطق کوهستانی اطراف مشهد، نیشابور و کلات، با

مدیریت منابع آب در شرایط بحرانی حائز اهمیت است. بر اساس نقشه نهایی مکان یابی، مناطق جنوبی و جنوب غربی استان، نظیر تایباد، خواف، گناباد و بجستان در اولویت اول برای استقرار کلکتورهای خورشیدی قرار دارند. این اولویت به دلایل زیر قابل توجیه است:

- ۱- تابش خورشیدی بالا (بیش از ۵۴۰۰ کیلووات ساعت بر مترمربع در سال) در این نواحی.
 - ۲- دمای متوسط تا بالا که بهره‌وری تبخیری را افزایش می‌دهد.
 - ۳- نزدیکی به منابع آب شور در مناطق مرزی که می‌تواند با کلکتورهای خورشیدی مورد تصفیه قرار گیرد.
 - ۴- فاصله نسبتاً کم تا شبکه‌های جاده‌ای و برق روستایی که هزینه انتقال تجهیزات و اتصال اولیه را کاهش می‌دهد.
- مکان یابی دقیق کلکتورها در مجاورت منابع آبی غیرقابل استفاده نظیر چاه‌های شور، قنات‌های خشک شده یا پساب کشاورزی از منظر اقتصادی و پدافندی بهینه‌ترین انتخاب است. به‌طور نمونه، در منطقه تایباد، وجود نوار مرزی با افغانستان، شدت تابش بالا و منابع آب با شوری متوسط، شرایطی را فراهم می‌آورد که نصب کلکتورهای خورشیدی حرارتی برای تصفیه و تأمین آب اضطراری در سناریوهای قطع منابع انرژی یا تهدیدات زیستی کاملاً توجیه‌پذیر است [۳۱].

از نظر تخمین اقتصادی اولیه هزینه راه‌اندازی هر سامانه خورشیدی حرارتی خانگی بین ۸۰ تا ۱۵۰ میلیون تومان (در ظرفیت‌های کوچک) برآورد می‌شود که در مقایسه با هزینه‌های انتقال آب یا استفاده از دیزل ژنراتورها، بسیار مقرون‌به‌صرفه است [۲۹].

همچنین، هزینه نگهداری سالیانه این سامانه‌ها پایین و وابستگی آن‌ها به شبکه برق حداقلی است.

پیشنهاد‌های کلیدی اجرایی

- ۱- اولویت نصب در تایباد، خواف و گناباد با توجه به شرایط اقلیمی، منابع آبی و زیرساخت‌ها.
- ۲- اجرای آزمایشی محلی با حمایت نهادهای پدافند غیرعامل و شرکت‌های آب منطقه‌ای.
- ۳- مطالعه امکان تأمین انرژی موردنیاز سامانه‌های تصفیه با ترکیب کلکتور خورشیدی و باتری‌های ذخیره‌ساز.
- ۴- تحلیل ریسک محلی و تدوین سناریوهای تاب‌آوری برای استفاده از این سامانه‌ها در شرایط بحران مانند قطع برق یا تنش آبی شدید.

خوشاب و شمال ششتمد به سمت سبزوار، شمال و غرب تربت جام، غرب صالح‌آباد به سمت شرق مشهد، فریمان، زبرخان، نیشابور، فیروزه و شمال کوهسرخ.

د) نامناسب شامل شهرستان‌های نوار غربی صالح‌آباد به سمت جنوب غربی سرخس، مشهد، شمال بینالود، غرب گلپه‌هار، مرکز چناران.

ه) خیلی نامناسب شامل شهرستان‌های سرخس، کلات، درگز، قوچان، شمال و جنوب چناران، جنوب گلپه‌هار، بینالود و شمال شرقی مشهد.

در شرایط بحرانی همچون خشک‌سالی شدید یا تنش مرزی در مناطقی مانند تایباد، سامانه‌های غیرمتمرکز تصفیه آب خورشیدی می‌توانند به‌عنوان راهکاری کارآمد برای تأمین آب اضطراری عمل کنند. با توجه به داده‌های پژوهش صورت گرفته، تایباد دارای تابش خورشیدی در حدود 5400 kWh/m^2 در سال است که امکان استفاده پایدار از کلکتورهای خورشیدی برای نمک‌زدایی یا تصفیه منابع آبی سطحی را فراهم می‌سازد. این راهبرد، علاوه بر بهره‌وری محیط‌زیستی، منطبق با بند ۲ فصل ۴ نقشه راه ملی پدافند غیرعامل است که بر توسعه زیرساخت‌های غیرمتمرکز در مناطق آسیب‌پذیر برای افزایش تاب‌آوری ملی تأکید دارد.

۵- پیشنهاد‌های اجرایی و اولویت‌بندی

در این بخش مناطق دارای اولویت نصب کلکتورها مشخص شده و موارد زیر اشاره خواهد شد:

الف) تایباد و خواف به دلیل نزدیکی به منابع آب شور، تابش بالا و فاصله کم تا شبکه برق روستایی.

ب) بجستان و گناباد به دلیل شیب کم، نزدیکی به راه‌های دسترسی و تابش بالا.

تأکید بر امکان سنجی اقتصادی در این مناطق با محوریت هزینه نصب و نگهداری سامانه‌های خورشیدی غیرمتمرکز برای تصفیه آب، سناریوهای بحرانی پدافند غیرعامل مانند بحران آب در مناطق مرزی، آلودگی منابع سطحی یا قطع شبکه‌های انتقال آب و انرژی که اهمیت سامانه‌های خورشیدی را دوچندان می‌کند.

با توجه به نتایج به‌دست آمده از تحلیل مکانی مبتنی بر مدل AHP-GIS و با در نظر گرفتن معیارهای اقلیمی و محیطی، می‌توان پیشنهاد‌های اجرایی برای بهره‌برداری عملی از نتایج پژوهش ارائه داد که به‌ویژه در چارچوب پدافند غیرعامل و

تغییر اقلیم اخیر مانند تشدید خشک‌سالی پس از ۲۰۲۰ را پوشش نمی‌دهد. این موضوع با توجه به گزارش‌های شرکت آب منطقه‌ای خراسان رضوی در سال ۱۴۰۲ مبنی بر کاهش ۳۰ درصدی بارش نسبت به دوره مشابه، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

۶- مراجع

- [1] S. F. Moosavian, D. Borzuei, and A. Ahmadi, "Cost analysis of water quality assessment using multi-criteria decision-making approach," *Water Resources Management*, vol. 36, no. 12, pp. 4843–4862, 2022.
- [2] M. Razeghi, A. Hajinezhad, A. Naseri, Y. Noorollahi, and S. F. Moosavian, "Multi-criteria decision for selecting a wind farm location to supply energy to reverse osmosis devices and produce freshwater using GIS in Iran," *Energy Strategy Reviews*, vol. 45, p. 101018, 2023.
- [3] S. Arvandi, "Investigating the effect of smart irrigation systems on water consumption optimization in arid regions of Iran," *Water and Energy Engineering Journal*, vol. 3, no. 1, 2024. [in Persian]
- [4] A. Hanafi, "Climate change and water crisis in West Asia," *Quarterly Journal of Logistics and Defensive Technology*, vol. 6, no. 3, pp. 153–178, 2023. [Online]. Available: https://amfad.sndu.ac.ir/article_2664_c5f17512e5460ab5e1d066e0d13dad63.pdf. [in Persian]
- [5] R. K. Mishra, "Fresh water availability and its global challenge," *British Journal of Multidisciplinary and Advanced Studies*, vol. 4, no. 3, pp. 1–78, 2023.
- [6] S. Gorjian and B. Ghobadian, "Solar desalination: A sustainable solution to water crisis in Iran," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 48, pp. 571–584, 2015.
- [7] Islamic Republic News Agency, "Around 100% of Khorasan Razavi area affected by drought," 2025. [Online]. Available: https://www.irna.ir/news/85126361/. [in Persian]
- [8] M. K. Firozjaei et al., "An integrated GIS-based Ordered Weighted Averaging analysis for solar energy evaluation in Iran: Current conditions and future planning," *Renewable Energy*, vol. 136, pp. 1130–1146, 2019.
- [9] F. Jamadi, "Experimental study of solar concentrator collector performance," in 2nd National Conference on Environmental Engineering and Management, 2016. [Online]. Available: https://civilica.com/doc/689783/. [in Persian]
- [10] M. Khodi and A. Ziaei, "Application of GIS in optimal use of renewable energies," in 6th National Energy Conference, 2007. [Online]. Available: https://civilica.com/doc/18111/. [in Persian]
- [11] M. P. M. Sh. Eslami, "Report on the latest status of the country's water resources in 2020–2021: Current situation, consequences, and solutions," 2021. [Online]. Available: https://rc.majlis.ir/fa/report/show/1654990. [in Persian]
- [12] K. Abdolreza and A. Ashraf, "Investigation of the water crisis situation in Iran and the world," in 2nd National Conference on Water Crisis (Climate Change, Water, and Environment), 2014. [Online]. Available: https://civilica.com/doc/305642/

با توجه به محدودیت‌های زیرساختی موجود در برخی نواحی مانند سرخس یا مرزهای شرقی خواف، توصیه می‌شود در انتخاب دقیق مکان استقرار، عوامل فنی-اقتصادی مانند دسترسی به جاده، هزینه حمل، مالکیت زمین و امنیت منطقه‌ای نیز لحاظ شود. این کار می‌تواند در مرحله دوم مطالعه (امکان‌سنجی اقتصادی-عملیاتی) انجام پذیرد.

از محدودیت‌های این پژوهش می‌توان به دقت مکانی داده‌های مورد استفاده اشاره نمود. گرچه داده‌های تابش خورشیدی از پایگاه SolarGIS و داده‌های باد از Global Wind Atlas با دقت مکانی نسبتاً بالا (۱ کیلومترمربع) استخراج شده‌اند، اما این رزولوشن ممکن است برای تحلیل‌های جزئی‌تر، به‌ویژه در نواحی دارای ناهمواری‌های زیاد یا تنوع کاربری اراضی، کافی نباشد؛ به عبارت دیگر، در مناطقی که تغییرات میکرو اقلیمی مانند سایه‌اندازی موضعی، پستی‌وبلندی‌های کوچک یا تفاوت‌های رطوبتی موضعی نقش مؤثری در کارایی سامانه‌های انرژی دارند، این دقت ممکن است منجر به نادیده گرفتن عوامل محلی شود. همچنین، عدم دسترسی به داده‌های هم‌زمان و پیوسته از تمامی ایستگاه‌های هواشناسی منطقه موجب شده تا اعتبارسنجی کامل و کمی داده‌های جهانی با محدودیت مواجه شود. این موضوع می‌تواند بر صحت برخی نتایج تأثیر گذاشته و ضرورت استفاده از داده‌های میدانی تکمیلی در پژوهش‌های آینده را برجسته سازد.

مهم‌ترین محدودیت‌های داده‌ای این پژوهش عبارت‌اند از:

۱- مقیاس مکانی ناکافی: رزولوشن ۱ کیلومترمربع قادر به شناسایی تغییرات میکرو اقلیمی مانند اثرات جزیره حرارتی شهری، تغییرات باد در دره‌های باریک یا اختلاف تابش در شیب‌های پیچیده نیست. این محدودیت به‌ویژه در مناطق ناهمگون توپوگرافی نظیر ارتفاعات بینالود و کوهسرخ می‌تواند خطای موقعیت‌یابی تا ۲۰٪ ایجاد کند.

۲- عدم پوشش پارامترهای کلیدی: داده‌های رطوبت نسبی و آلودگی سطح زمین که بر بازده کلکتورها تأثیر مستقیم دارند، در تحلیل لحاظ نشده‌اند.

۳- شکاف اعتبارسنجی محلی: اگرچه داده‌های جهانی SolarGIS و GlobalWindAtlas به‌طور کلی دقیق هستند، اما در مناطق مرزی استان همچون سرخس و تایباد به دلیل کمبود ایستگاه‌های زمینی، ارزیابی موضعی امکان‌پذیر نبوده است.

۴- محدودیت زمانی: دوره ۲۰ ساله (۱۹۹۹–۲۰۱۹) روندهای

- power installations in Mediterranean using a GIS/AHP approach," *Renewable Energy*, vol. 141, pp. 64–75, 2019.
- [28] M. A. Günen, "A comprehensive framework based on GIS-AHP for the installation of solar PV farms in Kahramanmaraş, Turkey," *Renewable Energy*, vol. 178, pp. 212–225, 2021.
- [29] A. Ahmadi, M. Sarrafzadeh, S. Razavi, and M. Abbasjoobi, "Investigation of techno-economical replacement of solar distillation systems with household water purifiers," *Iranian Chemical Engineering Journal*, vol. 20, no. 119, pp. 7–21, 2021.
- [30] M. H. Esfe et al., "Optimization of solar still equipped with TEC by Taguchi and genetic algorithm methods: A case study for sustainable drinking water supply in Sistan and Baluchestan villages," *Journal of Cleaner Production*, vol. 380, p. 135020, 2022.
- [31] J. Romero-Ramos et al., "A GIS-AHP approach for determining the potential of solar energy to meet the thermal demand in southeastern Spain productive enclaves," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 176, p. 113205, 2023.
- [32] A. Khan, Y. Ali, and D. Pamucar, "Solar PV power plant site selection using a GIS-based non-linear multi-criteria optimization technique," *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 30, no. 20, pp. 57378–57397, 2023.
- [33] S. Noori, R. Ghasemlounia, and A. M. Noori, "Site suitability in water harvesting management using remote sensing data and GIS: Case study of Sulaymaniyah Province, Iraq," in *Climate Change, Agriculture and Society*, A. Alam and Rukhsana, Eds. Cham: Springer, 2023, pp. 227–257.
- [34] P. Gopi and C. Muthusamy, "Integrated design of stepped solar still with internal glass reflector for environmental desalination," *Global NEST Journal*, vol. 25, no. 9, pp. 142–149, 2023.
- [35] Meteorological Organization of Iran, "Climatic data of synoptic stations." [Online]. Available: [\[https://www.irimo.ir\]](https://www.irimo.ir) (<https://www.irimo.ir>). [in Persian]
- [36] Khorasan Razavi Meteorological Office, "Climate of the Province," 2025. [Online]. Available: [\[https://razavimet.ir/fa/pages/26/show\]](https://razavimet.ir/fa/pages/26/show) (<https://razavimet.ir/fa/pages/26/show>). [in Persian]
- [37] Khorasan Razavi Meteorological Office, "Drought analysis of the province," 2025. [Online]. Available: [\[https://razavimet.ir/fa/pages/23/show\]](https://razavimet.ir/fa/pages/23/show) (<https://razavimet.ir/fa/pages/23/show>). [in Persian]
- [38] T. L. Saaty, "A scaling method for priorities in hierarchical structures," *J. Math. Psychol.*, vol. 15, no. 3, pp. 234–281, 1977.
- [39] T. L. Saaty, "Decision making with the analytic hierarchy process," *Int. J. Services Sciences*, vol. 1, no. 1, pp. 83–98, 2008.
- [40] T. L. Saaty, "The analytic hierarchy process (AHP)," *J. Oper. Res. Soc.*, vol. 41, no. 11, pp. 1073–1076, 1980.
- [41] E. Forman and K. Peniwati, "Aggregating individual judgments and priorities with the analytic hierarchy process," *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 108, no. 1, pp. 165–169, 1998.
- [42] V. Rahmatinia and D. Mokhtari, "Locating defense centers from a passive defense perspective in northwest Iran using GIS," *Passive Defense*, vol. 12, no. 1, pp. 65–80, 2021. [Online]. Available: [\[https://pd.ihu.ac.ir/article_205820_6fde4428076758a8a67fcec0e2476045.pdf\]](https://pd.ihu.ac.ir/article_205820_6fde4428076758a8a67fcec0e2476045.pdf) (https://pd.ihu.ac.ir/article_205820_6fde4428076758a8a67fcec0e2476045.pdf). [in Persian]
- [43] M. Eskandari, A. Khazaei Poul, and M. Karimi, "Practical management of wastewater treatment in water-intensive industries using AHP," *Water and Energy Engineering Journal*, vol. 1, no. 1, 2023. [in Persian]
- [44] M. A. Abdelkareem et al., "Recent progress in the use of renewable energy sources to power water desalination plants," *Desalination*, vol. 435, pp. 97–113, 2018.
- [45] M. K. Manesh et al., "Energy, exergy, exergoeconomic, and exergoenvironmental analysis of an innovative solar-geothermal-gas driven polygeneration system," *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 51, p. 101861, 2022.
- [46] E. J. Okampo and N. Nwulu, "Techno-economic evaluation of reverse osmosis desalination system considering emission cost and demand response," *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 46, p. 101252, 2021.
- [47] A. Hosseini, F. Ramezani, and M. Mirhosseini, "Solar and wind energy potential assessment for Razavi Khorasan Province in Iran," *Journal of Central South University*, vol. 31, no. 6, pp. 2027–2038, 2024.
- [48] A. Khezerlou and P. Shafipour Yourdshahi, "Location and architectural design of urban office spaces with a passive defense approach (Case Study: Zone 4 of Tabriz City)," *Spatial Planning*, vol. 14, no. 1, pp. 63–86, 2024.
- [49] Passive Defense Organization, "National Passive Defense Document," 2019. [Online]. Available: [\[https://dafa.ir/\]](https://dafa.ir/) (<https://dafa.ir/>). [in Persian]
- [50] S. A. Mahdinia, A. Saeedi, and A. Abazarnajad, "GIS application in locating public (multipurpose) shelters in Qeshm Island using AHP method," *Passive Defense*, vol. 6, no. 4, 2016. [Online]. Available: [\[https://pd.ihu.ac.ir/article_200677_b3740c871cf24c44e2910273b3e25862.pdf\]](https://pd.ihu.ac.ir/article_200677_b3740c871cf24c44e2910273b3e25862.pdf) (https://pd.ihu.ac.ir/article_200677_b3740c871cf24c44e2910273b3e25862.pdf). [in Persian]
- [51] A. Saeedi and M. Dejpasand, "Site selection and analysis of temporary settlement in crisis conditions with emphasis on man-made threats (Case study: Region 1, Kermanshah City)," *Passive Defense*, vol. 15, no. 4, pp. 11–24, 2024. [Online]. Available: [\[https://pd.ihu.ac.ir/article_209343_028da262b2f2a94dc96bd59c255f74b5.pdf\]](https://pd.ihu.ac.ir/article_209343_028da262b2f2a94dc96bd59c255f74b5.pdf) (https://pd.ihu.ac.ir/article_209343_028da262b2f2a94dc96bd59c255f74b5.pdf). [in Persian]
- [52] A. Pakandish, "Locating desalination facilities in the southern coasts of Bushehr province using the analytic hierarchy process (AHP) and GIS system," 2018.
- [53] Karimi, Haji, Zorvash, and Vaezi, "Application of GIS and AHP in determining potential areas for groundwater in Mehran Plain – Ilam Province," *Hydrogeomorphology*, vol. 5, no. 16, pp. 1–22, 2018. [in Persian]
- [54] Silakhori, Onaq, and S. Sardo, "Risk assessment of desertification using TOPSIS-GIS (Case Study: Bashthin-Sabzevar, Khorasan Razavi)," *Geographical Studies of Arid Regions*, vol. 9, no. 35, pp. 44–59, 2019. [in Persian]
- [55] Shahbazi, Sahebi, Hadi, Makoui, and Ahmad, "Location and design of electricity distribution network model for solar, wind, and small-scale gas plants," *Industrial Management Perspective*, vol. 10, no. 3, pp. 143–170, 2020. [in Persian]
- [56] A. Tayyar, M. Rezvan, and H. Hashemi Dezaki, "Site evaluation for large-scale solar power plants using GIS, AHP, and TOPSIS (Case Study: Karbala, Iraq)," *Energy Engineering and Management*, vol. 9, no. 4, pp. 60–73, 2020, doi: 10.22052/9.4.10. [in Persian]
- [57] N. Samani and Tahouni, "Site suitability assessment for solar farms using GIS and multi-criteria decision-making methods (Case study: East Azerbaijan Province)," *Human Geography Research*, vol. 51, no. 3, pp. 747–764, 2019. [in Persian]
- [58] M. Giamalaki and T. Tsoutsos, "Sustainable siting of solar