



The University of Tehran Press

Multi-Criteria GIS Analysis of Solar Energy Deployment in Alborz Province: A Case Study on 10 MW PV Plant Siting and Environmental Impact

Reza Mokhtari¹ | Negin Mirzaei^{2*} | Shayesteh Ebrahimi Zaker³ | Mahmood Abdoos⁴

1. M.Sc. Student, School of Energy Engineering and Sustainable Resources, College of Interdisciplinary Science and Technology, University of Tehran, Tehran, Iran. Email: reza_mokhtari@gmail.com

2. Corresponding Author, Ph.D. Student, School of Energy Engineering and Sustainable Resources, College of Interdisciplinary Science and Technology, University of Tehran, Tehran, Iran. Email: neginemirzaei@ut.ac.ir

3. Ph.D. Student, School of Energy Engineering and Sustainable Resources, College of Interdisciplinary Science and Technology, University of Tehran, Tehran, Iran. Email: ebrahimizaker.sh@ut.ac.ir

4. Ph.D. Student, School of Energy Engineering and Sustainable Resources, College of Interdisciplinary Science and Technology, University of Tehran, Tehran, Iran. Email: mahmood.abdoos@ut.ac.ir

ARTICLE INFO

Article type:
Research Paper

Article History:

Received: 22 May 2025

Revised: 21 July 2025

Accepted: 22 September 2025

Published Online: 15 January 2025

Keywords:

Solar energy,
Geographical Information System,
Alborz province.

ABSTRACT

One of the criteria for achieving sustainable development in any country is using renewable resources. The first step to take advantage of these resources is potential assessment of areas in order to identify the most suitable place for the construction of power plants from renewable resources or the installation of equipment. Among renewable resources, solar energy has received a lot of attention due to its many benefits and its rapid enhancement of operational equipment. Therefore, in this article, the potential of solar energy in Alborz province has been studied. Based on the figures obtained from the GIS software, suitable places for generating power from photovoltaic systems have been estimated and classified in two proper groups consisting of medium and good potential of solar radiation. The total extractable electric power from solar radiation of Alborz province has been calculated and by comparing the amount of power produced by this power plant with a conventional thermal power plant, the amount of prevented emission of pollutants by this renewable plant during one year has been calculated. According to the obtained results, with the construction of a 10 MW photovoltaic power plant in the middle areas of Savojbolagh and Karaj, the emission of 8200 tons of carbon will be prevented annually compared to fossil fuels and constructing the same power plant in Eshtehard and parts of Nazarabad will lead to prevent 7400 tons of carbon emission annually.

Cite this article: Mokhtari, R.; Mirzaei, N.; Ebrahimi Zaker, Sh. & Abdoos, M. (2026). Multi-Criteria GIS Analysis of Solar Energy Deployment in Alborz Province: A Case Study on 10 MW PV Plant Siting and Environmental Impact. *Journal of Sustainable Energy Systems*, 5 (1), 107-119. DOI: <http://doi.org/10.22059/ses.2025.394064.1138>



© Reza Mokhtari, Negin Mirzaei, Shayesteh Ebrahimi Zaker, Mahmood Abdoos

Publisher: University of Tehran Press.

DOI: <http://doi.org/10.22059/ses.2025.394064.1138>

1. Introduction

The increasing global demand for energy, driven by population growth and industrialization, has led to concerns over the depletion of fossil fuels and the environmental consequences of their use. In response, many countries are shifting their focus toward renewable energy sources. Among them, solar energy stands out as a clean, abundant, and sustainable option. Located on the global solar belt, Iran receives significant solar radiation, making solar power a strategic solution for the country's growing energy needs. Alborz Province, as one of Iran's key industrial and urban regions, has emerged as a promising candidate for solar energy deployment.

2. Materials and Methods

To assess the solar energy potential in Alborz Province, Geographic Information System (GIS) tools were used to analyze spatial solar radiation data across the region. Areas with insufficient solar irradiance ($<1200 \text{ Wh/m}^2$), steep slopes (elevations $>1500 \text{ m}$), and limited land availability (<16 hectares) were excluded. The remaining zones were categorized into two classes: areas with medium potential (average 1420 Wh/m^2) and high potential (average 1570 Wh/m^2). A hypothetical 10 MW solar power plant utilizing monocrystalline PV panels with 18.5% efficiency was modeled to evaluate power output and environmental impact in these zones.

3. Results

The GIS analysis identified central regions of Karaj and Savojbolagh as high-potential zones, while Eshtehard and parts of Nazarabad were classified as medium-potential areas. The estimated annual electricity output of the 10 MW plant was 30.52 GWh in high-potential zones and 25.9 GWh in medium-potential zones which means an 18% increase in favor of the high-potential sites. From an environmental perspective, replacing a thermal power plant of the same capacity with solar generation would result in the annual reduction of approximately 8,200 tons of CO_2 in high-potential regions and 7,400 tons in medium-potential ones. Additionally, significant reductions in NO_x and SO_2 emissions were calculated, contributing to improved air quality in the province.

4. Conclusion

The study highlights the importance of precise site selection in maximizing the efficiency and environmental benefits of solar power installations. While northern mountainous areas such as Taleghan and northeastern Karaj are unsuitable due to topographic constraints, central regions of Alborz offer ideal conditions for utility-scale solar power development. The findings underscore that constructing solar farms in high-potential areas not only yields greater electricity output but also significantly mitigates pollution. This is an especially valuable outcome for urbanized and industrialized provinces like Alborz. These insights provide a solid basis for regional energy planning and investment in renewable infrastructure.



تحلیل چندمعیاره مکانی برای توسعه انرژی خورشیدی در استان البرز: مطالعه موردی مکان‌یابی و اثرات زیست‌محیطی نیروگاه ۱۰ مگاواتی فتوولتائیک

رضا مختاری^۱ | نگین میرزایی^{۲*} | شایسته ابراهیمی ذاکر^۳ | محمود عبدوس^۴

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی انرژی‌های تجدیدپذیر، دانشکده مهندسی انرژی و منابع پایدار، دانشکده‌های میان‌رشته‌ای دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: reza_mokhtari@gmail.com
۲. نویسنده مسئول، دانشجوی دکتری مهندسی سیستم‌های انرژی دانشکده مهندسی انرژی و منابع پایدار، دانشکده‌های میان‌رشته‌ای دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: neginemirzaei@ut.ac.ir
۳. دانشجوی دکتری مهندسی سیستم‌های انرژی دانشکده مهندسی انرژی و منابع پایدار، دانشکده‌های میان‌رشته‌ای دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: ebrahimzaker.sh@ut.ac.ir
۴. دانشجوی دکتری مهندسی سیستم‌های انرژی دانشکده مهندسی انرژی و منابع پایدار، دانشکده‌های میان‌رشته‌ای دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: mahmood.abdoos@ut.ac.ir

اطلاعات مقاله

چکیده

نوع مقاله:

پژوهشی

تاریخ‌های مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۳/۰۱

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۴/۳۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۳۱

تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۱۰/۲۵

کلیدواژه:

انرژی خورشیدی،
سیستم اطلاعات جغرافیایی،
استان البرز.

از جمله ملاک‌های دستیابی هر کشور به توسعه پایدار، میزان استفاده از منابع تجدیدپذیر است. اولین قدم برای بهره‌گیری از این منابع، پتانسیل‌سنجی مناطق به منظور شناسایی مناسب‌ترین مکان برای احداث نیروگاه‌های برق با منبع انرژی تجدیدپذیر و یا نصب تجهیزات مورد نظر است. از میان منابع تجدیدپذیر، انرژی خورشیدی به دلیل داشتن مزایای فراوان به‌شدت مورد توجه قرار گرفته و تجهیزات بهره‌برداری از آن با سرعت زیادی در حال پیشرفت است. در مقاله پیش رو به بررسی پتانسیل انرژی خورشیدی در استان البرز پرداخته شده است و براساس نقشه‌های حاصل از نرم‌افزار سیستم اطلاعات جغرافیایی، مکان‌های مناسب برای تولید توان از سیستم‌های فتوولتائیک محاسبه شده و در دو دسته به منظور احداث نیروگاه با پتانسیل تابش خورشیدی متوسط و خوب قرار داده شده‌اند. در نهایت، کل توان الکتریکی قابل استحصال از آن‌ها تخمین زده شده است. با مقایسه مقدار توان تولیدی این نیروگاه با یک نیروگاه حرارتی، میزان کاهش انتشار آلاینده طی یک سال، محاسبه شده است. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، احداث یک نیروگاه ۱۰ مگاواتی در مناطق میانی شهرستان ساوجبلاغ و کرج، باعث جلوگیری از انتشار ۸۲۰۰ تن کربن به صورت سالانه می‌شود و با احداث همین نیروگاه در شهرستان اشتهارد و قسمت‌هایی از نظرآباد، می‌توان از انتشار ۷۴۰۰ تن کربن به صورت سالانه جلوگیری کرد.

استناد: مختاری، رضا؛ میرزایی، نگین؛ ابراهیمی ذاکر، شایسته و عبدوس، محمود (۱۴۰۴). تحلیل چندمعیاره مکانی برای توسعه انرژی خورشیدی در استان البرز: مطالعه موردی مکان‌یابی و اثرات زیست‌محیطی نیروگاه ۱۰ مگاواتی فتوولتائیک. فصلنامه سیستم‌های انرژی پایدار، ۵ (۱) ۱۰۷-۱۱۹.

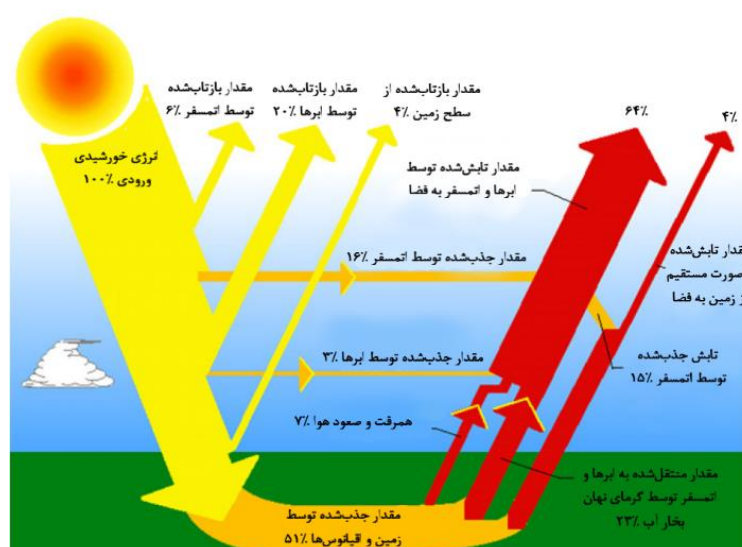
DOI: <http://doi.org/10.22059/ses.2025.394064.1138>



۱. مقدمه

افزایش جمعیت از یک سو و صنعتی شدن جوامع از سوی دیگر، به افزایش مصرف انرژی منجر شده است [۱ و ۲]. براساس آمارهای آژانس بین‌المللی انرژی، بخش عمده انرژی مصرفی جهان از سوخت‌های فسیلی تأمین می‌شود [۳]. این منابع که خطر به اتمام رسیدنشان جهان را تهدید می‌کند، مشکلات فراوانی برای کره زمین و انسان‌ها به وجود می‌آورند که از میان آن‌ها می‌توان به گرمایش کره زمین به سبب انتشار گازهای گلخانه‌ای و آلودگی هوا و محیط زیست اشاره کرد. از این رو، بیشتر کشورهای توسعه‌یافته و درحال توسعه، به دنبال بهره‌گیری از منابع تجدیدپذیر و جایگزین کردن آن‌ها به جای منابع فسیلی هستند [۴]. با استفاده از منابع تجدیدپذیر می‌توان از مشکلات ناشی از سوختن منابع فسیلی جلوگیری کرد و از این منابع برای تولید محصولاتی با ارزش افزوده بالاتر بهره گرفت [۵ و ۶].

یکی از منابع انرژی تجدیدپذیر، خورشید است که سرچشمه اصلی نور، انرژی، گرما و زندگی روی کره زمین است. بر اثر همجوشی هسته‌ای در خورشید، ماده به انرژی تبدیل می‌شود. در هر ثانیه تقریباً 4.4×10^9 کیلوگرم از جرم خورشید به تابش تبدیل می‌شود که مقدار این جرم معادل 3.8×10^{26} ژول انرژی در ثانیه است [۷]. با توجه به شکل ۱، تمام این انرژی به سطح زمین نمی‌رسد، مقداری از آن منعکس و بخشی، جذب لایه‌های اتمسفر می‌شود [۸]. در نهایت، حدود ۶۶٪ وات بر متر مربع از این انرژی به صورت نور مرئی، فروسرخ و فرابنفش به زمین می‌رسد. اگر تنها ۰/۱ درصد از انرژی خورشید که به سطح کره زمین رسیده با بازده ۱۰ درصد به انرژی الکتریکی تبدیل شود، می‌توان حدود ۳ هزار گیگاوات توان الکتریکی تولید کرد که این مقدار چهار برابر بیشتر از انرژی مصرفی سالیانه جهان است [۷]. یکی از روش‌های بهره‌گیری از این انرژی، احداث نیروگاه‌های خورشیدی است، اما اگر ساخت این تأسیسات بدون برنامه‌ریزی و مطالعه انجام شود، معضلات جدی به همراه خواهد داشت. از این رو، مطالعات گسترده‌ای در جهان و ایران روی موضوع انجام گرفته است.



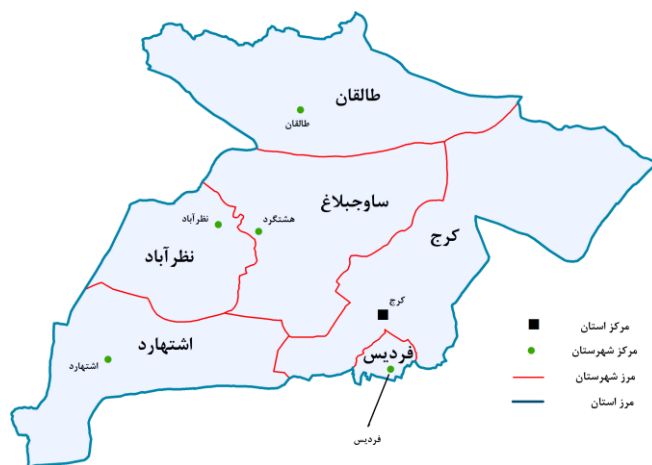
شکل ۱. بودجه‌بندی انرژی خورشیدی زمین [۸]

لوزانو و همکاران [۹] در مطالعه‌ای موردی در منطقه موریسیا واقع در جنوب شرقی اسپانیا، شاخص‌های مکان‌یابی را به دو دسته معیارها و محدودیت‌ها تقسیم کردند. از جمله عوامل محدودکننده می‌توان به مناطق محافظت‌شده، مناطق نظامی، مناطق شهری، زمین‌های ارزشمند، بستر رودخانه‌ها و نهرها، جاده‌ها و راه‌آهن، فرودگاه‌ها و پارک‌ها اشاره کرد که به سبب وجود آن‌ها، مساحت مورد مطالعه کاهش می‌یابد. از میان معیارها نیز می‌توان به میزان دسترسی به شبکه انتقال برق، فاصله از مراکز جمعیت، عوامل مربوط به محیط زیست و همچنین، عوامل فنی نظیر دمای هوا و میزان تابش خورشید اشاره کرد. این معیارها زمین‌های مورد مطالعه را ارزش‌گذاری می‌کنند. یوسفی و همکاران [۱۰] در مقاله خود تحت عنوان «پتانسیل سنجی انرژی خورشیدی برای تولید برق در کرانه‌های اقیانوسی جنوب شرقی ایران، با استفاده از داده‌های جغرافیایی و نقشه تابش انرژی خورشیدی ایران»،

پتانسیل تولید برق فتوولتائیک را در کرانه‌های اقیانوسی جنوب شرقی ایران برآورد کردند. همچنین، با به‌کارگیری معیارهای محدودکننده مکانی، میزان تولید توان الکتریکی در مقیاس نیروگاهی را محاسبه کردند. براساس نتایج مطالعه یادشده، کرانه‌های اقیانوسی جنوب شرقی ایران از پتانسیل بالایی از انرژی‌های تجدیدپذیر برخوردارند که می‌توانند به منظور توسعه منطقه مکران در زمینه‌های مختلف عمل کنند. اسفندیاری و همکاران [۱۱] در مقاله‌ای با بررسی عوامل مؤثر بر انرژی خورشیدی که دربرگیرنده پارامترهایی همچون ابرناکی، گردوغبار، رطوبت نسبی، بارش سالانه و غیره است و با استفاده از محیط نرم‌افزار سیستم اطلاعات جغرافیایی، مناطق مستعد استان خوزستان را شناسایی کردند. یوسفی و همکاران در مطالعه‌ای [۱۲] پس از بررسی شاخص‌ها و معیارهای مؤثر در مکان‌یابی نیروگاه خورشیدی، با استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره برای انتخاب اولویت‌بندی مکان‌های پیشنهادی، محل‌های مناسب برای احداث نیروگاه‌های خورشیدی در استان تهران را مشخص کردند و با بهره‌گیری از نرم‌افزار سیستم اطلاعات جغرافیایی، اطلاعات مورد نیاز برای مدیریت بهینه منابع و امکانات را فراهم آوردند. با توجه به اهمیت ارزیابی شاخص‌های مکانی برای تعیین مناسب‌ترین محل احداث نیروگاه خورشیدی، در این پژوهش پتانسیل انرژی خورشیدی در استان البرز مورد تحلیل قرار گرفته است.

۲. منطقه مورد مطالعه

کوچک‌ترین استان ایران در بین ۳۱ استان این کشور، استان البرز به مرکزیت شهر کرج است. این استان در طول جغرافیایی ۳۵.۹۹۶۰ شمالی و عرض جغرافیایی ۵۰.۹۲۸۹ شرقی، در دامنه کوه‌های البرز واقع شده است. با تقسیم استان تهران سابق به دو استان تهران و البرز، با تصویب نمایندگان مجلس شورای اسلامی در هفتم تیرماه ۱۳۸۹ این استان به طور رسمی شکل گرفت [۱۳]. براساس سرشماری ملی در سال ۱۳۹۵، جمعیت استان البرز با مساحت ۵۸۳۳ کیلومتر مربع، حدود ۲ میلیون و ۷۱۲ هزار نفر است که از این تعداد، ۹۰/۵ درصد در مناطق شهری زندگی می‌کنند [۱۴]. با توجه به شکل ۲ استان البرز دارای شش شهرستان کرج، ساوجبلاغ، طالقان، نظرآباد، اشتهارد و فردیس است [۱۵]. بر اساس اعداد درج‌شده در جدول ۱، کرج چهارمین شهر پرجمعیت ایران پس از شهرهای تهران، مشهد و اصفهان محسوب می‌شود که بیشترین تراکم جمعیت را به خود اختصاص داده و همچنین پس از تهران، بزرگ‌ترین شهر مهاجرپذیر ایران است و یکی از کلان‌شهرهای کشور به شمار می‌رود [۱۳].



شکل ۲. نقشه استان البرز و شهرستان‌های آن

جدول ۱. تراکم جمعیت پرجمعیت‌ترین شهرهای ایران

نام شهر	جمعیت (میلیون نفر)	مساحت (کیلومتر مربع)	تراکم جمعیت (نفر بر کیلومتر مربع)
تهران	۶۹۴.۸	۷۳۰	۵۹.۱۱۹۰
مشهد	۰.۱۰۳	۳۲۸	۳۹.۹۱۴۹
اصفهان	۹۶۱.۱	۵۵۱	۹۸.۳۵۵۸
کرج	۵۹۲.۱	۱۶۲	۱۶.۹۸۳۷

۳. وضعیت مصرف و تولید برق در استان البرز

کشور ایران روی کمر بند خورشیدی جهان قرار دارد و با داشتن بیش از ۲۳۱۱ ساعت آفتابی در سال، یکی از مناطق بسیار مستعد برای بهره‌گیری از انرژی تابشی خوشید است [۱۶]. بر اساس آمارهای وزارت نیرو، ظرفیت نصب‌شده نیروگاهی کشور در بخش انرژی‌های تجدیدپذیر در سال ۱۳۹۴ تنها شامل ۱ درصد از سبد انرژی بوده است [۱۷]. جمهوری اسلامی ایران در برنامه ششم توسعه، تولید حداقل ۵ هزار مگاوات از انرژی الکتریکی کشور از منابع تجدیدپذیر را تا سال ۱۴۰۰ برنامه‌ریزی کرده که این میزان معادل ۵ درصد از کل انرژی کشور است [۳ و ۱۷]. در این راستا، بهره‌گیری و تولید الکتریسیته از منابع تجدیدپذیر خورشیدی و بادی در رأس برنامه‌های استان البرز قرار گرفته است. پس از برگزاری جلسات متعدد و بازدیدهای میدانی، به منظور استعدادیابی اراضی مناسب برای احداث نیروگاه‌های خورشیدی، ابتدا ۲ هزار هکتار و سپس ۸۰۰ هکتار از اراضی ملی در شهرستان اشتهارد توسط اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان البرز به منظور پروژه نیروگاه‌های خورشیدی تخصیص داده شد و نقشه یوتی‌ام^۱ این اراضی توسط اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان البرز و شرکت برق منطقه‌ای تهران تهیه شد [۱۸]. از مزایای مهم این منطقه برای احداث نیروگاه خورشیدی می‌توان به موارد زیر اشاره کرد [۱۸]:

- در نزدیکی کلان‌شهر کرج و همچنین، پایتخت قرار دارد و جاده اشتهارد امکان دسترسی به محل و انتقال مصالح و تجهیزات را تسهیل می‌کند.
- شهرستان اشتهارد که در ضلع جنوب غربی استان البرز واقع شده دارای حداقل تابش ۵ کیلووات ساعت بر مترمربع است که از مناطق مستعد و دارای پتانسیل بسیار بالا در منطقه محسوب می‌شود.
- با توجه به اینکه بخش رحمانیه شهرستان اشتهارد جزء مناطق کم‌توسعه‌یافته و یکی از شهرستان‌های پایلوت اقتصاد مقاومتی کشور است، بنابراین زمینه توسعه اقتصادی منطقه را فراهم می‌آورد و باعث افزایش اشتغال و گردشگری خواهد شد.
- وجود چندین شهرک صنعتی در شهرستان اشتهارد که می‌توانند مصرف‌کننده انرژی تولیدشده باشند و مشکلات قطعی برق شرکت‌های واقع در شهرک‌های صنعتی به‌خصوص در تابستان مرتفع شود.
- نزدیکی به شبکه فوق توزیع اشتهارد که باعث تسهیل اتصال به شبکه سراسری می‌شود و باعث کاهش هزینه‌های سرمایه‌گذاری می‌شود.

استان البرز حدود ۲/۰۱۳ درصد از کل تولید برق ایران را در بخش‌های مختلف خود مورد استفاده قرار می‌دهد. با توجه به شکل ۳ و براساس مقادیر محاسبه‌شده در جدول ۲: بخش خانگی ۳۶ درصد، بخش خانگی ۳۵/۷۷ درصد، بخش تجاری ۹/۵۸ درصد، بخش صنعتی ۲۹/۹۱ درصد، بخش کشاورزی ۱۲/۱۳ درصد، بخش عمومی ۱۰/۳۸ درصد و سایر مصرف‌کنندگان ۲/۲۳ درصد از کل این میزان مصرف را به خود اختصاص می‌دهند [۱۹ و ۲۰].



شکل ۳. میزان مصرف برق در بخش‌های مختلف استان البرز [۲۱]

در حال حاضر، استان البرز ۲ درصد از کل برق را تولید می‌کند، اما ۲/۰۱۳ درصد مصرف می‌کند. هیچ نیروگاهی در دست احداث وجود ندارد، در حالی که مصرف سالانه ۴/۵ درصد رشد می‌یابد [۱۹]. بخش مدیریت تولید و توزیع برق البرز باید تلاش‌های خود را روی مواجهه با این رشد پیوسته تقاضا، متمرکز سازد. توسعه منابع انرژی تجدیدپذیر می‌تواند به رفع این تقاضای انرژی افزایش یابد.

جدول ۲. میزان مصرف انرژی در بخش‌های مختلف استان البرز [۲۱]

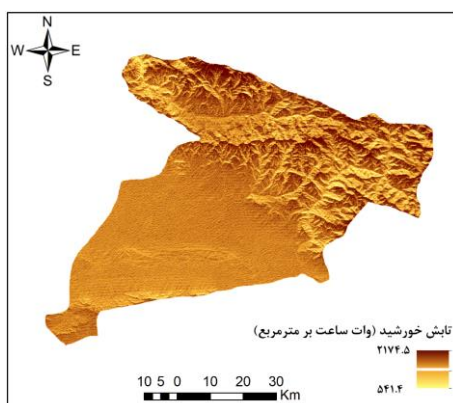
بخش مصرف‌کننده انرژی	میزان مصرف انرژی (درصد)	میزان مصرف انرژی (مگاوات ساعت)
خانگی	۳۵.۷۷	۲۰۸۰۷۸۷
تجاری	۹.۵۸	۵۵۷۳۱۶
صنعتی	۲۹.۹۱	۱۷۴۰۱۰۵
عمومی	۱۰.۳۸	۶۰۳۷۷۲
کشاورزی	۱۲.۱۳	۷۰۵۷۲۲
سایر مصرف‌کنندگان	۲.۲۳	۱۲۹۹۶۵
مجموع	۱۰۰	۵۸۱۱۷۶۶۷

۴. پتانسیل سنجی

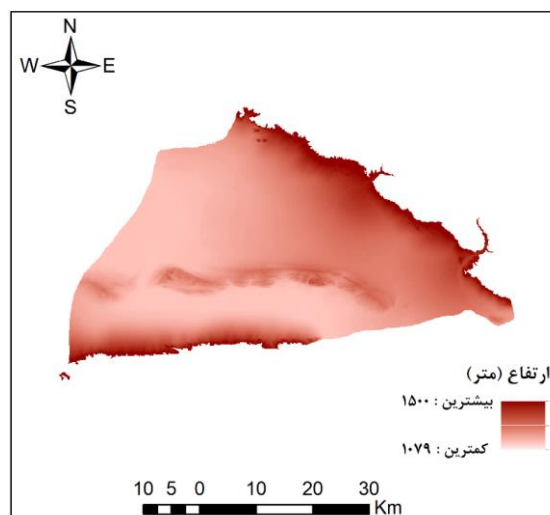
به عنوان شناسایی پتانسیل انرژی خورشیدی استان البرز، از نرم‌افزار ArcGIS که نرم‌افزار قدرتمندی در زمینه تولید نقشه‌های پتانسیل‌سنجی است، استفاده شده است [۲۲]. در ابتدای کار، پتانسیل انرژی خورشیدی استان البرز به مدت یک سال ارزیابی می‌شود. در این ارزیابی حداقل و حداکثر تابش به دست می‌آیند. شکل ۴، نقشه پتانسیل خورشیدی استان البرز را نشان می‌دهد. با توجه به مقادیر به دست آمده، کمترین تابش خورشیدی برابر با ۵۴۱/۴ وات بر مترمربع و بیشترین آن برابر با ۲۱۷۴/۵ وات بر مترمربع است که با توجه به استاندارد انرژی‌های خورشیدی، در دسته شهرهای با پتانسیل تابشی قرار می‌گیرد [۲۳].

یکی از موارد منفی که باید در احداث یک نیروگاه خورشیدی در نظر گرفته شود، نواحی کوهستانی است. این نواحی برای احداث نیروگاه‌های خورشیدی مناسب نیستند و در مکان‌یابی نیروگاه خورشیدی باید لحاظ شوند. مناطق شمالی و شمال شرقی استان البرز را مناطق کوهستانی تشکیل می‌دهد و ارتفاع بیشتری از سطح دریا دارند. به منظور مکان‌یابی، نواحی کوهستانی استان البرز باید شناسایی شده و حذف شود. به این‌منظور، ارتفاعات بیشتر از ۱۵۰۰ متر از سطح دریا به منزله نواحی کوهستانی شناسایی شده و از نقشه مکان‌یابی حذف می‌شود. شکل ۵ نقشه ارتفاعی استان البرز را در محدوده مجاز نشان می‌دهد.

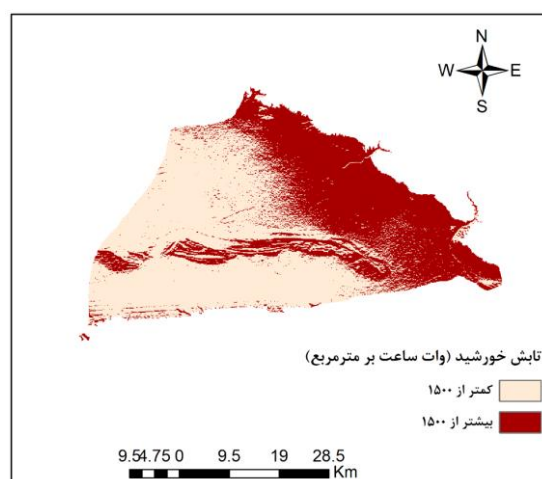
پس از حذف مناطق مرتفع، نواحی باقی‌مانده از نظر هموار بودن زمین مناسب بوده و دارای پتانسیل متوسط رو به بالا هستند. باید در نظر داشت که مناطق کوهستانی معمولاً دارای پتانسیل خورشیدی بیشتری نسبت به مناطق با ارتفاع کمتر هستند، لذا با حذف این مناطق، بخش زیادی از مناطق با پتانسیل بالا نیز از بین می‌رود. با حذف نواحی کوهستانی، مناطق باقی‌مانده مناطق هموار بوده و برای احداث نیروگاه خورشیدی، مناسب هستند. شکل ۶ نقشه پتانسیل انرژی خورشیدی استان البرز را بعد از حذف نواحی کوهستانی نشان می‌دهد.



شکل ۴. نقشه پتانسیل تابش خورشید در استان البرز

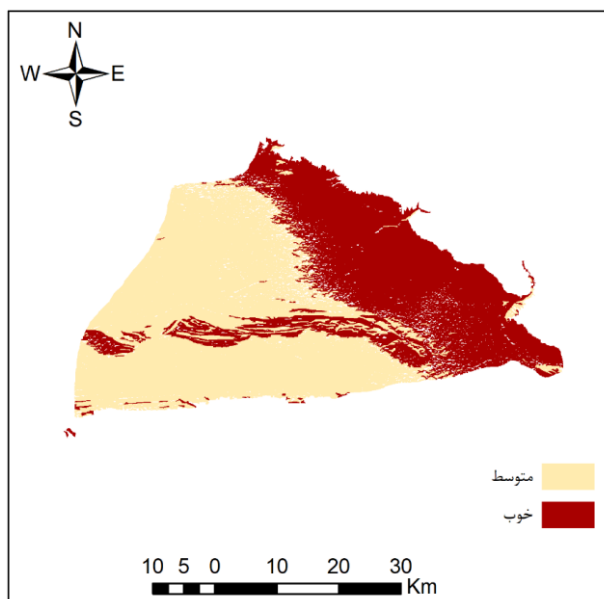


شکل ۵. نقشه مناطق هموار استان البرز برای احداث نیروگاه خورشیدی



شکل ۶. نقشه پتانسیل انرژی خورشیدی مناطق هموار استان البرز

مورد دیگری که در احداث نیروگاه خورشیدی اهمیت دارد، مساحت زمین است. نیروگاه‌ها و مزارع خورشیدی نیاز به مساحت قابل توجهی از زمین دارند، زیرا پنل‌های خورشیدی چگالی توان نسبتاً کمی دارند. بنابراین، باید مناطق با مساحت محدود شناسایی شده و از نقشه حذف شوند. ساتبها جدول‌های راهنمای تعیین مساحت مورد نیاز برای احداث نیروگاه‌های خورشیدی را ارائه داده است [۲۴]. مساحت مورد نیاز برای احداث یک نیروگاه خورشیدی، به دو عامل ظرفیت نیروگاه و ولتاژ پست بستگی دارد و با در نظر گرفتن داده‌های ساتبها برای احداث نیروگاه خورشیدی ۱۰ مگاواتی با ولتاژ پست ۱۳۲ کیلوولت، ۱۶ هکتار زمین مورد نیاز است. با حذف مناطقی که کمتر از ۱۶ هکتار فضا دارند، نقشه شکل ۷ حاصل می‌شود. این شکل مناطق با پتانسیل انرژی خورشیدی متوسط و زیاد را با حذف مناطق کوهستانی و غیر هموار و همچنین، حذف مناطقی که فضای کافی برای احداث نیروگاه را ندارند را نشان می‌دهد. همان‌طور که از شکل ۷ مشخص است، مناطقی که دارای پتانسیل انرژی خورشیدی نسبتاً بالایی هستند، مناطق مرکزی استان البرز شامل بخش‌هایی از شهر ساوجبلاغ و کرج است. نواحی جنوب غربی استان البرز شامل شهرستان نظرآباد و اشتهارد و قسمت‌هایی از ساوجبلاغ، دارای پتانسیل انرژی خورشیدی متوسط است که مساحت بیشتری از مناطق با پتانسیل بالا دارند. نواحی با پتانسیل متوسط، به طور متوسط دارای مقدار ۱۴۲۰ وات ساعت در هر مترمربع بوده و نواحی با پتانسیل خوب دارای مقدار متوسط ۱۵۷۰ وات ساعت در هر مترمربع است. با توجه به جدول ۳، ۵۷ درصد مناطق در نظر گرفته شده دارای پتانسیل انرژی خورشیدی متوسط و ۴۳ درصد آن را نواحی با پتانسیل انرژی خورشیدی بالا تشکیل می‌دهد.



شکل ۷. پتانسیل انرژی خورشیدی مکان‌های هموار استان البرز با در نظر گیری فضای کافی برای احداث

جدول ۳. مساحت‌های نواحی استان البرز با پتانسیل انرژی خورشیدی متفاوت	
پتانسیل انرژی خورشیدی	مساحت (هکتار)
متوسط	۱۷۲۹.۷۷
خوب	۱۲۷۳.۰۴

۴-۱. انرژی دریافتی

به منظور ارزیابی میزان انرژی خورشیدی دریافتی ماهانه و سالانه در استان البرز، نواحی با پتانسیل متوسط و بالا را با در نظر داشتن مقدار سهم مساحتی که دارند، در مدت زمان مشخص محاسبه می‌شود. به این صورت با در نظر گرفتن میانگین ۷ ساعت تابش در روز، میانگین انرژی خورشیدی دریافتی در مناطق با پتانسیل متوسط و خوب در جدول ۴ آورده شده است.

جدول ۴. میانگین انرژی خورشیدی دریافتی استان البرز		
نواحی با پتانسیل متوسط (GWh)	نواحی با پتانسیل خوب (GWh)	
۴.۱۶۹	۴.۱۹۰	روزانه
۵۰۸۲	۵۷۱۲	ماهانه
۶۱۸۳۱	۶۹۴۹۶	سالانه

احداث نیروگاه خورشیدی در استان البرز، با توجه به پتانسیل تابشی نسبتاً خوبی که دارد، باعث تولید توان نسبتاً بالایی خواهد شد. با توجه به شکل ۷، نواحی با پتانسیل انرژی خورشیدی خوب که به رنگ قرمز هستند، بهترین انتخاب از نظر توان خروجی خواهند بود. در این مرحله به ارزیابی توان خروجی یک نیروگاه خورشیدی در این استان پرداخته شده و پس از انجام آنالیزهای زیست‌محیطی، تأثیر آن بر محیط زیست گزارش می‌شود.

پنل‌های فتوولتائیک به عنوان مبدل‌های انرژی خورشیدی به انرژی الکتریکی، با نصب در این نواحی، قابلیت تولید الکتریسیته را دارند. سلول‌های خورشیدی مورد استفاده در نیروگاه‌های کشور، از نوع مونوکریستال با بازده ۱۸/۵ درصد است [۲۵]. لذا به منظور ارزیابی، یک نیروگاه خورشیدی ۱۰ مگاواتی متشکل از پنل‌های خورشیدی مونوکریستال، مبنای ارزیابی‌ها قرار می‌گیرد. به منظور محاسبه مساحت مورد نیاز پنل خورشیدی، از مقدار متوسط ۱۰ مترمربع به ازای هر کیلووات توان خروجی استفاده شده، بنابراین مقدار زمین اشغال شده توسط این پنل‌ها به منظور احداث نیروگاه ۱۰ مگاواتی برابر با ۱۰ هکتار در نظر

گرفته شده است. با در نظر گرفتن پتانسیل استان البرز و همچنین بازده این پنل‌ها، میانگین توان خروجی این نیروگاه در هر یک از نواحی استان البرز در جدول ۵، نشان داده شده است. با توجه به این جدول، احداث این نیروگاه در مناطق با پتانسیل خوب، به طور میانگین ۱۸ درصد توان بیشتری نسبت به احداث آن در مناطق با پتانسیل متوسط انرژی تولید خواهد کرد که برابر ۴/۶ مگاوات است و خود به اندازه یک نیروگاه بزرگ است.

جدول ۵. میانگین سالانه توان تولیدی نیروگاه در نواحی مختلف

ناحیه با پتانسیل متوسط	ناحیه با پتانسیل خوب
۲۵.۹ مگاوات	۳۰.۵۲ مگاوات

۴-۲. آنالیز زیست‌محیطی

احداث یک نیروگاه خورشیدی علاوه بر تأمین انرژی بشر، به منظور کاهش اثرات زیست‌محیطی است. استان البرز، از استان‌های با مشکل آلودگی است. احداث یک نیروگاه خورشیدی به طور حتم در کاهش آلاینده‌های ناشی از تولید توان نیروگاه‌های حرارتی کشور مؤثر خواهد بود. به منظور بررسی تأثیر این نیروگاه بر جلوگیری از انتشار آلاینده‌ها، مقدار توان تولیدی نیروگاه خورشیدی با مقدار تولیدشده آلاینده توسط یک نیروگاه حرارتی با همان ظرفیت مقایسه می‌شود. جدول ۶ مقدار انتشار آلاینده‌ها توسط نیروگاه‌های حرارتی کشور را نشان می‌دهد [۲۶].

جدول ۶. میزان انتشار گازهای حاصل از احتراق در نیروگاه‌های کشور [۲۶]

نوع آلاینده	CO ₂	NO _x	SO ₂
مقدار (گرم بر کیلووات ساعت)	۶۴۰	۲.۴	۲.۷۵

با احتساب مقادیر یادشده در جدول ۶ به عنوان مقدار آلاینده‌های تولید شده توسط تولید هر کیلووات ساعت انرژی توسط نیروگاه‌های حرارتی، می‌توان به ازای توان تولیدشده توسط نیروگاه ۱۰ مگاواتی مد نظر، مقدار آلاینده حذف‌شده را به دست آورد. با توجه به جدول ۷، در صورت احداث یک نیروگاه خورشیدی ۱۰ مگاواتی در ناحیه با پتانسیل متوسط (با توجه به شکل ۷)، سالیانه ۷۴۰۰ تن از انتشار گاز دی‌اکسید کربن جلوگیری می‌شود و با احداث این نیروگاه در مناطق با پتانسیل خوب، این مقدار به ۸۲۰۰ تن افزایش می‌یابد. مقادیر دیگر انتشارهای جلوگیری‌شده در جدول ۷ آورده شده‌اند. البته قابل ذکر است که نیروگاه‌های خورشیدی انتشار آلاینده صفر ندارد و انرژی مصرف‌شده برای تولید پنل‌ها، جابه‌جایی، تعمیر و نگهداری نیاز به مصرف انرژی دارد که غالباً از انرژی تجدیدناپذیر استفاده می‌کنند اما ملاک این مقاله، بررسی موارد حین تولید انرژی بوده است.

جدول ۷. مقدار آلاینده جلوگیری‌شده سالانه توسط نیروگاه ۱۰ مگاواتی خورشیدی

نوع آلاینده	مقدار جلوگیری شده (تن)	
	ناحیه با پتانسیل متوسط	ناحیه با پتانسیل خوب
CO ₂	۷۴۰۰	۸۲۰۰
NO _x	۲۷	۳۱
SO ₂	۳۱	۳۵

۵. نتیجه‌گیری

استان البرز، با مشکل آلودگی هوا و مصرف بالای انرژی مواجه است، لذا بهره‌گیری از انرژی‌های تجدیدپذیر می‌تواند راهکار مناسبی برای کاهش آلاینده‌ها و تأمین انرژی الکتریکی این شهر باشد. انرژی خورشیدی از ارزان‌ترین و در دسترس‌ترین منابع انرژی تجدیدپذیر در جهان است. در این مقاله به بررسی پتانسیل انرژی خورشیدی استان البرز پرداخته و نواحی مناسب برای احداث نیروگاه خورشیدی توسط نرم‌افزار ArcGIS مورد بررسی قرار گرفت. نواحی با ارتفاع بیشتر از ۱۵۰۰ متر که نواحی کوهستانی استان البرز است، به علت ایجاد مشکلاتی برای نیروگاه‌های خورشیدی، از نقشه حذف شده و سپس فضای مورد نیاز

برای احداث یک نیروگاه ۱۰ مگاواتی ارزیابی شده و مناطقی که از فضای کمتری دارند نیز حذف شدند. استان البرز برای مدت یک سال پتانسیل سنجی شده و نواحی ای که دارای مقدار تابش کمتر از ۱۲۰۰ وات ساعت بر مترمربع هستند، به عنوان نواحی کم انرژی شناخته و حذف شدند. در نهایت، نقشه پتانسیل ایجاد شده به دو طبقه نواحی با پتانسیل انرژی تابشی متوسط (کمتر از ۱۵۰۰ وات ساعت بر مترمربع) و نواحی با پتانسیل انرژی تابشی زیاد (بیشتر از ۱۵۰۰ وات ساعت بر مترمربع) تقسیم شدند. میانگین توان تولیدی یک نیروگاه فرضی ۱۰ مگاواتی برای هر دو طبقه بررسی شده و به منظور آنالیز زیست محیطی، مقدار آلاینده جلوگیری شده سالانه توسط این نیروگاه در مقایسه با یک نیروگاه حرارتی ارزیابی شد.

با توجه به نتایج ارائه شده توسط این پتانسیل سنجی می توان نتیجه گرفت که شهرستان های طالقان، مناطق شمالی ساوجبلاغ و شمال شرقی کرج، مناطق کوهستانی بوده و اصولاً برای احداث نیروگاه خورشیدی مگاواتی مناسب نیستند. از طرفی، احداث یک نیروگاه خورشیدی در مناطق میانی شهرستان ساوجبلاغ و کرج (نواحی با پتانسیل انرژی تابشی خوب) به طور میانگین ۱۸ درصد توان بیشتری نسبت به احداث آن در شهرستان اشتهارد و نظرآباد (با پتانسیل متوسط انرژی) تولید خواهد کرد که برابر ۴/۶ مگاوات است و خود به اندازه یک نیروگاه بزرگ است.

احداث یک نیروگاه خورشیدی ۱۰ مگاواتی در مناطق با پتانسیل متوسط و خوب، به ترتیب به حذف ۷/۲ و ۸/۴ هزار تن دی اکسید کربن سالانه می شود. در نتیجه، احداث یک نیروگاه خورشیدی در استان البرز، به خصوص در شهرستان کرج و نواحی مرکزی شهرستان ساوجبلاغ با تولید زیاد انرژی تجدیدپذیر، مشکلات آلودگی هوا را تا حدودی حل کرده و مصرف انرژی در ساعت های پیک را جبران خواهد کرد.

منابع

- [1] M. M. Alam, M. W. Murad, A. H. M. Noman, and I. Ozturk, "Relationships among carbon emissions, economic growth, energy consumption and population growth: Testing Environmental Kuznets Curve hypothesis for Brazil, China, India and Indonesia," *Ecol. Indic.*, vol. 70, pp. 466–479, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.06.043>.
- [2] A. H. Mirzabe, A. Hajiahmad, A. Keyhani, and N. Mirzaei, "Approximation of daily solar radiation: A comprehensive review on employing of regression models," *Renew. Energy Focus*, vol. 41, pp. 143–159, 2022, doi: [10.1016/j.ref.2022.02.003](https://doi.org/10.1016/j.ref.2022.02.003).
- [3] W. total final consumption by Source, "Final consumption," IEA. [Online]. Available: <https://www.iea.org/reports/key-world-energy-statistics-2021/final-consumption>
- [4] Y. Zhang, J. Ren, Y. Pu, and P. Wang, "Solar energy potential assessment: A framework to integrate geographic, technological, and economic indices for a potential analysis," *Renew. Energy*, vol. 149, pp. 577–586, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.12.071>.
- [5] N. Mirzaei and M. Bidi, "A review of the application of photovoltaic panels in water desalination," *Mater. Chem. Mech.*, vol. 1, no. 3, pp. 8–15, 2023, [Online]. Available: <https://doi.org/10.22034/mcm.2023.3.2>
- [6] M. Mirzaei, Negin; Bidi, "An overview of the application of photovoltaic panels in water desalination [in Persian]," in *The 31st annual international conference of the Iranian Mechanical Engineers Association and the 9th Iranian Power Plant Industry Conference*, 2023. [Online]. Available: <https://civilica.com/doc/1668487/>
- [7] H. Yousefi, A. Kasaeian, P. Ranjbaran, and M. H. Katouli, "A Review of the Criteria for Locating of Solar Power Plants in Iran," *Geospatial Eng. J.*, vol. 8, no. 2, 2017, [Online]. Available: <http://gej.issgeac.ir/article-1-212-fa.html>
- [8] Y. Tian and C. Y. Zhao, "A review of solar collectors and thermal energy storage in solar thermal applications," *Appl. Energy*, vol. 104, pp. 538–553, 2013, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.11.051>.
- [9] J. M. Sánchez-Lozano, C. Henggeler Antunes, M. S. García-Cascales, and L. C. Dias, "GIS-based photovoltaic solar farms site selection using ELECTRE-TRI: Evaluating the case for Torre Pacheco, Murcia, Southeast of Spain," *Renew. Energy*, vol. 66, pp. 478–494, 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2013.12.038>.
- [10] H. Astaraei, Fatemeh Razi and Yousefi, Hossein and Hafeznia, "Solar Energy Potential Assessment for Electricity Generation in the Southeastern Coastal Areas of Iran. In: Development of Geopolitical Potentials in the Southeastern Coastal Regions of the Country [in Persian]," 2016. [Online]. Available: <https://sid.ir/paper/846232/fa>
- [11] S. Kianian, M. and Hajimohammadi, H. and Rasouli, F. and Kavousi, "Assessment of Solar Power Plant Site Potential Based on Climatic Parameters Using GIS in Hamadan Province [in Persian]," in *Proceedings of the 3rd International Conference on Novel Approaches in Energy Conservation*, 2013. [Online]. Available: <https://civilica.com/doc/305417>
- [12] H. Yousefi, Y. Noorollahi, M. Soltanmohammadi, and R. Arjmandi, "Using Fuzzy logic and Fuzzy TOPSIS for sake site selection of solar power plant by GIS,(Case Study, Tehran)," *Iran. J. Energy*, vol. 15, no. 4, 2013, [Online]. Available: <http://necjournals.ir/article-1-447-fa.html>
- [13] M. of C. and I. G. – A. Province, "Alborz Province Identity and General Profile [in Persian]." Accessed: May 20, 2004. [Online]. Available: <https://alborz.farhang.gov.ir/fa/moarefeyeostanalborz/shenasnamehostan>
- [14] S. C. of Iran, "2016 National Census Results [in Persian]." Accessed: May 20, 2004. [Online]. Available: <https://amar.org.ir/>
- [15] S. C. of Iran, "Iran at a Glance: Alborz Province," 2016, [Online]. Available: <https://www.amar.org.ir/english/Iran-at-a-glance/Alborz,2016>
- [16] A. Assadzadeh and Z. Jalili, "Effect of Economic Growth on Renewable Energy Consumption in the Developed Countries: A Panel Data and CUP-FM Estimation Apporach," *Quarterely Energy Econ. Rev.*, vol. 11, no. 47, 2016, [Online]. Available: <http://iiesj.ir/article-1-362-fa.html>
- [17] I. Ministry of Energy, "Electricity Tariffs, Rules and Regulations [in Persian]." Accessed: May 20, 2004. [Online]. Available: <https://tariff.moe.gov.ir/>

- [18] A. P. I. S. Center, "Investment Guide for Solar Power Plant Development in Alborz Province [in Persian]." Accessed: May 20, 2004. [Online]. Available: <https://www.investinalborz.ir/>
- [19] A. E. D. Company, "Overview of General Indicators [in Persian]." Accessed: May 20, 2004. [Online]. Available: <http://www.aepdc.ir/>
- [20] T. L. Saaty and L. T. Tran, "On the invalidity of fuzzifying numerical judgments in the Analytic Hierarchy Process," *Math. Comput. Model.*, vol. 46, no. 7, pp. 962–975, 2007, doi: <https://doi.org/10.1016/j.mcm.2007.03.022>.
- [21] S. Moradi, H. Yousefi, Y. Noorollahi, and D. Rosso, "Multi-criteria decision support system for wind farm site selection and sensitivity analysis: Case study of Alborz Province, Iran," *Energy Strateg. Rev.*, vol. 29, p. 100478, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.esr.2020.100478>.
- [22] et al Johnston, K., "Using ArcGIS geostatistical analyst," *Esri Redlands*, vol. 380, 2001.
- [23] M. P. Thekaekara, "Solar radiation measurement: Techniques and instrumentation," *Sol. Energy*, vol. 18, no. 4, pp. 309–325, 1976, doi: [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(76\)90058-X](https://doi.org/10.1016/0038-092X(76)90058-X).
- [24] R. E. and E. E. O. (SATBA), "Guidelines for the Development of Non-Governmental Renewable Power Plants." [Online]. Available: <https://www.satba.gov.ir/>
- [25] H. Beiki, "Simulation and Techno-Economic Feasibility Study of Electricity Generation in Building-Integrated Photovoltaic (BIPV) Systems [in Persian]," *J. Renew. New Energies*, vol. 7, no. 1, pp. 102–108, 2020, [Online]. Available: https://www.jrenew.ir/article_93857.html
- [26] N. R. I. Environmental Group, "Development of the National Power Plant Pollution Atlas," 2008