



Research Paper

A step toward a climate-resilient energy system in Iran: Complementarity of spatial patterns of heating–cooling demand based on the potential of hybrid wind-photovoltaic resources

Gholamreza Roshan ^{*1} AbdolAzim Saman²

1 Department Of Geography, Golestan University, Shahid Beheshti, Gorgan, 49138-157.

Keywords

Decarbonization, Fuzzy scenario analysis, Heating demand, Hybrid wind–PV systems, Spatio-temporal complementarity.



ABSTRACT

This study aims to develop a comprehensive climate-oriented framework for renewable energy planning in Iran by evaluating the simultaneous spatio-temporal analysis between heating–cooling energy demand (HDD and CDD) and the potential for hybrid wind-PV energy generation. Given the limitations of previous studies, which have primarily examined wind and solar resources separately, this research seeks to capture the complex interaction between energy supply and demand using an integrated, data-driven fuzzy model. Long-term temperature, solar radiation, and wind speed data extracted from the ECMWF database (ERA5 product) for the period 1995–2025 across the entire country, after preprocessing and normalization, were used as the basis for calculating energy demand indices (HDD and CDD) as well as estimating solar and wind energy potential. Subsequently, pixel-wise Principal Component Analysis (PCA) was used to perform local variable weighting to accurately account for Iran's climatic heterogeneity. Next, a fuzzy multi-criteria decision-making framework was developed to combine energy generation and demand under four climatic scenarios and two strategic scenarios (self-sufficiency and surplus export). The results of this study indicate that the alignment patterns between renewable potential and energy demand in Iran are highly heterogeneous and dependent on climatic–geographical conditions. The south and southeast of the country, where high solar radiation coincides with intense cooling demand, are the most suitable areas for solar energy development and local self-sufficiency. In contrast, the east and parts of the central region, despite possessing both wind and solar resources, show the highest potential for genuine hybrid systems. The northwest and west, despite high heating demand, have the lowest suitability due to limited solar potential and weak alignment with wind. Furthermore, high-demand scenarios create the greatest spatial correspondence, while low-demand scenarios reveal suitable areas for surplus energy generation and export. Overall, the results indicate that optimal energy planning in Iran must be based on “functional zoning” and the simultaneous consideration of generation and demand. This approach can help increase efficiency, reduce energy waste, improve energy security, and facilitate the transition to a low-carbon system.

*Corresponding Author: Gholamreza Roshan

Email Address: ghr.roshan@gu.ac.ir.

Roshan, G. and Saman, A. (2026). Complementarity of spatial patterns of heating–cooling demand based on the potential of hybrid wind-photovoltaic resources. *Human Ecology*, 5(14), 2040-2056.



DOI: <https://doi.org/10.22034/he.2026.580651.1204>



گام بسوی نظام انرژی اقلیم‌پذیر در ایران: مکمل‌بودن الگوهای فضایی تقاضای گرمایش- سرمایش بر مبنای پتانسیل منابع هیبریدی باد- فتوولتائیک

غلامرضا روشن*^۱، عبدالعظیم سامان^۲

^۱ گروه جغرافیا، دانشگاه گلستان، گرگان، ایران.

واژگان کلیدی

تقاضای گرمایش،
سیستم‌های ترکیبی بادی-
فتوولتائیک، مکمل‌بودن
مکانی-زمانی، تحلیل
سناریوی فازی، کربن زدایی

چکیده

این مطالعه با هدف توسعه یک چارچوب جامع اقلیم‌محور برای برنامه‌ریزی انرژی تجدیدپذیر در ایران، به ارزیابی تحلیل فضایی-زمانی هم‌زمان بین تقاضای انرژی گرمایشی-سرمایشی (HDD و CDD) و پتانسیل تولید انرژی هیبریدی باد- فتوولتائیک می‌پردازد. با توجه به محدودیت مطالعات پیشین که عمدتاً منابع بادی و خورشیدی را به صورت جداگانه بررسی کرده‌اند، این پژوهش تلاش می‌کند تعامل پیچیده بین عرضه و تقاضای انرژی را در قالب یک مدل فازی یکپارچه و داده‌محور بازنمایی کند. داده‌های بلندمدت دما، تابش خورشیدی و سرعت باد استخراج‌شده از پایگاه داده ECMWF (محصول ERA5) برای دوره زمانی ۱۹۹۵ تا ۲۰۲۵ و در مقیاس کل کشور، پس از انجام مراحل پیش‌پردازش و نرمال‌سازی، به عنوان مبنای محاسبه شاخص‌های تقاضای انرژی (HDD و CDD) و نیز برآورد پتانسیل انرژی خورشیدی و بادی مورد استفاده قرار گرفتند. سپس با استفاده از تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) به صورت پیکسل محور، وزن‌دهی محلی متغیرها انجام شد تا ناهمگنی اقلیمی ایران به طور دقیق لحاظ شود. در ادامه، یک چارچوب تصمیم‌گیری چندمعیاره فازی برای ترکیب تولید و تقاضای انرژی در ۴ سناریوی اقلیمی و دو سناریوی راهبردی (خودکفایی و صادرات مازاد) توسعه یافت. نتایج این تحقیق نشان دادند که الگوهای هم‌راستایی بین پتانسیل تجدیدپذیر و تقاضای انرژی در ایران کاملاً ناهمگن و وابسته به شرایط اقلیمی-جغرافیایی است. جنوب و جنوب شرق کشور به دلیل هم‌زمانی تابش بالا و نیاز شدید سرمایشی، مناسب‌ترین نواحی برای توسعه انرژی خورشیدی و خودکفایی محلی هستند. در مقابل، شرق و بخش‌هایی از مرکز کشور با وجود بر خورده‌اری از هر دو منبع باد و خورشید، بیشترین پتانسیل برای سیستم‌های هیبریدی واقعی را نشان می‌دهند. نواحی شمال غرب و غرب با وجود نیاز گرمایشی بالا، به دلیل پتانسیل محدود خورشیدی و هم‌راستایی ضعیف با باد، کمترین مطلوبیت را دارند. همچنین سناریوهای تقاضای بالا بیشترین انطباق فضایی را ایجاد کرده و سناریوهای تقاضای پایین مناطق مناسب برای تولید و صادرات انرژی مازاد را آشکار می‌سازند. در مجموع، نتایج بیانگر آن است که برنامه‌ریزی بهینه انرژی در ایران باید مبتنی بر «منطقه‌بندی عملکردی» و در نظر گرفتن هم‌زمان تولید و تقاضا باشد. این رویکرد می‌تواند به افزایش بهره‌وری، کاهش اتلاف انرژی، بهبود امنیت انرژی و تسهیل‌گذار به سیستم کم‌کربن کمک کند.

اسکن کنید



ارجاع به این مقاله: روشن، غلامرضا و سامان، عبدالعظیم. (۱۴۰۵). گام بسوی نظام انرژی اقلیم‌پذیر در ایران: مکمل‌بودن الگوهای فضایی تقاضای گرمایش- سرمایش بر مبنای پتانسیل منابع هیبریدی باد- فتوولتائیک. اکولوژی انسانی، ۵(۱۴)، ۲۰۴۰-۲۰۵۶.

۱. مقدمه

کاهش کربن‌زدایی بخش گرمایش و سرمایش به یکی از اولویت‌های اصلی سیاست‌های انرژی و اقلیم در سطح جهانی تبدیل شده است، زیرا این دو بخش در مجموع حدود نیمی از تقاضای نهایی انرژی را تشکیل می‌دهند و همچنان وابستگی بالایی به سوخت‌های فسیلی دارند. (Fernandes et al. , 2025; Muncán et al. , 2024; Maduta et al. , 2023) در همین راستا، سیاست‌های کلان بین‌المللی از جمله «توافق سبز اروپا»، «قانون اقلیم اروپا» و بسته سیاستی «Fit for 55» مسیر مشخصی را برای دستیابی به بی‌طرفی کربنی تا سال ۲۰۵۰، توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر و بهبود بهره‌وری انرژی در ساختمان‌ها و سیستم‌های حرارتی ترسیم کرده‌اند. (Kulovesi et al. , 2024; Babiarz et al. , 2024) در این میان، برقی‌سازی گرمایش و سرمایش به‌عنوان یکی از مسیرهای کلیدی‌گذار انرژی، به‌ویژه در صورت تأمین از منابع برق کم‌کربن، به‌طور فزاینده‌ای مورد توجه قرار گرفته است. (Zelazna & Pawłowski, 2025; Wang et al. , 2025).

ایران در این زمینه یک مطالعه موردی بسیار مهم محسوب می‌شود، زیرا دارای ساختار انرژی به‌شدت وابسته به سوخت‌های فسیلی بوده و هم‌زمان با تنوع شدید اقلیمی و نوسانات قابل توجه در تقاضای فصلی انرژی مواجه است. بخش ساختمان در ایران سهم قابل توجهی از مصرف نهایی انرژی کشور را تشکیل می‌دهد و تقاضای انرژی آن به‌طور هم‌زمان تحت تأثیر نیاز به گرمایش در مناطق سردسیر و نیاز به سرمایش در مناطق گرم و خشک قرار دارد (IEA, 2023; Ministry of Energy of Iran, 2022). بر اساس برآوردهای ملی، بخش ساختمان حدود ۳۵ تا ۴۰ درصد از کل مصرف انرژی کشور را شامل می‌شود که بخش قابل توجهی از آن مربوط به بار سرمایشی در تابستان‌های بسیار گرم و بار گرمایشی در زمستان‌های سرد است، موضوعی که ایران را به یک بستر مهم برای تحلیل هم‌زمان شاخص‌های درجه‌روز گرمایش (HDD) و سرمایش (CDD) تبدیل کرده است (Mostafaeipour et al. , 2016; Kalogirou, 2014).

در سال‌های اخیر، افزایش دماهای حدی، تشدید موج‌های گرمایی و تغییرات اقلیمی موجب افزایش قابل توجه تقاضای سرمایش در ماه‌های گرم سال شده است، در حالی که در مناطق کوهستانی و شمال غرب کشور، تقاضای گرمایش همچنان غالب باقی مانده است. این ناهمگنی شدید مکانی-زمانی در تقاضای انرژی، فشار قابل توجهی بر شبکه برق کشور وارد کرده و چالش‌های مهمی در مدیریت بار انرژی ایجاد کرده است. (Nasseri et al. , 2022; Shakouri & Yazdani, 2023) از سوی دیگر، ایران از نظر منابع انرژی تجدیدپذیر دارای پتانسیل بسیار بالایی است؛ به‌گونه‌ای که مناطق مرکزی و جنوبی از بالاترین سطوح تابش خورشیدی و مناطق شرقی و شمال شرقی از پتانسیل قابل توجه انرژی بادی برخوردارند، هرچند سهم این منابع در سبد تولید برق کشور هنوز محدود باقی مانده است (Razmjoo et al. , 2021; Maleki et al. , 2017).

این وضعیت یک چالش دوگانه ایجاد می‌کند: از یک سو ضرورت کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای ناشی از تأمین انرژی برای گرمایش و سرمایش ساختمان‌ها، و از سوی دیگر نیاز به توسعه زیرساخت‌های برق برای پاسخ‌گویی به تقاضای رو به رشد هر دو بخش. در این چارچوب، برقی‌سازی سیستم‌های گرمایش و سرمایش، به‌ویژه از طریق فناوری‌هایی مانند پمپ‌های حرارتی، به‌عنوان یکی از گزینه‌های کلیدی کاهش انتشار در بخش ساختمان مطرح شده است، مشروط بر آنکه سهم انرژی‌های تجدیدپذیر در تولید برق کشور به‌طور تدریجی افزایش یابد. (Ahmadi et al. , 2023; UNDP, 2022) با این حال، تحقق چنین گذار انرژی تنها به افزایش ظرفیت تولید انرژی‌های تجدیدپذیر وابسته نیست، بلکه نیازمند درک دقیق هم‌زمانی مکانی و فصلی میان تولید برق تجدیدپذیر و تقاضای آینده ناشی از هر دو نیاز گرمایش و سرمایش است.

مطالعات انجام‌شده در ایران نشان می‌دهند که منابع خورشیدی و بادی دارای الگوهای زمانی و مکانی متفاوت و در بسیاری از موارد مکمل هستند، به‌طوری‌که تولید خورشیدی عمدتاً در ساعات روز و فصول گرم و تولید بادی در بسیاری از مناطق در ساعات شبانه و دوره‌های سردتر نقش پررنگ‌تری دارد. این ویژگی می‌تواند نقش مهمی در کاهش نوسانات تولید و افزایش قابلیت اطمینان سیستم انرژی ایفا کند. (Rezaei et al. , 2021; Maleki et al. , 2017) با وجود این، پراکندگی جغرافیایی این منابع در ایران بسیار ناهمگن است و همین موضوع اهمیت تحلیل‌های فضایی-زمانی یکپارچه را دوچندان می‌کند.

با وجود پیشرفت‌های قابل توجه در حوزه انرژی‌های تجدیدپذیر و تحلیل تقاضای انرژی ساختمان، هنوز یک شکاف اساسی در ادبیات وجود دارد. اغلب مطالعات یا بر پتانسیل منابع انرژی به‌صورت مستقل تمرکز داشته‌اند یا صرفاً به تحلیل تقاضای گرمایش و سرمایش پرداخته‌اند، بدون آنکه این دو حوزه را در یک چارچوب یکپارچه فضایی-زمانی ترکیب کنند. همچنین، کمتر مطالعه‌ای به‌طور هم‌زمان بررسی کرده است که کدام مناطق دارای هم‌پوشانی میان پتانسیل بالای انرژی تجدیدپذیر و تقاضای بالای گرمایش و سرمایش هستند و کدام مناطق می‌توانند به‌عنوان نواحی مازاد انرژی و دارای ظرفیت صادرات عمل کنند.

این مطالعه با توسعه یک چارچوب اولویت‌بندی فضایی دوگانه به این خلأ پاسخ می‌دهد. در این چارچوب، شاخص‌های درجه‌روز گرمایش و سرمایش (HDD و CDD) به‌عنوان نماینده تقاضای انرژی در کنار پتانسیل ترکیبی تولید برق بادی و خورشیدی در سراسر ایران مورد ارزیابی قرار می‌گیرند. با استفاده از داده‌های بلندمدت اقلیمی کشور، مکمل بودن فضایی-زمانی منابع انرژی و تقاضای انرژی از طریق یک مدل ادغام فازی با وزن‌دهی مبتنی بر تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) در سطح مناطق جغرافیایی مختلف بررسی می‌شود. در این راستا، دو سناریوی راهبردی شامل سناریوی خودکفایی انرژی (هم‌زمانی تقاضای بالا و تولید بالا) و سناریوی مازاد انرژی و صادرات (پتانسیل بالا و تقاضای پایین) تعریف شده است.

از منظر علمی، این پژوهش با ادغام هم‌زمان جغرافیای تقاضای گرمایش و سرمایش در ارزیابی سیستم‌های ترکیبی بادی-خورشیدی، به توسعه ادبیات مکمل بودن انرژی‌های تجدیدپذیر کمک می‌کند. از منظر کاربردی نیز، این چارچوب می‌تواند مبنایی برای شناسایی مناطق مناسب برای خودکفایی یا صادرات انرژی و همچنین برای برنامه‌ریزی توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر، برقی‌سازی گرمایش و سرمایش، طراحی شبکه برق و توسعه زیرساخت‌های انتقال در ایران فراهم آورد. در شرایطی که ایران باگذار انرژی پیچیده، وابستگی تاریخی به سوخت‌های فسیلی و ناهمگنی شدید اقلیمی مواجه است، چنین رویکردی می‌تواند نقش مهمی در کاهش ریسک عدم تطابق تولید و تقاضا، بهینه‌سازی تخصیص منابع و تسهیل مسیرگذار به سیستم انرژی کم‌کربن و پایدار ایفا کند.

۲. مواد و روش‌ها

۲.۱. داده‌ها و پیش‌پردازش

داده‌های مورد استفاده در این پژوهش شامل مجموعه‌ای از متغیرهای اقلیمی بازتحلیل‌شده است که از پایگاه داده ECMWF (ERA5) برای کل دوره زمانی بلندمدت (۱۹۹۵ تا ۲۰۲۵) استخراج شده‌اند. این مجموعه شامل تابش کوتاه‌موج سطحی (ssrd) با واحد ژول بر متر مربع ($J m^{-2}$)، دمای هوا در نزدیکی سطح زمین و مؤلفه‌های باد در سطح ۱۰ متری (u-wind) و (v-wind) است. مؤلفه‌های باد پس از استخراج، به سرعت باد معادل تبدیل شده‌اند تا قابلیت مقایسه و تحلیل انرژی باد فراهم شود. داده‌ها دارای تفکیک مکانی 0.25° درجه بوده و شبکه‌ای با ابعاد 85×78 سلول (در مجموع ۶۶۳۰ پیکسل مکانی) را برای پوشش کامل محدوده ایران تشکیل می‌دهند. این داده‌ها ابتدا به صورت روزانه/ماهانه در دسترس بوده و سپس برای اهداف این پژوهش در مقیاس‌های فصلی و سالانه تجمیع و پردازش شده‌اند. مجموعه مذکور به دلیل پوشش هم‌زمان متغیرهای کلیدی تابش خورشیدی، دما و باد، امکان ارزیابی جامع پتانسیل انرژی‌های تجدیدپذیر و تحلیل تغییرات مکانی-زمانی شرایط اقلیمی ایران را در بازه بلندمدت فراهم می‌سازد.

۲.۲. درجه-روزهای گرمایش و سرمایش به‌عنوان شاخص‌های تقاضای انرژی

ایران دارای تنوع اقلیمی گسترده‌ای است؛ به‌طوری‌که از مناطق کوهستانی سرد در شمال غرب تا نواحی بیابانی گرم در جنوب و مرکز را در بر می‌گیرد. در نتیجه، هر دو نوع تقاضای گرمایش و سرمایش نقش مهمی در الگوی مصرف انرژی کشور دارند. به‌منظور درک دقیق تغییرات مکانی تقاضای انرژی، شاخص‌های درجه-روزهای گرمایش (HDD) و درجه-روزهای سرمایش (CDD) به‌عنوان شاخص‌های اقلیمی کلیدی برای برآورد نیاز انرژی گرمایشی و سرمایشی محاسبه شدند.

شاخص HDD میزان انرژی موردنیاز برای گرمایش را نشان می‌دهد، در حالی که CDD بیانگر تقاضای انرژی برای سرمایش است. این شاخص‌ها بر اساس میزان انحراف دمای میانگین روزانه هوا از دمای مبنای آسایش تعریف می‌شوند. فرمول‌های زیر برای محاسبه این شاخص‌ها مورد استفاده قرار گرفتند (Roshan et al., 2017):

$$HDD = \sum_{i=1}^n \max(T_{base, HDD} - T_{mean, i}, 0) \times D \quad (1)$$

$$CDD = \sum_{i=1}^n \max(T_{base, CDD} - T_{mean, i}, 0) \times D \quad (2)$$

که در آن:

$T_{("mean", i), 0}$: میانگین دمای روزانه در روز i (درجه سانتی‌گراد)

$T_{("base", HDD)}$: دمای مبنا برای گرمایش = 18° درجه سانتی‌گراد

$T_{("base", CDD)}$: دمای مبنا برای سرمایش = 22° درجه سانتی‌گراد

D : تعداد روزهای هر ماه

n : تعداد کل روزهای مورد بررسی

مقادیر بالاتر HDD نشان‌دهنده نیاز بیشتر به انرژی گرمایشی هستند، در حالی که مقادیر بالاتر CDD بیانگر افزایش تقاضا برای انرژی سرمایشی می‌باشند. این دو شاخص مکمل، امکان ارزیابی جامع‌تری از تقاضای انرژی ناشی از شرایط اقلیمی را در مناطق مختلف اقلیمی ایران فراهم می‌کنند و ورودی‌های ضروری برای تحلیل تناسب چندمعیاره‌فازی در مراحل بعدی پژوهش را تأمین می‌نمایند (Roshan et al., 2017).

۲.۳. پتانسیل انرژی خورشیدی

پتانسیل انرژی فتوولتائیک (PV) بر اساس تابش خورشیدی، دمای هوا و سرعت باد و با استفاده از یک مدل راندمان تعدیل‌شده دمایی به‌صورت زیر برآورد شد: (Zakari et al., 2022; Russo et al., 2023)

$$T_{\text{cell}} = c_1 T_{\text{air}} + c_2 G + c_3 V_{\text{wind}} + c_4 \quad (3)$$

$$PR = 1 + g(T_{\text{STC}} - T_{\text{cell}}) \quad (4)$$

$$PV_{\text{yield}} = \frac{G \times H_{\text{eq}}}{1000} \times PR \quad (5)$$

T_{cell} : دمای سلول فتوولتائیک (درجه سانتی‌گراد)

T_{air} : دمای هوای محیط (درجه سانتی‌گراد)

G : تابش کل خورشیدی (وات بر متر مربع)

V_{wind} : سرعت باد (متر بر ثانیه)

g : ضریب دمایی راندمان فتوولتائیک = ۰/۰۵۵

T_{STC} : دمای شرایط استاندارد آزمون = ۲۵ درجه سانتی‌گراد

c_1, c_2, c_3, c_4 : ضرایب به‌ترتیب برابر با ۰/۰۹۴۳/۱، ۰/۰۲۸/۵۲۸ و ۴/۳ و ۰/۰۹۴۳/۱، ۰/۰۲۸/۵۲۸

H_{eq} : مدت زمان معادل مؤثر تابش (ساعت)

PV_{yield} : پتانسیل ماهانه انرژی فتوولتائیک به ازای واحد سطح ماژول (کیلووات‌ساعت بر متر مربع در ماه)

به‌منظور امکان مقایسه سازگار بین منابع انرژی خورشیدی و بادی، مقدار ماهانه (kWh/m²/month) "yield" [PV] به یک شاخص نرمال‌شده بر اساس ظرفیت تبدیل شد که به‌صورت تولید ماهانه انرژی فتوولتائیک به ازای هر مگاوات ظرفیت نصب‌شده E_{pv} (kWh/MW/month) بیان می‌شود. این تبدیل با استفاده از نیاز سطح زمین مؤثر در حدود ۱۶،۰۰۰ متر مربع به ازای هر مگاوات پیک (MWp) ظرفیت نصب‌شده فتوولتائیک انجام شد:

$$E_{pv} = PV_{\text{yield}} \times \frac{10^6}{16000} \quad (6)$$

این تبدیل به‌عنوان یک روش مقیاس‌گذاری ساده برای در نظر گرفتن سطح زمین مورد نیاز سامانه‌های فتوولتائیک در مقیاس نیروگاهی (~۱۶،۰۰۰ m²/MWp) به کار می‌رود و بیانگر یک مدل دقیق عملکرد سیستم نیست. در مقابل، در انرژی بادی، ظرفیت نصب‌شده تا حد زیادی مستقل از مقیاس سطح زمین است؛ بنابراین این روش تنها برای انرژی خورشیدی اعمال می‌شود. این رویکرد امکان ارزیابی خروجی انرژی فتوولتائیک و بادی را بر مبنای یک شاخص قابل مقایسه (به ازای هر مگاوات ظرفیت نصب‌شده) فراهم می‌کند. ضریب سطح زمین مورد استفاده، نمایانگر شرایط متداول سامانه‌های مدرن فتوولتائیک در مقیاس نیروگاهی است و به‌طور ضمنی عواملی مانند راندمان متوسط ماژول‌ها (~۲۰٪)، چگالی استقرار و تلفات سطح سیستم را در بر می‌گیرد (Center for Sustainable Systems, University of Michigan, 2025).

۲.۴. پتانسیل انرژی بادی

پتانسیل انرژی بادی با استفاده از قانون توان باد به‌منظور برون‌یابی سرعت باد در ارتفاع‌های مختلف هاب (۱۰ متر و ۱۰۰ متر) محاسبه شد (Ghanghermeh et al., 2025; Roshan et al., 2025):

$$V_h = V_{10} \left(\frac{h}{10} \right)^\alpha \quad (7)$$

به طوری که

V_h : سرعت باد در ارتفاع (h متر بر ثانیه)

V_{10} : سرعت باد در ارتفاع ۱۰ متری (متر بر ثانیه)

α : ضریب تجربی برش باد = ۰/۱۴

سپس چگالی توان باد به صورت زیر محاسبه گردید:

$$P_{wind}(h) = \frac{1}{2} \rho V_h^3 \quad (8)$$

و پتانسیل ماهانه انرژی بادی به صورت زیر برآورد شد:

$$E_{wind}(h) = \frac{P_{wind}(h) \times t \times A_{rotor}}{C_{turbine}} \quad (9)$$

جایی که:

ρ : چگالی هوا = ۱/۲۲۵ کیلوگرم بر متر مکعب

t: میانگین ساعات هر ماه = ۷۳۰ ساعت

A_{rotor} : مساحت جاروب شده روتور توربین، برابر با $17,671 \approx \pi (150/2)^2$ متر مربع

$C_{turbine}$: ظرفیت مؤثر توربین = ۵/۵ مگاوات

$E_{wind}(h)$: انرژی بادی ماهانه بر حسب کیلووات ساعت به ازای هر مگاوات در ماه

این رویکرد نرمال سازی بر اساس ظرفیت، امکان مقایسه مستقیم با انرژی فتوولتائیک را فراهم می کند و بیانگر پتانسیل نسبی به ازای هر مگاوات ظرفیت نصب شده است، نه تولید واقعی انرژی.

در این مطالعه، پتانسیل انرژی بادی به طور مشخص در ارتفاع هاب ۱۰۰ متر ($E_{wind}(h)$) ارزیابی شده است، زیرا این ارتفاع نمایانگر شرایط عملی توربین های بادی مدرن در مقیاس نیروگاهی می باشد.

۲.۵. سهم نسبی مؤلفه های انرژی تجدیدپذیر

پتانسیل کل انرژی های تجدیدپذیر (TREP) حاصل از منابع خورشیدی و بادی به صورت زیر محاسبه شد:

$$TREP = E_{pv} + E_{wind100} \quad (10)$$

سهم نسبی هر یک از مؤلفه ها نیز به شکل زیر تعیین گردید:

$$S_{pv} = \frac{E_{pv}}{TREP}, S_{W100} = \frac{E_{wind100}}{TREP} \quad (11)$$

که در آن، S_{pv} و S_{W100} به ترتیب بیانگر سهم کسری هر یک از مؤلفه های انرژی تجدیدپذیر هستند.

۲.۶. نرمال سازی داده ها و تحلیل مؤلفه های اصلی (PCA)

به منظور حذف اثر تفاوت در مقیاس متغیرها و آماده سازی داده ها برای تحلیل های چندمتغیره، نرمال سازی Min-Max برای تمامی پارامترها به کار گرفته شد:

$$X' = \frac{X - X_{min}}{X_{max} - X_{min}} \quad (12)$$

به منظور جلوگیری از اختصاص وزن های یکسان به متغیرهایی که رفتار زمانی و نوسانات متفاوتی دارند، از تحلیل مؤلفه های اصلی (PCA) برای استخراج وزن های آماری مبتنی بر داده استفاده شد. با این حال، رفتار زمانی انرژی خورشیدی و بادی می تواند در مناطق جغرافیایی

مختلف به‌طور قابل‌توجهی متفاوت باشد. اعمال یک PCA واحد و سراسری برای تمامی ایستگاه‌ها می‌تواند این تفاوت‌های مکانی را پنهان کرده و به‌طور بالقوه اهمیت نسبی منابع انرژی را مخدوش سازد.

از این‌رو، تحلیل PCA به‌صورت جداگانه برای هر پیکسل انجام شد. این پیاده‌سازی مبتنی بر هر پیکسل جداگانه امکان ثبت روابط درونی میان دو منبع انرژی را برای هر مکان فراهم کرده، تضمین می‌کند که وزن‌ها مستقیماً از ساختار اقلیمی محلی هر موقعیت استخراج شوند، و در عین حال تغییرپذیری مکانی در سهم نسبی منابع انرژی حفظ گردد. این رویکرد امکان توسعه یک سامانه وابسته به مکان را فراهم می‌سازد که با شرایط واقعی سازگار است.

در ادامه، از PCA برای اختصاص وزن‌های آماری به هر متغیر استفاده شد. این وزن‌ها بر اساس قدر مطلق بارهای عاملی (loadings) مؤلفه اصلی اول محاسبه شدند، به‌گونه‌ای که وزن‌های استخراج‌شده بیانگر اهمیت آماری هر متغیر بوده و از اعمال وزن‌دهی یکنواخت و غیرنماینده جلوگیری می‌کنند:

$$w_i = \frac{|L_i|}{\sum |L|} \quad (13)$$

که در آن، L_i بار عاملی متغیر i و w_i وزن نرمال‌شده آن است.

۲.۷. مدل ادغام فازی

به‌منظور ادغام پتانسیل تولید انرژی‌های تجدیدپذیر (خورشیدی فتوولتائیک و بادی) با شاخص‌های تقاضای انرژی گرمایشی و سرمایشی (HDD و CDD)، از یک رویکرد تصمیم‌گیری چندمعیاره فازی (MCDM) استفاده شد. این روش به دلیل ماهیت ناهمگن معیارها و وجود عدم قطعیت در داده‌های اقلیمی و انرژی انتخاب گردید. نظریه مجموعه‌های فازی امکان مدیریت مؤثر ابهام را فراهم کرده و مدل‌سازی تعاملات پیچیده، هم‌افزایی‌ها و موازنه‌های میان عرضه و تقاضای انرژی را که روش‌های تجميع خطی قادر به نمایش مناسب آن‌ها نیستند، ممکن می‌سازد.

با توجه به تنوع بالای شرایط اقلیمی ایران، پنج سناریوی مناسب‌بودن فازی به‌منظور ارائه ارزیابی جامع توسعه داده شد:

سناریوی HDD پایین: اولویت‌دهی به مناطق با پتانسیل بالای انرژی تجدیدپذیر و حداقل تقاضای گرمایشی.

سناریوی HDD بالا: اولویت‌دهی به مناطق با پتانسیل بالای انرژی تجدیدپذیر و تقاضای بالای گرمایشی.

سناریوی CDD پایین: اولویت‌دهی به مناطق با پتانسیل بالای انرژی تجدیدپذیر و حداقل تقاضای سرمایشی.

سناریوی CDD بالا: اولویت‌دهی به مناطق با پتانسیل بالای انرژی تجدیدپذیر و تقاضای بالای سرمایشی.

علاوه بر این، دو سناریوی ترکیبی نیز به‌منظور انعکاس اولویت‌های راهبردی در سیستم انرژی ایران تعریف شد:

سناریوی تقاضای بالا (خودکفایی): این سناریو مکان‌هایی را شناسایی می‌کند که دارای پتانسیل بالای تولید انرژی تجدیدپذیر و هم‌زمان تقاضای بالای انرژی در هر دو بخش گرمایش و سرمایش هستند. این شاخص به‌صورت میانگین شاخص‌های فازی HDD بالا و CDD بالا محاسبه شد. این سناریو مناطقی را برجسته می‌کند که بیشترین قابلیت دستیابی به خودکفایی انرژی محلی را از طریق انطباق مصرف بالا (در تابستان و زمستان) با تولید بالای انرژی تجدیدپذیر در محل دارند.

سناریوی تقاضای پایین (مازاد انرژی / صادرکننده): این سناریو مکان‌هایی را مشخص می‌کند که دارای پتانسیل بالای تولید انرژی تجدیدپذیر، اما تقاضای پایین انرژی در هر دو بخش گرمایش و سرمایش هستند. این شاخص به‌صورت میانگین شاخص‌های فازی HDD پایین و CDD پایین محاسبه شد. این مناطق به دلیل ظرفیت بالای تولید و مصرف محلی نسبتاً پایین، گزینه‌های مناسبی برای تولیدکنندگان عمده انرژی تجدیدپذیر و صادرات برق محسوب می‌شوند.

این رویکرد امکان شناسایی دو نوع متمایز از مناطق بهینه را فراهم می‌سازد:

مناطق مناسب برای خودکفایی انرژی محلی و مناطق مناسب برای تولید در مقیاس بزرگ و صادرات انرژی تجدیدپذیر.

در گام نخست، تمامی متغیرهای ورودی با استفاده از نرمال‌سازی Min-Max سراسری در بازه [۰, ۱] و در تمام ایستگاه‌ها و گام‌های زمانی نرمال شدند:

نرمال‌سازی مستقیم (برای تولید انرژی و سناریوهای HDD بالا / CDD بالا):

$$X_{\text{norm}} = \frac{X - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min} + \varepsilon}, \varepsilon = 10^{-12} \quad (14)$$

نرمال‌سازی معکوس (برای سناریوهای HDD پایین و CDD پایین):

$$X_{\text{norm}} = \frac{X_{\text{max}} - X}{X_{\text{max}} - X_{\text{min}} + \varepsilon}, \varepsilon = 10^{-12} \quad (15)$$

که در آن، $\varepsilon = 10^{-12}$ یک مقدار بسیار کوچک برای جلوگیری از تقسیم بر صفر است و X بیانگر مقدار خام هر متغیر (تولید خورشیدی، تولید بادی، HDD یا CDD) می‌باشد. سپس، پتانسیل تجدیدپذیر وزنی (WRP) به صورت زیر محاسبه شد:

$$WRP = S_{pv} \times w_{pv} \times E_{pv \text{ norm}} + S_{W100} \times w_{W100} \times E_{W100 \text{ norm}} \quad (16)$$

که در آن، S_{pv} و $S_{(W_{100})}$ سهم نسبی انرژی خورشیدی و بادی از کل تولید تجدیدپذیر هستند و w_{pv} و $w_{(W_{100})}$ وزن‌های اختصاص یافته به هر ایستگاه می‌باشند که از تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) به دست آمده‌اند. در نهایت، شاخص فازی خام (FI) برای هر سناریو با استفاده از عملگر ضرب فازی به صورت زیر محاسبه گردید:

$$FI = \frac{WRP \times N}{WRP + N + \varepsilon} \quad (17)$$

که در آن، N مقدار نرمال شده شاخص تقاضای متناظر (HDD یا CDD) در شرایط بالا یا پایین است.

۲.۸. نرمال سازی نهایی مقایسه‌ای نقاط پیکسلی

از آنجا که عملگر ضرب فازی به طور ذاتی مقدار حداکثر نظری شاخص فازی خام را به 0.5 محدود می‌کند، یک مرحله نهایی نرمال سازی Min-Max به صورت مقایسه‌ای بین مناطق و پیکسل‌ها اعمال شد تا نتایج به بازه استاندارد $[0, 1]$ بازمقیاس شوند. این مرحله تضمین می‌کند که مناسب‌ترین منطقه در هر سناریو دقیقاً درجه عضویت ۱ را دریافت کند، در حالی که نامناسب‌ترین موقعیت به مقدار ۰ نزدیک می‌شود. شاخص نهایی مطلوبیت فازی به صورت زیر محاسبه می‌گردد:

$$FI_{\text{final}} = \frac{FI - FI_{\text{min}}}{FI_{\text{max}} - FI_{\text{min}} + \varepsilon} \quad (18)$$

این نرمال سازی نهایی، رتبه‌بندی نسبی مناطق را حفظ کرده و در عین حال مقادیر قابل تفسیر و استاندارد بین ۰ (کمترین مطلوبیت) تا ۱ (بیشترین مطلوبیت) ارائه می‌دهد. همچنین، این فرآیند امکان مقایسه مستقیم مکانی و تولید نقشه‌های مطلوبیت را در مقیاس‌های فصلی و سالانه فراهم می‌سازد.

۳. یافته‌ها

تحلیل الگوی فضایی تقاضای انرژی (HDD/CDD) و پتانسیل انرژی‌های تجدیدپذیر بادی - فتوولتائیک

الگوی فضایی نیازهای انرژی سرمایشی و گرمایشی در ایران نشان‌دهنده یک دوگانگی اقلیمی بسیار بارز است که به طور مستقیم بازتابی از کنترل‌های عرض جغرافیایی، ارتفاع، فاصله از دریا و الگوهای گردش عمومی جو می‌باشد. توزیع مکانی شاخص درجه-روز سرمایشی (CDD) نشان می‌دهد که بیشینه مقادیر آن عمدتاً در نیمه جنوبی کشور، به‌ویژه در سواحل خلیج فارس، دریای عمان و بخش‌هایی از جنوب شرق متمرکز شده است. این نواحی با مقادیر نزدیک به صدک ۹۰ (حدود ۷۷۹ درجه-روز) و حتی حداکثر بیش از ۹۰۰ درجه-روز، بیانگر بار سرمایشی بسیار بالا در طول سال هستند. این امر نه تنها ناشی از دماهای بالا، بلکه نتیجه ترکیب دما و رطوبت نسبی بالا در این مناطق است که موجب افزایش تقاضای واقعی انرژی برای تهویه مطبوع می‌شود. در مقابل، مناطق مرکزی و به‌ویژه نواحی مرتفع زاگرس و البرز، کاهش قابل توجهی در CDD نشان می‌دهند، به گونه‌ای که بخش‌هایی از این مناطق در دهک‌های پایین توزیع (کمتر از ۵۰ درجه-روز) قرار دارند. این توزیع نشان می‌دهد که حدود ۱۰ درصد از کشور عملاً نیاز ناچیزی به سرمایش دارد، که با ویژگی‌های اقلیمی سرد و نیمه‌سرد این نواحی همخوانی دارد. در این میان، مقدار میانگین کشوری حدود ۳۹۳ درجه-روز و میانه حدود ۳۳۷ درجه-روز، بیانگر آن است که نیمی از کشور دارای بار سرمایشی متوسط به بالا است، که اهمیت برنامه‌ریزی انرژی در این حوزه را دوچندان می‌کند (شکل ۱).

در نقطه مقابل، شاخص درجه-روز گرمایشی (HDD) الگوی فضایی تقریباً معکوسی را نشان می‌دهد. بیشترین مقادیر HDD در نواحی شمال غرب، غرب و ارتفاعات مرکزی دیده می‌شود، جایی که شرایط اقلیمی سردتر و زمستان‌های طولانی‌تر منجر به افزایش تقاضای انرژی گرمایشی می‌گردد. مقادیر بالای صدک ۹۰ (حدود ۹۴۵ درجه-روز) و حتی حداکثر بیش از ۲۱۰۰ درجه-روز در این نواحی، نشان‌دهنده شدت

بالای نیاز به گرمایش است. بطور کلی اگرچه میانگین نیاز به انرژی گرمایشی در کل کشور ۴۳۶ درجه روز گرمایش می‌باشد، اما ۱۳ درصد از محدوده مطالعاتی کمتر از ۵۰ درجه روز گرمایش در طی سال نیاز دارند. بگونه‌ای که نواحی جنوبی کشور، به‌ویژه سواحل جنوبی، تقریباً فاقد نیاز گرمایشی قابل توجه هستند و در برخی نقاط حتی مقادیر نزدیک به صفر مشاهده می‌شود (شکل ۱).

ضریب همبستگی بسیار قوی و منفی بین CDD و HDD (حدود ۰/۸۶-) تأییدکننده این دوگانگی فضایی است. این رابطه نشان می‌دهد که مناطق دارای بار سرمایشی بالا، عموماً دارای بار گرمایشی پایین هستند و بالعکس. این نکته از منظر برنامه‌ریزی انرژی اهمیت ویژه‌ای دارد، زیرا بیانگر آن است که نیازهای انرژی در کشور به‌صورت فضایی بسیار ناهمگن و مکمل یکدیگر هستند.

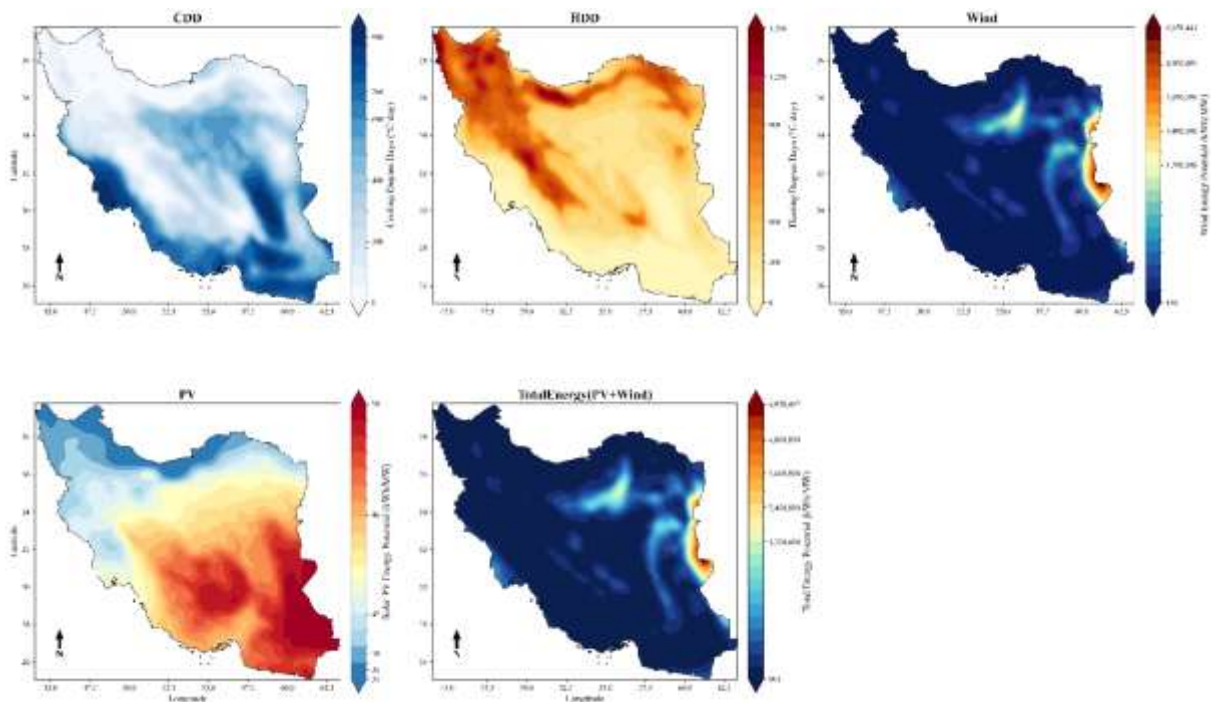
در ادامه، بررسی پتانسیل انرژی خورشیدی (PV) نشان می‌دهد که این متغیر برخلاف CDD و HDD، توزیع یکنواخت‌تری دارد، اما همچنان الگوهای فضایی مشخصی را دنبال می‌کند. بطور کلی میانگین آن برای کل کشور مقدار ۴۲ کیلووات‌ساعت بر مگاوات

را نشان می‌دهد. در عین حال بیشترین پتانسیل فتوولتئیک در نواحی مرکزی، جنوبی و جنوب شرقی کشور با مقادیر بیش از ۴۵ کیلووات‌ساعت بر مگاوات دیده می‌شود، جایی که تابش خورشیدی بالا، آسمان صاف و رطوبت پایین شرایط ایده‌آلی برای تولید انرژی خورشیدی فراهم می‌کند. مقادیر نزدیک به صدم ۹۰ (حدود ۴۷/۷۱ کیلووات‌ساعت بر مگاوات) در این نواحی، نشان‌دهنده ظرفیت بسیار بالای تولید انرژی خورشیدی است. در مقابل، نواحی شمالی و شمال غربی کشور، به‌ویژه مناطق تحت تأثیر سامانه‌های مرطوب خزی، مقادیر پایین‌تری از $PV < 35$ کیلووات‌ساعت بر مگاوات را نشان می‌دهند. این کاهش عمدتاً به دلیل افزایش ابرناکی و کاهش ساعات آفتابی است. با این حال، پراکندگی داده‌ها نشان می‌دهد که حدود ۴۲ درصد از ایستگاه‌ها دارای مقادیر کمتر از میانگین هستند، که بیانگر آن است که توزیع PV نسبت به میانگین کشوری کمی به سمت مقادیر بالاتر متمایل است (شکل ۱).

همبستگی مثبت نسبتاً قوی بین CDD و PV (حدود ۰/۶۰) نکته بسیار مهمی را نشان می‌دهد: مناطقی که نیاز بیشتری به سرمایش دارند، عموماً از پتانسیل بالاتری برای تولید انرژی خورشیدی نیز برخوردارند. این هم‌راستایی، یک مزیت کلیدی برای توسعه سیستم‌های خورشیدی در این مناطق محسوب می‌شود، زیرا تولید انرژی با زمان اوج مصرف (تابستان) هم‌زمان است. در مقابل، همبستگی منفی بین HDD و PV (حدود ۰/۶۴-) نشان می‌دهد که در مناطق سرد، پتانسیل خورشیدی کاهش می‌یابد، که می‌تواند چالش‌هایی را برای تأمین انرژی در فصل سرد ایجاد کند.

پتانسیل انرژی بادی در ارتفاع ۱۰۰ متر، الگوی فضایی بسیار متمرکزتری نسبت به سایر متغیرها دارد. برخلاف PV که نسبتاً گسترده است، انرژی بادی به‌شدت وابسته به شرایط موضعی مانند توپوگرافی، کانالیزه شدن جریان هوا و الگوهای سینوپتیک است. اگرچه میانگین کل کشور ۲۶۷۸۵۴ کیلووات‌ساعت بر مگاوات می‌باشد، اما نقشه‌ها نشان می‌دهند که بیشترین پتانسیل بادی در نواحی خاصی از شرق، شمال شرق، برخی بخش‌های مرکزی و کریدورهای خاصی در امتداد رشته‌کوه‌ها متمرکز شده است. این نواحی با مقادیر بسیار بالا (تا بیش از ۵ و حتی ۶ میلیون کیلووات‌ساعت بر مگاوات) مشخص می‌شوند، در حالی که بخش اعظم کشور دارای مقادیر بسیار پایین‌تری بوده بطوری که ۶۸ درصد از پیکسل‌های مطالعاتی مقادیر پایین‌تر از میانگین کشور را تجربه نموده‌اند. این ناهمگنی شدید در توزیع انرژی بادی با این واقعیت نیز تأیید می‌شود که حدود ۶۸ درصد از داده‌ها دارای مقادیری کمتر از میانگین کشوری هستند. این بدان معناست که پتانسیل بادی در ایران به‌صورت لکه‌ای و متمرکز است و تنها در نواحی خاصی به‌صورت اقتصادی قابل بهره‌برداری است. صدم ۵۰ حدود ۱۵۲۷۳۱ و صدم ۹۰ حدود ۵۲۵۵۱۳ کیلووات‌ساعت بر مگاوات نیز نشان‌دهنده این توزیع بسیار چوله هستند. همبستگی بین انرژی بادی و نیازهای انرژی (چه سرمایشی و چه گرمایشی) نسبتاً ضعیف است (حدود ۰/۱۴ برای CDD و ۰/۱۷- برای HDD). این نشان می‌دهد که برخلاف انرژی خورشیدی، انرژی بادی لزوماً با الگوهای مصرف هم‌راستا نیست و بیشتر توسط عوامل دینامیکی جو کنترل می‌شود تا شرایط حرارتی سطح (شکل ۱).

در نهایت، بررسی انرژی ترکیبی (Wind + PV) نشان می‌دهد که این متغیر به‌شدت تحت تأثیر انرژی بادی قرار دارد، به‌طوری که الگوی فضایی آن تقریباً مشابه با نقشه باد است. این موضوع از نظر تحلیلی بسیار مهم است، زیرا نشان می‌دهد که در ترکیب ساده این دو منبع، سهم انرژی بادی در تعیین الگوی نهایی غالب است. این امر به‌ویژه در مناطقی که پتانسیل بادی بسیار بالا دارند، منجر به افزایش چشمگیر انرژی ترکیبی می‌شود، حتی اگر PV در آن ناحیه متوسط باشد. با این حال، از منظر کاربردی، نکته کلیدی در تحلیل ترکیبی این است که صرفاً بیشینه بودن انرژی تولیدی به معنای بهینه بودن آن منطقه نیست، بلکه باید هم‌زمانی و هم‌مکانی تولید و مصرف نیز در نظر گرفته شود. در اینجا، تحلیل همبستگی‌ها و الگوهای فضایی نقش تعیین‌کننده‌ای پیدا می‌کند.



شکل ۱. میانگین سالانه الگوهای فضایی تقاضای انرژی سرمایشی-گرمایشی و پتانسیل تولید انرژی بادی-خورشید در ایران

ترکیب نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که نواحی جنوبی کشور، به‌ویژه جنوب شرق، از یک مزیت دوگانه برخوردارند: از یک سو دارای CDD بالا (نیاز زیاد به سرمایش) هستند و از سوی دیگر دارای پتانسیل بالای PV. این هم‌راستایی، این مناطق را به گزینه‌های بسیار مناسبی برای توسعه انرژی خورشیدی تبدیل می‌کند. در مقابل، این مناطق معمولاً پتانسیل بادی بالایی ندارند، بنابراین ترکیب باد و خورشید در اینجا بیشتر به نفع خورشید خواهد بود. در نواحی مرکزی و برخی بخش‌های شرقی، شرایط متفاوتی مشاهده می‌شود. این مناطق نه‌تنها دارای پتانسیل مناسب PV هستند، بلکه در برخی نقاط دارای کربدورهای بادی نیز می‌باشند. این هم‌پوشانی نسبی، فرصت مناسبی برای توسعه سیستم‌های ترکیبی واقعی (هیبرید) فراهم می‌کند، جایی که هر دو منبع انرژی می‌توانند به‌صورت مکمل عمل کنند. در مقابل، نواحی شمال غرب و غرب کشور که دارای HDD بالا هستند، با چالش مضاعفی مواجه‌اند: از یک سو نیاز بالایی به گرمایش دارند و از سوی دیگر پتانسیل PV در آن‌ها کمتر است. انرژی بادی در برخی از این نواحی می‌تواند نقش جبرانی ایفا کند، اما به دلیل همبستگی ضعیف آن با نیاز گرمایشی، این جبران به‌صورت کامل اتفاق نمی‌افتد.

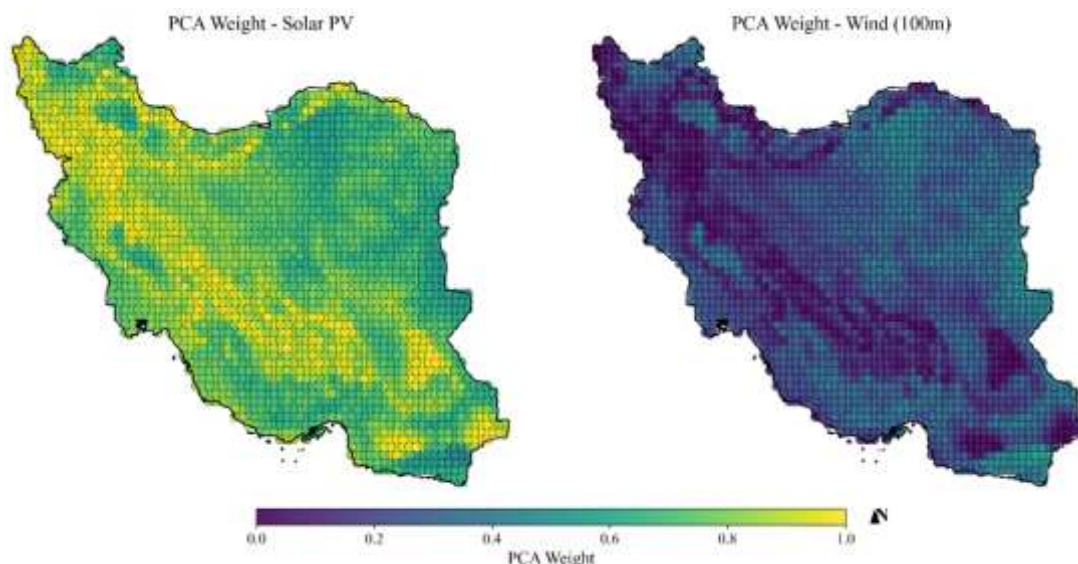
بطور کلی از یافته‌های بالا می‌توان چنین برداشت نمود که بهترین مناطق برای توسعه انرژی ترکیبی بادی-فتوولتائیک در ایران، الزاماً مناطقی نیستند که بیشترین مقدار انرژی تولیدی را دارند، بلکه مناطقی هستند که در آن‌ها نوعی تعادل بین تولید و مصرف وجود دارد. بر این اساس نواحی جنوب و جنوب شرق کشور می‌توانند مناسب برای توسعه PV با هم‌راستایی قوی با نیاز سرمایشی باشند. از سوی دیگر شرق و بخش‌هایی از مرکز، مناسب برای سیستم‌های ترکیبی واقعی (Wind + PV) بوده و در عین حال کربدورهای بادی خاص، مناسب برای بهره‌برداری تخصصی از انرژی بادی می‌باشند. اما شمال غرب و غرب کشور نیازمند راهکارهای مکمل برای تأمین انرژی گرمایشی می‌باشند.

تحلیل فضایی سناریوهای فازی پهنه‌بندی انرژی هیبریدی (باد + فتوولتائیک) در ایران بر اساس نیازهای گرمایشی، سرمایشی
در ابتدا و پیش از اجرای سناریوهای فازی، لازم بود سهم نسبی انرژی فتوولتائیک (S_{PV}) و انرژی بادی در ارتفاع ۱۰۰ متر (S_(W_100)) از کل تولید انرژی تجدیدپذیر هیبریدی محاسبه شود. نتایج نشان داد که به‌طور میانگین در سطح ایران، سهم انرژی بادی از کل انرژی تجدیدپذیر هیبریدی باد-فتوولتائیک بیش از ۹۸/۰ درصد و سهم انرژی فتوولتائیک کمتر از ۲/۰ درصد است.

در مقابل، وزن‌های استخراج‌شده برای انرژی فتوولتائیک (w_{PV}) و انرژی بادی در ارتفاع ۱۰۰ متر (w_(W_100)) که بر پایه تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) برای هر پیکسل در سطح کشور محاسبه شده‌اند، به‌ترتیب دارای میانگین ۷۸/۰ و ۲۲/۰ هستند. این نتایج نشان می‌دهد که در چارچوب تحلیل PCA، وزن اختصاص‌یافته به انرژی فتوولتائیک به‌طور قابل توجهی بیشتر از انرژی بادی است، اگرچه سهم انرژی فتوولتائیک از کل انرژی تجدیدپذیر چیزی کمتر از ۲ درصد می‌باشد.

در شکل (۲)، پراکنش فضایی وزن‌های استخراج‌شده از PCA برای دو متغیر انرژی بادی و فتوولتائیک در سطح کشور نمایش داده شده است. از منظر الگوی فضایی، مقادیر بیشینه وزن‌های فتوولتائیک (بیش از ۸/۰) عمدتاً در نوار شمالی و سواحل جنوبی دریای خزر و همچنین

در امتداد رشته‌کوه‌های زاگرس با راستای شمال‌غربی-جنوب‌شرقی مشاهده می‌شود. آستانه صدک پنجاهم برای این وزن‌ها برابر با ۰/۷۶ و صدک نودم برابر با ۰/۹۵ برآورد شده است. در مجموع، حدود ۵۳ درصد از مناطق مطالعه مقادیر وزنی کمتر از میانگین ملی را تجربه کرده‌اند. در مقابل، برای انرژی بادی، کمینه مقادیر وزن در نواحی شمالی و امتداد رشته‌کوه زاگرس مشاهده شده و با افزایش فاصله از این مناطق، مقدار وزن‌ها افزایش می‌یابد. همچنین حدود ۴۵ درصد از مناطق مطالعه مقادیر کمتر از میانگین ملی را نشان داده‌اند. صدک پنجاهم و نودم وزن‌های انرژی بادی نیز به‌ترتیب برابر با ۰/۲۴ و ۰/۳۶ برآورد شده‌اند (شکل ۲).



شکل ۲. توزیع فضایی وزن‌های استخراج‌شده بر اساس تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) برای انرژی بادی و فتوولتائیک در سطح کشور

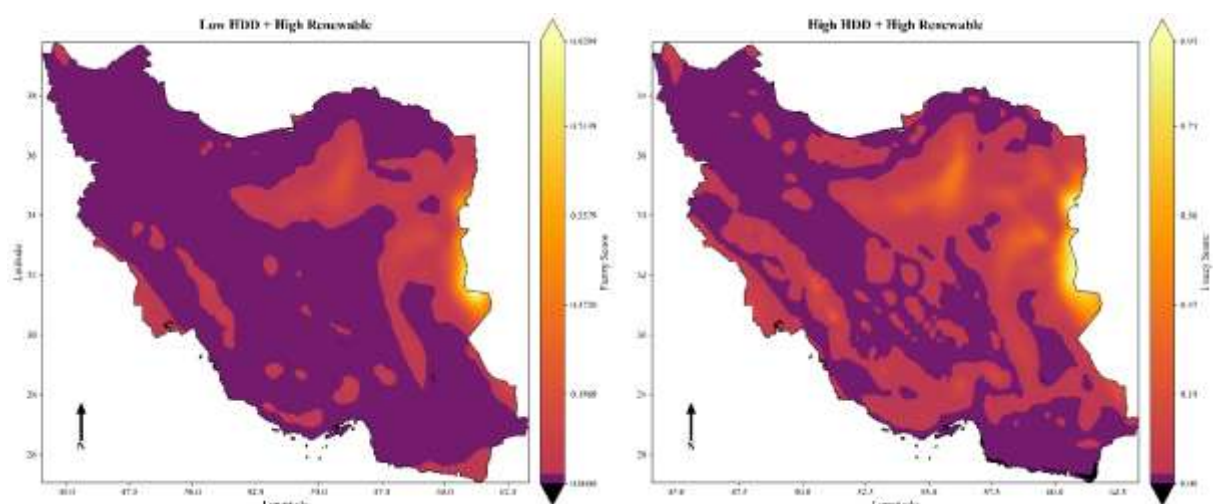
اما در ادامه این تحلیل، سه پیل نقشه‌سازی ارائه شده، بر اساس منطق فازی به بررسی تعامل بین «نیاز انرژی حرارتی/سرمایشی» و پتانسیل تولید انرژی تجدیدپذیر هیبریدی «باد + فتوولتائیک» در سرتاسر ایران پرداخته‌اند. مقادیر فازی بین ۰ تا ۱ متغیر هستند؛ مقادیر نزدیک به ۱ نشان‌دهنده مناطق ایده‌آل برای مکان‌یابی (هم‌زمان نیاز بالا + پتانسیل تولید بسیار بالا برای مصرف محلی و یا هم‌زمان نیاز کم + پتانسیل تولید بسیار بالا برای انرژی مازاد و صادرات) و مقادیر نزدیک به ۰ مناطق نامناسب یا کم‌پتانسیل را نمایان می‌سازند. در نقشه‌های ترسیم شده مقادیر زرد روشن = امتیاز فازی بسیار بالا (بهترین شرایط) و بنفش تیره = امتیاز بسیار پایین است.

– سناریوهای تعامل نیاز گرمایشی و پتانسیل تولید انرژی هیبریدی بادی-فتوولتائیک

در شکل (۳)، پیل چپ (Low HDD + High Renewable) نقشه نشان می‌دهد که مناطق با کمترین نیاز گرمایشی (یعنی زمستان‌های ملایم‌تر یا کوتاه‌تر) و هم‌زمان پتانسیل بالای تولید هیبریدی، عمدتاً در نوار شرقی و جنوب‌شرقی ایران متمرکز شده‌اند. رنگ زرد-نارنجی روشن در استان سیستان و بلوچستان، شرق کرمان و بخش‌هایی از خراسان جنوبی مشهود است. این الگو کاملاً منطبق با اقلیم خشک و نیمه‌خشک این مناطق است؛ تابش خورشیدی سالانه بسیار بالا (بیش از ۲۲۰۰ کیلووات‌ساعت بر مگاوات) و بادهای ۱۲۰ روزه سیستان، پتانسیل PV و باد را به حداکثر می‌رساند، در حالی که HDD پایین (زمستان‌های نسبتاً معتدل) نیاز گرمایشی را کاهش می‌دهد. میانگین فازی ۰/۰۳ و صدک ۹۰ حدود ۰/۰۷ نشان‌دهنده آن است که تنها بخش کوچکی از کشور (کمتر از ۱۰ درصد مساحت) امتیاز بالای ۰/۰۷ را کسب کرده‌اند. بیش از ۹۷/۵۷ درصد مقادیر فازی زیر ۰/۲ هستند که حاکی از تمرکز شدید پتانسیل در نقاط خاص جغرافیایی است. در مقابل، نواحی مرکزی (کویر لوت و دشت کویر) و غربی (زاگرس) با رنگ بنفش تیره، به دلیل HDD نسبتاً بالاتر و پتانسیل پایین‌تر خورشیدی/بادی، امتیاز فازی نزدیک به صفر دارند.

در پیل راست نقشه (High HDD + High Renewable) الگوی فضایی تغییر قابل توجهی نشان می‌دهد. مناطق با بالاترین نیاز گرمایشی (زمستان‌های سرد و طولانی، مانند شمال‌شرق، ارتفاعات البرز شرقی و بخش‌هایی از خراسان رضوی) هم‌زمان با پتانسیل بالای هیبریدی، مساحت بیشتری از نقشه را با رنگ‌های نارنجی و زرد روشن پوشش داده‌اند. این امر نشان می‌دهد که در سناریوی «نیاز بالا + تولید بالا»، شمال‌شرق ایران (نزدیک مرز افغانستان) به عنوان نقاط داغ اصلی ظاهر می‌شود. از نظر جغرافیایی، این مناطق دارای زمستان‌های سرد (HDD بالا) اما تابش خورشیدی مناسب در تابستان و بادهای قوی در دشت‌های شرقی هستند. میانگین فازی به ۰/۰۶ افزایش یافته، صدک ۹۰ به ۰/۱۳ رسیده و درصد مقادیر زیر ۰/۲ به ۹۳/۵۰ درصد کاهش یافته است. این تغییر آماری حاکی از آن است که در شرایط نیاز

گرمایشی بیشتر، مناطق بیشتری (تقریباً ۶-۷ درصد مساحت اضافی نسبت به سناریوی Low HDD) به محدوده امتیازات می‌ان‌به‌عالی وارد می‌شوند. تفاوت فضایی کلیدی بین دو این دو سناریو نشان می‌دهد که در شرایط سناریوی مربوط به کمینه تقاضای انرژی گرمایشی در پیل چپ بیشتر بر جنوب شرق متمرکز است (پتانسیل خورشیدی غالب)، در حالی که پیل راست (سناریوی بیشینه نیاز به انرژی گرمایشی) شمال شرق را برجسته می‌کند (تعادل بهتر بین باد و خورشید در شرایط سردتر). این تشابه/تفاوت نشان می‌دهد که پتانسیل هیبریدی باد و فتوولتائیک در شرق ایران آن قدر قوی است که حتی با وجود نیاز گرمایشی بالا، امتیاز فازی را به سطوح نزدیک به ۱ می‌رساند (شکل ۳).

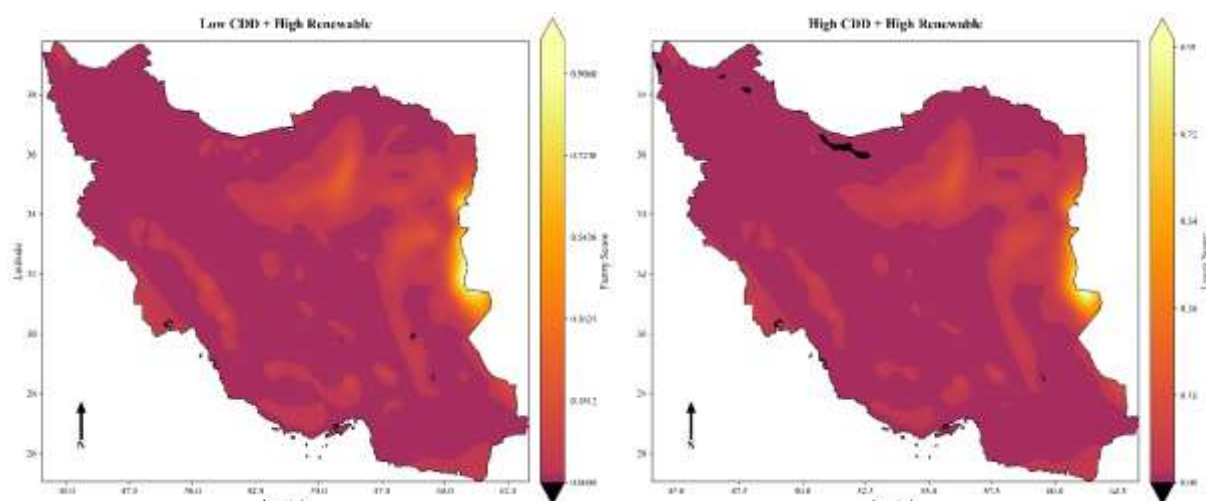


شکل ۳. الگوی فضایی نمرات فازی پهنه‌بندی شده برای سناریوی کمینه نیاز به انرژی گرمایشی و بیشینه پتانسیل تولید انرژی هیبریدی بادی-فتوولتائیک (Low HDD + High Renewable) و سناریوی بیشینه نیاز به انرژی گرمایشی و بیشینه پتانسیل تولید انرژی هیبریدی بادی-فتوولتائیک (High HDD + High Renewable)

– سناریوهای تعامل نیاز سرمایشی و پتانسیل تولید انرژی هیبریدی بادی-فتوولتائیک

در شکل (۴)، پیل چپ (Low CDD + High Renewable) مشابه پیل Low HDD در شکل (۳) عمل می‌کند اما با شدت کمتر. مناطق با کمترین نیاز سرمایشی (تابستان‌های ملایم‌تر، عمدتاً شمال و شمال شرق) و پتانسیل بالای هیبریدی، دوباره در شرق و جنوب شرق ظاهر می‌شوند، ولی مساحت زرد روشن کمتر از سناریوی HDD است. میانگین ۰/۰۴ و صدک ۹۰ حدود ۰/۰۹ نشان‌دهنده تمرکز شدیدتر نسبت به HDD است. از نظر اقلیمی، مناطق با کمینه نیاز به انرژی سرمایشی در مناطق کوهستانی و شمالی (مانند ارتفاعات البرز) رخ می‌دهد، اما پتانسیل هیبریدی این نواحی متوسط است؛ بنابراین نقشه بیشتر بر دشت‌های شرقی (سیستان) تکیه دارد که تابستان‌های بسیار گرم دارند اما CDD را در سناریوی Low نگه می‌دارند. بیش از ۹۰/۳۶ درصد نمرات فازی زیر ۰/۲ هستند که تأیید می‌کند مناطق مناسب برای «نیاز سرمایشی کم + تولید بالا» محدود به نوار شرقی هستند.

در پیل راست که به بیشینه نیاز انرژی سرمایشی و بیشینه تولید انرژی هیبریدی اختصاص دارد (High CDD + High Renewable) نقشه به شدت تغییر می‌کند و مناطق وسیع‌تری از جنوب شرق، شرق و حتی بخش‌هایی از جنوب مرکزی (کرمان و هرمزگان) با رنگ نارنجی-قرمز روشن پوشیده می‌شوند. بیشینه نیاز به انرژی سرمایشی (تابستان‌های بسیار گرم و طولانی در فلات مرکزی و جنوب شرق) همراه با پتانسیل بالای PV (تابش شدید) و باد، امتیاز فازی را به سطوح بالاتری می‌رساند. میانگین ۰/۰۴ (مشابه Low CDD) اما صدک ۹۰ به ۰/۰۷ و درصد زیر ۰/۲ به ۸۷/۹۸ درصد کاهش یافته است. این نشان می‌دهد که سناریوی High CDD مساحت بیشتری از کشور را به عنوان «مناسب» شناسایی می‌کند، زیرا نیاز سرمایشی بالا در مناطق خشک جنوب شرق دقیقاً با پتانسیل خورشیدی هم‌خوانی دارد. تفاوت فضایی بارز برای این دو سناریو نشان می‌دهد که در شرایط کمینه نیاز سرمایشی، پیل چپ بیشتر شمال شرق را برجسته می‌کند (مناطق معتدل‌تر)، در حالی که در سناریوی افزایش تقاضای CDD، پیل راست جنوب شرق را به عنوان قطب اصلی نشان می‌دهد (تابستان‌های شدید اما تولید PV عالی). مقایسه شکل (۳) با شکل (۴) نشان می‌دهد که CDD در ایران تأثیر قوی‌تری بر گسترش مناطق مناسب دارد، زیرا تابستان‌های گرم در اکثر فلات مرکزی غالب است و با پتانسیل خورشیدی هم‌افزایی بیشتری ایجاد می‌کند.

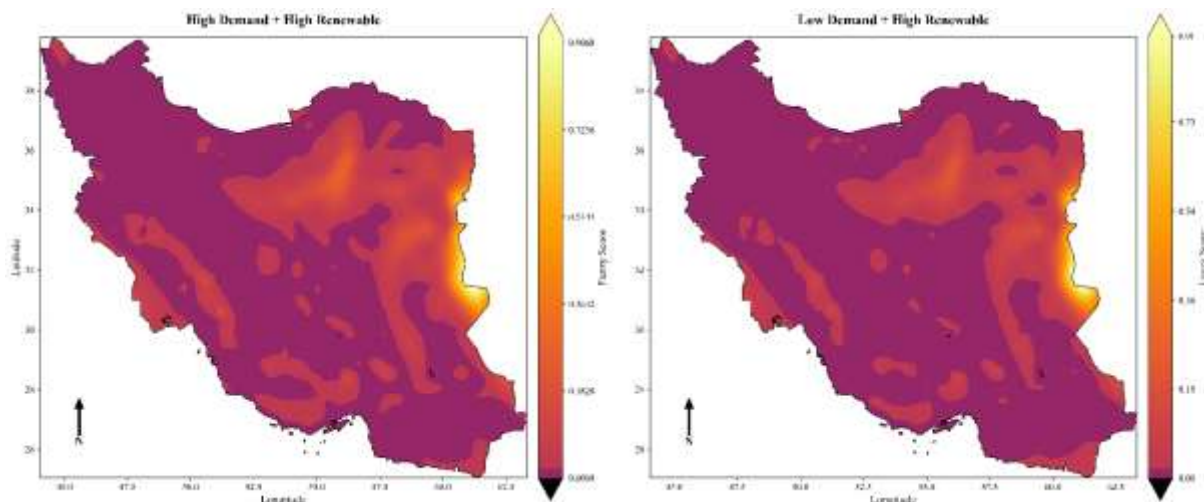


شکل ۴. الگوی فضایی نمرات فازی پهنه‌بندی‌شده برای سناریوی کمینه نیاز به انرژی سرمایشی و بیشینه پتانسیل تولید انرژی هیبریدی بادی-فتوولتائیک (Low CDD + High Renewable) و سناریوی بیشینه نیاز به انرژی سرمایشی و بیشینه پتانسیل تولید انرژی هیبریدی بادی-فتوولتائیک (High CDD + High Renewable)

– سناریوهای تقاضای ترکیبی بین تعامل نیاز گرمایشی-سرمایشی و پتانسیل انرژی هیبریدی منطقه

در شکل (۵)، پنل چپ (High Demand + High Renewable) ترکیبی از دو سناریوی قبلی است و مناطق با «نیاز بالا به هر دو انرژی گرمایش و سرمایش» (یعنی نوسانات دمایی شدید فصلی) همراه با پتانسیل بالای تولید را نشان می‌دهد. در این پنل نقشه شبیه پنل (شکل ۴) High CDD است اما با مساحت زرد-نارنجی بیشتر در شرق و جنوب‌شرق. میانگین فازی ۰/۰۵، صدک ۹۰ حدود ۰/۱۰ و درصد زیر ۰/۲ حدود ۸۵/۴۷ درصد است. از نظر جغرافیایی، این سناریو مناطق «پرفشار یا حداکثر تقاضا» مانند دشت‌های شرقی (با زمستان‌های سرد و تابستان‌های بسیار گرم) را به عنوان بهترین گزینه برای تأمین محلی انرژی هیبریدی شناسایی می‌کند. این مناطق نه‌تنها پتانسیل تولید بالایی دارند، بلکه تقاضای محلی (گرمایش زمستانی + سرمایش تابستانی) را هم به خوبی پوشش می‌دهند و می‌توانند به کاهش وابستگی به شبکه ملی کمک کنند.

پنل راست (Low Demand + High Renewable) شکل (۵) برعکس، مناطق با «نیاز کم به گرمایش و سرمایش» اما پتانسیل تولید بسیار بالا را هدف قرار می‌دهد. نقشه دوباره بر شرق و جنوب‌شرق تمرکز دارد، ولی با شدت کمتر از پنل. High Demand بر مبنای داده‌های استخراج شده میانگین کل کشور مقدار ۰/۰۴ را نشان می‌دهد و از سوی دیگر، آستانه صدک ۹۰ مقادیر فازی برای این سناریو حدود ۰/۰۸ بوده و در کل مساحت ۸۳ درصد از کشور زیر نمره فازی ۰/۲ قرار دارند. این سناریو مناطق کم‌جمعیت اما پرتپانسیل (مانند دشت‌های سیستان و بلوچستان) را برای تولید و صادرات انرژی (به جای مصرف محلی) مناسب می‌داند. تفاوت کلیدی با پنل چپ High Demand در این بوده که مساحت بیشتری را فعال می‌کند (چون تقاضا در مناطق خشک شدیدتر است)، در حالی که در سناریوی Low Demand بر نقاط خالص تولید تمرکز دارد. مقایسه آماری نشان می‌دهد که سناریوی High Demand بیشترین مساحت مناسب (کمترین مساحت زیر آستانه نمره فازی ۰/۲) را ایجاد می‌کند.



شکل ۵. الگوی فضایی نمرات فازی پهنه‌بندی‌شده برای سناریوی بیشینه نیاز به انرژی سرمایشی-گرمایشی و بیشینه پتانسیل تولید انرژی هیبریدی بادی-فتوولتائیک (High Demand + High Renewable) و سناریوی کمینه نیاز به انرژی سرمایشی-گرمایشی و بیشینه پتانسیل تولید انرژی هیبریدی بادی-فتوولتائیک (Low Demand + High Renewable)

۴. نتیجه‌گیری و بحث

این پژوهش با هدف پر کردن شکاف موجود در ادبیات برنامه‌ریزی انرژی تجدیدپذیر ایران طراحی شد. مطالعات پیشین عمدتاً بر ارزیابی جداگانه پتانسیل باد یا خورشید تمرکز داشته‌اند و به‌ندرت تعامل فضایی-فازی بین نیازهای حرارتی-سرمایشی و پتانسیل هیبریدی باد-فتوولتائیک را به‌صورت یکپارچه بررسی کرده‌اند. پژوهش حاضر با به‌کارگیری چارچوب فازی مبتنی بر داده‌های پیکسلی در سرتاسر منطقه و وزن‌دهی از طریق تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA)، این ارتباط را در مقیاس ملی مورد ارزیابی قرار داد. نتایج به‌وضوح نشان می‌دهد که رابطه بین پتانسیل تجدیدپذیر و تقاضای حرارتی-سرمایشی در ایران یکنواخت نیست، بلکه الگوهای فضایی قوی و معناداری را آشکار می‌سازد که ریشه در تنوع اقلیمی، توپوگرافی و الگوهای جوی کشور دارد. این یافته با نتایج مطالعات ملی و بین‌المللی که بر ناهمگنی فضایی منابع انرژی تجدیدپذیر و ضرورت تحلیل‌های مکانی تأکید دارند، هم‌راستا است (Atabi, 2004; Ghobadian et al., 2009; Bahrami, M., 2013; Jacobson et al., 2026; & Abbaszadeh, 2013; Hosseini et al., 2013).

مهم‌ترین یافته پژوهش، برتری ساختاری جنوب و جنوب‌شرق ایران در سناریوهای High Demand و High CDD است. این مناطق به‌صورت همزمان دارای نیاز سرمایشی بسیار بالا (CDD) و پتانسیل فتوولتائیک استثنایی هستند. هم‌راستایی قوی این دو عامل، جنوب‌شرق را به قطب اصلی توسعه خورشیدی برای تأمین محلی انرژی تبدیل کرده است. نقشه‌های پنل High Demand و High CDD به‌وضوح نشان می‌دهند که مساحت قابل‌توجهی از این نواحی به محدوده امتیازات فازی بالا (نزدیک به ۱) وارد شده و درصد مقادیر زیر آستانه فازی ۰/۲ به ۸۷/۹۸ درصد در سناریوی High CDD و ۸۵/۴۷ درصد در سناریوی High Demand کاهش یافته است. این الگو کاملاً منطبق با اقلیم خشک و تابستان‌های طولانی و شدید این مناطق است که تابش خورشیدی سالانه بالای ۲۲۰۰-۲۵۰۰ کیلووات‌ساعت بر مگاوات را فراهم می‌کند. این نتیجه با مطالعات جهانی که هم‌پوشانی بالای تقاضای سرمایشی و تولید خورشیدی را در مناطق گرم و خشک نشان داده‌اند، هم‌خوانی دارد (Li, 2018; Carvalho et al., 2026).

در مقابل، پتانسیل بادی در این نواحی نسبتاً پایین‌تر است؛ بنابراین توسعه هیبریدی در جنوب‌شرق بیشتر به نفع خورشید خواهد بود و باد نقش مکمل فرعی ایفا می‌کند؛ الگویی که در مطالعات مکمل‌بودن منابع نیز گزارش شده است (Jonasson, E., & Temiz, 2026).

در شرق و بخش‌هایی از مرکز کشور (به‌ویژه خراسان رضوی و جنوبی، بخش‌هایی از کرمان و یزد) شرایط متفاوتی مشاهده می‌شود. این مناطق نه‌تنها پتانسیل PV مناسبی دارند، بلکه از کریدورهای بادی قابل‌توجهی نیز برخوردارند. سناریوهای Low HDD و High Demand در این نواحی بیشترین هم‌افزایی را نشان می‌دهند و سیستم‌های هیبریدی واقعی (باد-فتوولتائیک) را توجیه‌پذیر می‌سازند. میانگین فازی بالاتر (۰/۰۵-۰/۰۶) و صدک ۹۰ حدود ۰/۱۰-۰/۱۳ در این سناریوها، وجود تعادل بهتری بین تولید و مصرف محلی را تأیید می‌کند. نقشه‌ها در پنل‌های High Demand و High HDD، زرد-نارنجی روشن گسترده‌تری را در این نواحی نمایش می‌دهند که حاکی از عملکرد دوگانه زمستانی (جبران HDD و تابستانی تولید فتوولتائیک) است. این یافته با مطالعاتی که بر نقش مکمل زمانی و فضایی منابع

بادی و خورشیدی تأکید دارند، هم‌راستا است (Jurasz et al., 2020; Heide et al., 2011)، و در مطالعات داخلی نیز وجود کریدورهای بادی مناسب در شرق ایران تأیید شده است (Mohamadi et al., 2021).

در مقابل، نواحی شمال‌غرب و غرب کشور (آذربایجان، کردستان، همدان و بخش‌هایی از زاگرس) با چالش مضاعف مواجه‌اند. نیاز گرمایشی شدید همراه با پتانسیل PV نسبتاً پایین، باعث شده است که حتی در سناریوی High HDD نیز امتیازات فازی به سطوح بالایی نرسد. باد در برخی کریدورهای محدود این مناطق می‌تواند جبران‌کننده باشد، اما همبستگی ضعیف تولید بادی با الگوی نیاز گرمایشی، کارایی سیستم را کاهش می‌دهد. در نقشه‌ها طیف بنفش غالب در این نواحی را نشان می‌دهند که ناهمخوانی فضایی بین تقاضا و عرضه تجدیدپذیر را آشکار می‌سازد.

سناریوهای پیشینه نیاز سرمایش و گرمایش بصورت جداگانه و ترکیبی (High HDD, High CDD و High Demand) همواره مساحت بیشتری از کشور را به محدوده امتیازات مناسب وارد می‌کنند و درصد مقادیر فازی زیر آستانه ۰/۲ را کاهش می‌دهند. این امر تأیید می‌کند که تقاضای حرارتی-سرمایشی بالا در ایران، به‌ویژه CDD، نقش تقویت‌کننده دارد و پتانسیل تجدیدپذیر را به‌صورت مؤثرتری فعال می‌سازد. این نتیجه با رویکردهای نوین برنامه‌ریزی انرژی که بر اهمیت هم‌زمانی تولید و مصرف تأکید دارند، سازگار است. (Brown et al., 2018) برعکس، سناریوهای Low بیشتر مناطق «خالص تولید» را شناسایی می‌کنند که برای صادرات انرژی و کاهش تولید اجباری مناسب‌ترند؛ موضوعی که در گزارش‌های بین‌المللی نیز به آن اشاره شده است. (Gielen et al., 2019) بیش از ۸۳-۹۷/۵۷ درصد مقادیر فازی در همه سناریوها زیر آستانه ۰/۲ قرار دارند که نشان‌دهنده ناهمگونی شدید فضایی و تمرکز پتانسیل در کمتر از ۱۵-۲۰ درصد مساحت کشور است. میانگین کلی فازی (۰/۰۳-۰/۰۶) و درصد مناطقی که امتیازشان زیر میانگین ملی است (۶۶-۷۲ درصد) نیز بر همین تمرکز شدید تأکید می‌کند.

از منظر روش‌شناختی، استفاده از رویکرد فازی به‌جای وزن‌دهی ملی یکسان، حساسیت تحلیل را به ناهمگنی اقلیمی ایران به‌طور قابل‌توجهی افزایش داد. این روش اجازه داد تا وزن نسبی باد و خورشید در هر ناحیه‌ی مطالعاتی بر اساس شرایط محلی تعیین شود و نتایج واقع‌بینانه‌تری نسبت به مطالعات قبلی ارائه دهد. این رویکرد با مطالعات مبتنی بر تصمیم‌گیری چندمعیاره و GIS که دقت تحلیل‌های مکانی را افزایش می‌دهند، هم‌خوانی دارد (Zambrano-Asanza et al., 2021; Khan et al., 2023)، و استفاده از PCA نیز به‌عنوان یک روش استاندارد در تحلیل داده‌های اقلیمی شناخته می‌شود (Al Shabaan et al., 2026).

با وجود این دستاوردها، پژوهش حاضر محدودیت‌هایی نیز دارد. تحلیل بر پایه داده‌های اقلیمی بلندمدت و پتانسیل نظری منابع استوار است و ظرفیت واقعی نصب (با در نظر گرفتن محدودیت‌های زمین، شبکه، حفاظت محیط زیست و تعارضات کاربری اراضی) را ارزیابی نکرده است. همچنین از میانگین‌های بلندمدت استفاده شده و بنابراین نوسانات سالانه، رویدادهای حدی و تأثیر تغییر اقلیم را به‌طور کامل پوشش نمی‌دهند. HDD و CDD به‌عنوان شاخص‌های جایگزین (نماینده) برای تقاضا انتخاب شدند، اما رفتار آینده مصرف (بهبود بهره‌وری ساختمان‌ها، نفوذ پمپ‌های حرارتی و افزایش تقاضای سرمایشی) را در نظر نگرفته است.

تحقیقات آتی باید سناریوهای تغییر اقلیم (کاهش HDD و افزایش CDD) را ادغام کند، محدودیت‌های زمین و شبکه را وارد مدل نماید و ارزیابی فنی-اقتصادی و بهینه‌سازی چندهدفه را انجام دهد. مطالعات تطبیقی با کشورهای همسایه (ترکیه، پاکستان، عربستان) نیز می‌تواند الگوهای منطقه‌ای را روشن‌تر سازد؛ همان‌گونه که در ادبیات سیستم‌های انرژی منطقه‌ای نیز توصیه شده است (Tlili, 2015; Uddin et al., 2021).

در جمع‌بندی نهایی، نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که بهترین مناطق برای توسعه انرژی هیبریدی بادی-فتوولتائیک در ایران، الزاماً نقاط دارای بیشترین تولید نیستند، بلکه مناطقی هستند که تعادل مناسبی بین تولید و تقاضای محلی ایجاد می‌کنند. جنوب و جنوب‌شرق کشور به‌عنوان قطب خورشیدی با هم‌راستایی قوی با نیاز سرمایشی، شرق و مرکز به‌عنوان مناطق هیبریدی واقعی، و کریدورهای بادی خاص به‌عنوان مناطق تخصصی باد، هر کدام نقش عملکردی متمایزی در سیستم انرژی ملی خواهند داشت. شمال‌غرب و غرب نیز نیازمند راهکارهای مکمل (ذخیره‌سازی، شبکه قوی‌تر یا فناوری‌های نوین) هستند.

رویکرد بهینه برنامه‌ریزی انرژی ایران باید «منطقه‌بندی عملکردی» باشد؛ یعنی هر منطقه بر اساس مزیت نسبی خود (تأمین محلی، تولید صادراتی یا تعادل شبکه) در یک سیستم یکپارچه ملی مشارکت کند. این چارچوب نه‌تن‌ها بهره‌وری اقتصادی و فنی را افزایش می‌دهد، بلکه ریسک محدودسازی تولید را کاهش می‌دهد، امنیت انرژی را تقویت می‌کند و گذار عادلانه‌تر به سمت اقتصاد کم‌کربن را تسهیل می‌نماید. در نهایت، این مطالعه تأکید می‌کند که برنامه‌ریزی انرژی تجدیدپذیر در کشوری با تنوع اقلیمی و جغرافیایی بالا مانند ایران، بدون در نظر گرفتن بعد فضایی-تقاضایی محکوم به ناکارآمدی است.

تقدیر و تشکر:

این مقاله برگرفته از طرح پژوهشی به شماره ۱۷۹۰ است که با حمایت دانشگاه گلستان به انجام رسیده است. نویسندگان بر خود لازم می‌دانند از حمایت‌های علمی و مالی آن دانشگاه صمیمانه قدردانی نمایند.

۵. منابع

1. Ahmadi, P. , Dincer, I. , & Rosen, M. A. (2023). Energy and exergy analysis of heat pump systems. *Energy Conversion and Management*, 279, 116731.
2. Al Shabaan, G. N. , & Altarawneh, I. S. (2026). Decoding Climatic Drivers of Solar Photovoltaic Output in Arid Climates: Integrating Sensitivity, Lag Dynamics, and Principal Component Analysis for Forecasting Accuracy. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 86, 104851.
3. Atabi, F. (2004). Renewable energy in Iran: Challenges and opportunities for sustainable development. *International Journal of Environmental Science & Technology*, 1(1), 69-80.
4. Babiarz, B. , Krawczyk, D. A. , Siuta-Oлча, A. , Manuel, C. D. , Jaworski, A. , Barnat, E. , Cholewa, T. , Sadowska, B. , Bocian, M. , Gnieciak, M. , Werner-Juszczuk, A. , Kłopotowski, M. , Gawryluk, D. , Stachniewicz, R. , Święcicki, A. , & Rynkowski, P. (2024). Energy efficiency in buildings: Toward climate neutrality. *Energies*, 17(18), 4680.
5. Bahrami, M. , & Abbaszadeh, P. (2013). An overview of renewable energies in Iran. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 24, 198-208.
6. Brown, T. , Schlachtberger, D. , Kies, A. , Schramm, S. , & Greiner, M. (2018). Synergies of sector coupling and transmission reinforcement in a cost-optimised, highly renewable European energy system. *Energy*, 160, 720-739.
7. Carvalho, D. , Faria, L. , Silva, R. , & Rocha, A. (2026). Climate change impacts on photovoltaic solar energy production in Portugal. *Energy and Climate Change*, 100235.
8. Center for Sustainable Systems, University of Michigan. (2025). Solar PV Energy Factsheet. Retrieved February 21, 2026, from <https://css.umich.edu/publications/factsheets/energy/solar-pv-energy-factsheet>
9. Fernandes, J. , Remédios, S. , Gérard, F. , Bačan, A. , Stroleny, M. , Drosou, V. , & Christodoulaki, R. (2025). The decarbonisation of heating and cooling following EU directives. *Energies*, 18(13), 3432.
10. Ghanghermeh, A. A. , Roshan, G. R. , Martinez, A. , & Iglesias, G. (2025). Offshore wind resources in the Caspian Sea under climate change. *Energy*, 328, 136355.
11. Ghobadian, B. , Najafi, G. , Rahimi, H. , & Yusaf, T. F. (2009). Future of renewable energies in Iran. *Renewable and sustainable energy reviews*, 13(3), 689-695.
12. Gielen, D. , Gorini, R. , Wagner, N. , Leme, R. , Gutierrez, L. , Prakash, G. , ... & Renner, M. (2019). Global energy transformation: a roadmap to 2050.
13. Heide, D. , Greiner, M. , Von Bremen, L. , & Hoffmann, C. (2011). Reduced storage and balancing needs in a fully renewable European power system with excess wind and solar power generation. *Renewable Energy*, 36(9), 2515-2523.
14. Hosseini, S. E. , Andwari, A. M. , Wahid, M. A. , & Bagheri, G. (2013). A review on green energy potentials in Iran. *Renewable and sustainable energy reviews*, 27, 533-545.
15. International Energy Agency (IEA). (2023). *Energy profile: Iran*. Paris: IEA.
16. Jacobson, M. Z. , Sambor, D. J. , Fan, Y. F. , Mühlbauer, A. , & DiBari, G. C. (2026). The impact of enhanced geothermal systems on transitioning all energy sectors in 150 countries to 100% clean, renewable energy. *Cell Reports Sustainability*.
17. Jonasson, E. , & Temiz, I. (2026). Evaluating complementarity: A review of metrics and their implications for hybrid renewable energy systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 226, 116422.
18. Kalogirou, S. A. (2014). *Solar energy engineering: Processes and systems*. Academic Press.
19. Khan, A. , Ali, Y. , & Pamucar, D. (2023). Solar PV power plant site selection using a GIS-based non-linear multi-criteria optimization technique. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(20), 57378-57397.
20. Kulovesi, K. , Oberthür, S. , Van Asselt, H. , & Savaresi, A. (2024). The European Climate Law: Strengthening EU procedural climate governance? *Journal of Environmental Law*, 36(1), 23-42.
21. Li, C. (2018). Comparative Performance Analysis of Grid-Connected PV Power Systems with Different PV Technologies in the Hot Summer and Cold Winter Zone. *International Journal of Photoenergy*, 2018(1), 8307563.

22. Maduta, C. , D'Agostino, D. , Tsemekidi-Tzeiranaki, S. , Castellazzi, L. , Melica, G. , & Bertoldi, P. (2023). Towards climate neutrality within the European Union: Assessment of the Energy Performance of Buildings Directive implementation. *Energy and Buildings*, 301, 113716.
23. Maleki, A. , & Khajeh, M. G. (2017). Wind energy assessment in Iran. *Renewable Energy*, 101, 1015–1025.
24. Ministry of Energy of Iran. (2022). *National energy balance report*. Tehran.
25. Mohamadi, H. , Saeedi, A. , Firoozi, Z. , Zangabadi, S. S. , & Veisi, S. (2021). Assessment of wind energy potential and economic evaluation of four wind turbine models for the east of Iran. *Heliyon*, 7(6).
26. Mostafaeipour, A. , et al. (2016). Wind energy feasibility in Iran. *Energy Exploration & Exploitation*, 34(3), 367–389.
27. Munćan, V. , Mujan, I. , Macura, D. , & Anđelković, A. S. (2024). The state of district heating and cooling in Europe. *Energy*, 304, 132191.
28. Nasserri, M. , et al. (2022). Climate change impacts on heating and cooling degree days in Iran. *Climate Dynamics*, 58, 1231–1248.
29. Razmjoo, A. , & Sumper, A. (2021). Renewable energy potential in Iran. *Energy Reports*, 7, 291–305.
30. Rezaei, M. , et al. (2021). Spatial analysis of renewable energy resources in Iran. *Journal of Cleaner Production*, 279, 123456.
31. Roshan, G. R. , Saman, A. A. , Sarli, R. , Martinez, A. , & Iglesias, G. (2025). Projected shifts in wind energy availability in response to climate change in southwestern Iran. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 83, 104655.
32. Roshan, G. , Farrokhzad, M. , & Attia, S. (2017). *Defining thermal comfort boundaries for heating and cooling demand estimation in Iran's urban settlements*. *Building and Environment*, 121, 168–189.
33. Russo, M. A. , Carvalho, D. , Martins, N. , & Monteiro, A. (2023). Future perspectives for wind and solar electricity production under high-resolution climate change scenarios. *Journal of Cleaner Production*, 404, 136997.
34. Shakouri, H. , & Yazdani, M. (2023). Climate variability and electricity demand in Iran. *Energy Policy*, 173, 113345.
35. Tlili, I. (2015). Renewable energy in Saudi Arabia: current status and future potentials. *Environment, development and sustainability*, 17(4), 859–886.
36. Uddin, R. , Shaikh, A. J. , Khan, H. R. , Shirazi, M. A. , Rashid, A. , & Qazi, S. A. (2021). Renewable energy perspectives of Pakistan and Turkey: Current analysis and policy recommendations. *Sustainability*, 13(6), 3349.
37. UNDP. (2022). *Iran energy transition report*. United Nations Development Programme.
38. Wang, Y. , Ma, M. , Zhou, N. , & Ma, Z. (2025). Evaluating the decarbonization of residential building electrification worldwide. *Sustainable Cities and Society*, 130, 106549.
39. Zakari, Y. , Vuille, F. , & Lehning, M. (2022). Climate change impact assessment for future wind and solar energy installations in India. *Frontiers in Energy Research*, 10, 859321.
40. Zambrano-Asanza, S. , Quiros-Tortos, J. , & Franco, J. F. (2021). Optimal site selection for photovoltaic power plants using a GIS-based multi-criteria decision making and spatial overlay with electric load. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 143, 110853.
41. Żelazna, A. , & Pawłowski, A. (2025). Role of heat pumps in decarbonization of the building sector. *Energies*, 18(13), 3255.