



## Providing a comprehensive framework for site selection of hybrid wind-PV farms (case study: South Khorasan province)

Mohammadreza Khalili Tari<sup>1</sup> | Younes Noorollahi<sup>2\*</sup>

1. Master of Science, Department of Sustainable Energy Systems Engineering, Faculty of Energy Engineering and Sustainable Resources, University of Tehran, Tehran, Iran. Email: [mohammadmkt123@gmail.com](mailto:mohammadmkt123@gmail.com)

2. Corresponding Author, Professor, Department of Sustainable Energy Systems Engineering, Faculty of Energy Engineering and Sustainable Resources, University of Tehran, Tehran, Iran. Email: [noorollahi@ut.ac.ir](mailto:noorollahi@ut.ac.ir)

### ARTICLE INFO

**Article type:**  
Research Paper

**Article History:**  
Received 21 October 2022  
Revised 20 November 2022  
Accepted 20 December 2023  
Published Online 06 May 2024

**Keywords:**  
*Site selection,*  
*Hybrid renewable energy systems,*  
*Wind-PV farms,*  
*Multi-criteria decision-making,*  
*Geographic information system.*

### ABSTRACT

Environmental pollution, climate change, and lack of fossil fuel resources are among the factors that have caused countries to move towards renewable sources. Among renewable sources, the share of wind and solar energy in electricity production has grown a lot in recent years. Due to the uncertain and unpredictable nature of these sources, using them individually to meet load demand has low reliability. By combining wind and solar resources and forming a hybrid renewable energy system (HRES), the reliability of the system will increase. Also, some costs can be saved. The first and most important step in developing renewable farms is to find suitable and optimal places to build these farms. This study aims to provide a comprehensive framework for site selection of hybrid wind-PV farms in South Khorasan province. A multi-criteria decision-making approach and geographic information system were combined to achieve this goal. This study used the fuzzy membership functions and the Analytic Hierarchy Process (AHP) to standardize and weight evaluation criteria. The results of this research showed that 0.02 percent (36.54 square kilometers) of the area of the province has a very good potential for the development of hybrid wind-PV farms.

**Cite this article:** Khalili Tari, M. & Noorollahi, Y. (2023). Providing a comprehensive framework for site selection of hybrid wind-PV farms (case study: South Khorasan province). *Journal of Sustainable Energy Systems*, 2 (3), 237-255. DOI: <http://doi.org/10.22059/ses.2024.369625.1046>



© Mohammadreza Khalili Tari, Younes Noorollahi.  
DOI: <http://doi.org/10.22059/ses.2024.369625.1046>

**Publisher:** University of Tehran Press.

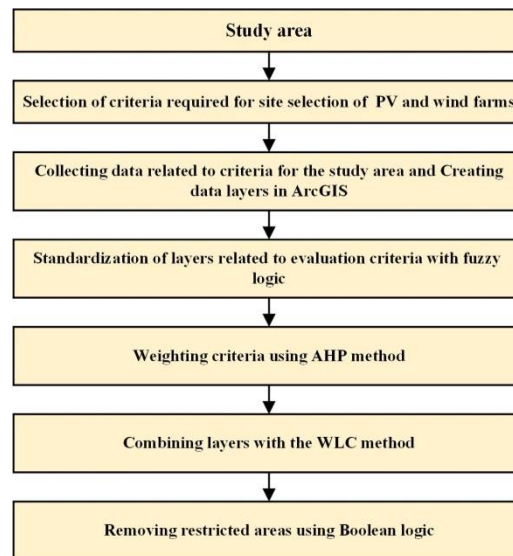
### Introduction

The use of renewable energy to meet the electricity demand has grown a lot in recent years. Among the renewable sources, wind and solar energy are very popular and in 2021, for the first time, they included more than a percentage of the world's electricity production. The main challenge in using wind and solar energy sources is their uncertain and unpredictable nature. By combining wind and solar sources and creating a hybrid renewable energy system (HRES), system reliability is increased. The purpose of this study is to find suitable locations for the construction of wind farms, solar PV, and hybrid wind-PV farms in South Khorasan province.

### Materials and methods

In this research, first by reviewing past studies, the required criteria for site selection of wind and solar farms were selected. Then the data related to each criterion were collected and processed. In the next step, data layers were standardized with fuzzy logic and placed in the zero-to-one range. Then each layer was weighted by the AHP method. Finally, with the weighted linear combination method

(WLC), the fuzzy layers were combined, and the restricted areas were removed with Boolean logic (Fig. 1).



**Fig. 1.** The steps of the present study.

## Results and discussion

In this study, the map of the province was divided into five classes for the construction of PV, wind, and hybrid wind-PV farms. These five classes are based on the values of land suitability: Unsuitable (0), low (0-0.3), moderate (0.3-0.5), high (0.5-0.7) and very high (0.7-1). About 62% of the area of South Khorasan province is not suitable for the construction of wind-PV hybrid farms. In the classified map for the development of hybrid wind-PV farms, 2.73 percent (4060.10 square kilometers) of the province's areas are in the high category and 0.02 percent (36.54 square kilometers) are in the very high category. Finally, six sites were selected for the development of hybrid farms. Among the sites, site 1 has the largest area (17.55 km<sup>2</sup>), and site 4 has the smallest area (1.89 km<sup>2</sup>).



## ارائه چارچوبی جامع برای مکان‌یابی مزارع هیبریدی بادی-فتوولتائیک (مطالعه موردی: استان خراسان جنوبی)

محمد رضا خلیلی طاری<sup>۱</sup> | یونس نوراللهی<sup>۲\*</sup>

۱. کارشناسی ارشد، گروه مهندسی سیستم‌های انرژی پایدار، دانشکده مهندسی انرژی و منابع پایدار، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: mohammadmkt123@gmail.com  
۲. نویسنده مسئول، استاد، گروه مهندسی سیستم‌های انرژی پایدار، دانشکده مهندسی انرژی و منابع پایدار، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: noorollahi@ut.ac.ir

### اطلاعات مقاله

### چکیده

#### نوع مقاله:

پژوهشی

#### تاریخ‌های مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۷/۲۹

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۰۸/۲۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۹/۲۹

تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۰۲/۱۷

#### کلیدواژه:

مکان‌یابی،

سیستم‌های انرژی تجدیدپذیر هیبریدی،

مزارع بادی-فتوولتائیک،

رویکرد تصمیم‌گیری چندمعیاره،

سیستم اطلاعات جغرافیایی

آلودگی‌های زیست‌محیطی، تغییرات اقلیمی و کمبود منابع سوخت فسیلی، از جمله عواملی هستند که باعث حرکت کشورها به سمت منابع تجدیدپذیر شده‌اند. بین منابع تجدیدپذیر، سهم انرژی بادی و خورشیدی در تولید برق، در سال‌های اخیر رشد زیادی داشته است. به دلیل ماهیت نامشخص و غیر قابل پیش‌بینی این منابع، استفاده از آن‌ها به صورت منفرد، برای تأمین تقاضای بار، قابلیت اطمینان پایینی دارد. با ترکیب منابع بادی و خورشیدی و تشکیل یک سیستم انرژی تجدیدپذیر هیبریدی، قابلیت اطمینان سیستم بالاتر خواهد رفت و همچنین می‌توان در برخی هزینه‌ها صرفه‌جویی کرد. اولین و مهم‌ترین مرحله در فرایند توسعه مزارع تجدیدپذیر، یافتن مکان‌های مناسب و بهینه برای احداث این مزارع است. هدف این مطالعه، ارائه یک چارچوب جامع برای مکان‌یابی مزارع هیبریدی بادی-فتوولتائیک در استان خراسان جنوبی است. برای نیل به این هدف، رویکرد تصمیم‌گیری چندمعیاره و سیستم اطلاعات جغرافیایی با یکدیگر ترکیب شدند. در این مطالعه برای استانداردسازی و وزن‌دهی به معیارهای ارزیابی، به ترتیب از توابع عضویت فازی و روش فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی استفاده شد. نتایج این پژوهش نشان داد ۰/۰۲ درصد (۳۶/۵۴ کیلومتر مربع) از مساحت استان، پتانسیل بسیار خوبی برای توسعه مزارع هیبریدی بادی-فتوولتائیک دارند.

**استناد:** خلیلی طاری، محمد رضا و نوراللهی، یونس (۱۴۰۲). ارائه چارچوبی جامع برای مکان‌یابی مزارع هیبریدی بادی-فتوولتائیک (مطالعه موردی: استان خراسان جنوبی). فصلنامه سیستم‌های انرژی پایدار، ۲ (۳) ۲۵۵-۲۳۷. DOI: <http://doi.org/10.22059/ses.2024.369625.1046>

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

© محمد رضا خلیلی طاری، یونس نوراللهی.

DOI: <http://doi.org/10.22059/ses.2024.369625.1046>



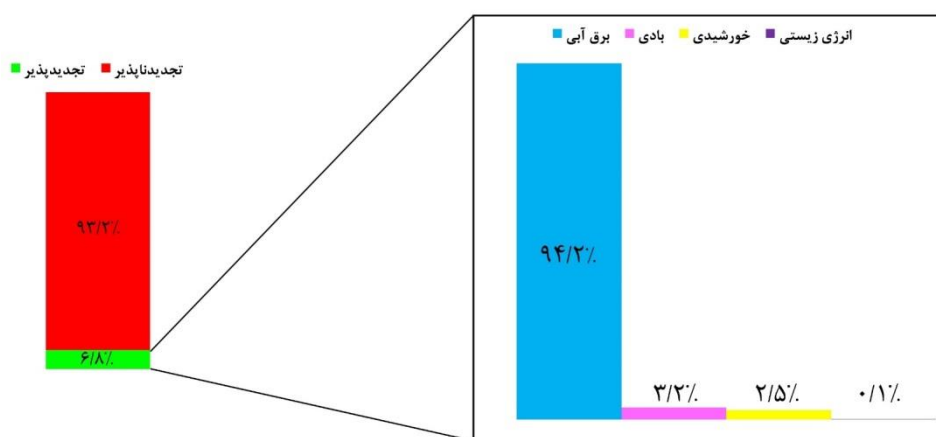
## ۱. مقدمه

بهره‌گیری از انرژی‌های تجدیدپذیر در سال‌های اخیر به موضوع مهمی تبدیل شده است، زیرا جهان به دنبال راه‌هایی برای کاهش اتکای خود به سوخت‌های فسیلی و مبارزه با تغییرات اقلیمی است. طبق گزارش وضعیت جهانی REN21<sup>۱</sup> [۱]، انرژی‌های تجدیدپذیر ۲۸/۳ درصد از برق جهان را در سال ۲۰۲۱ تولید کردند. در سال ۲۰۲۱ منابع بادی و خورشیدی، برای اولین بار، بیش از ۱۰ درصد از تولید برق جهانی را تشکیل دادند [۱].

چالش اصلی در استفاده از منابع انرژی بادی و خورشیدی، ماهیت نامشخص و متناوب آن‌ها به دلیل شرایط آب‌وهوایی، فصلی و اقلیمی است [۲]. از این رو استفاده از آن‌ها به صورت منفرد، برای تأمین تقاضای بار، چندان قابل اعتماد نیست. سیستم‌های انرژی تجدیدپذیر هیبریدی<sup>۲</sup> این‌گونه تعریف می‌شوند: یک سیستم انرژی الکتریکی مستقل یا متصل به شبکه که از یک منبع تجدیدپذیر و یک یا چند منبع دیگر تشکیل شده است. این منابع می‌توانند متعارف، تجدیدپذیر یا مختلط باشند [۳]. با ترکیب منابع بادی و خورشیدی قابلیت اطمینان سیستم بالاتر می‌رود [۲] و همچنین می‌توان در بعضی هزینه‌ها صرفه‌جویی کرد [۴].

ایران پتانسیل مطلوبی برای تولید برق از منابع بادی و خورشیدی دارد. این کشور دارای میانگین تابش سالانه ۴/۵-۵/۵ کیلووات ساعت بر متر مربع در روز و ۳۰۰ روز آفتابی طی سال در دو سوم زمین‌های خود است [۵]. بنا به پروژه پتانسیل‌سنجی منابع بادی انجام‌گرفته در سازمان انرژی‌های تجدیدپذیر و بهره‌وری انرژی برق، میزان ظرفیت اسمی دریافت‌شده از ۶۰ ایستگاه در مناطق مختلف کشور حدود ۶۰ هزار مگاوات است و میزان انرژی قابل استحصال از لحاظ اقتصادی برابر ۱۸ هزار مگاوات است [۶]. به‌رغم داشتن این پتانسیل خوب، براساس آخرین ترازنامه انرژی ایران [۷] در سال ۱۳۹۹، تنها ۶/۸ درصد از برق تولیدی کشور از منابع تجدیدپذیر (با در نظر گرفتن نیروگاه‌های برق‌آبی) بوده است. شکل ۱ سهم منابع مختلف در تولید برق ایران را نشان می‌دهد. اگرچه ایران بیشترین نیروی برق‌آبی را در خاورمیانه تولید می‌کند، اما با ادامه این روند، این کشور در معرض خشکسالی‌های منطقه‌ای قرار می‌گیرد که در چند سال گذشته بیشتر شده است [۸].

اولین و مهم‌ترین گام برای توسعه منابع تجدیدپذیر، یافتن مکان‌های مناسب به منظور احداث نیروگاه‌ها است. انتخاب درست می‌تواند پتانسیل تولید انرژی را به حداکثر برساند و همچنین هزینه‌های ساخت و بهره‌برداری نیروگاه را کاهش دهد [۵]. تا کنون مطالعه جامعی برای مکان‌یابی نیروگاه‌های هیبریدی بادی-خورشیدی در ایران صورت نگرفته است. هدف این مطالعه، ارائه چارچوبی به منظور یافتن مکان‌های مناسب برای احداث مزارع بادی، خورشیدی فتوولتائیک و هیبریدی بادی-فتوولتائیک است. این چارچوب مبتنی بر سیستم اطلاعات جغرافیایی، رویکرد تصمیم‌گیری چندمعیاره، منطق فازی و منطق بولین است.



شکل ۱. منابع تولید برق در ایران در سال ۲۰۲۰-۲۰۲۱ ([۷])

تصمیم‌گیری چندمعیاره فرایندی است برای تعیین بهترین راه‌حل ممکن، با در نظر گرفتن معیارهایی که در فرایند انتخاب تأثیرگذار هستند [۹]. این رویکرد کمک بزرگی به تصمیم‌گیران در حل مسائل پیچیده با معیارهای متعدد می‌کند. تصمیم‌گیری چندمعیاره با ارائه یک فرایند ساختاریافته و سیستماتیک، به تصمیم‌گیرندگان اجازه می‌دهد تا اثرات بالقوه و معاوضه‌های مرتبط با گزینه‌های مختلف را درک کنند، که منجر به انتخاب‌های آگاهانه‌تری می‌شود که با اولویت‌های آن‌ها همخوانی دارد [۹].

سیستم اطلاعات جغرافیایی یک سیستم فضایی است که انواع داده‌ها را ایجاد، مدیریت، تجزیه و تحلیل و نقشه‌برداری می‌کند [۱۰]. GIS داده‌ها را به نقشه متصل می‌کند و داده‌های مکانی را با اطلاعات توصیفی یکپارچه می‌کند [۱۰]. ترکیبی از سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی و روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره یک ابزار تحلیلی قدرتمند برای حل مسائل پیچیده فضایی ایجاد می‌کند [۱۱]. این رویکرد یکپارچه، معروف به GIS-MCDM، امکان ارزیابی گزینه‌های مناسب را بر اساس عوامل و معیارهای مختلف فراهم می‌کند [۱۲].

عزیزخانی و همکاران [۱۳]، مرونی و همکاران [۱۴] و کولاک و همکاران [۱۵] از ترکیب روش فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی<sup>۱</sup> و GIS برای مکان‌یابی نیروگاه‌های فتوولتائیک خورشیدی استفاده کردند. آن‌ها ابتدا برای نرمال‌سازی معیارها آن‌ها را در دسته‌های مختلف طبقه‌بندی کردند و به هر دسته یک ارزش دادند. سپس، برای وزن‌دهی معیارها روش AHP را به کار بردند. در نهایت برای ارزیابی گزینه‌ها، از روش ترکیب خطی وزنی<sup>۲</sup> استفاده کردند. عساکره و همکاران [۱۶]، ذوقی و همکاران [۱۷] و نوراللهی و همکاران [۵]، مقادیر هر معیار را به کمک توابع عضویت فازی در محدوده صفر تا یک قرار دادند و سپس از روش AHP برای وزن‌دهی به معیارها استفاده کردند. لوزانو و همکاران [۱۸] در مطالعه خود از روش AHP برای وزن‌دهی به معیارها و برای ارزیابی گزینه‌های مکانی از دو روش<sup>۳</sup> TOPSIS و<sup>۴</sup> ELECTRE استفاده کردند.

مرادی و همکاران [۱۹]، بیسیرو و همکاران [۲۰] و آرکا و سیتیروغلو [۲۱] با تلفیق AHP، GIS و روش WLC، مکان‌های مناسب برای احداث مزارع بادی را شناسایی کردند. ویلاکرسس و همکاران [۲۲] پژوهشی با هدف پیاده‌سازی سیستم اطلاعات جغرافیایی با روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره، برای شناسایی مکان‌های مستعد احداث مزرعه بادی انجام دادند. در این پژوهش، برای وزن‌دهی به معیارها روش AHP و برای ارزیابی گزینه‌ها چهار روش<sup>۵</sup> OWA،<sup>۶</sup> OCRA،<sup>۷</sup> VIKOR و<sup>۸</sup> TOPSIS به کار گرفته شدند. لی و همکاران [۲۳] با ادغام سیستم اطلاعات جغرافیایی، AHP فازی و VIKOR فازی، مکان‌های مناسب برای احداث مزارع بادی را استخراج کردند. ترکان [۲۴] از ترکیب GIS، BWM و WLC برای مکان‌یابی مزارع بادی استفاده کرد. کوچ و همکاران [۲۵] مطالعه‌ای با هدف تعیین مکان‌های مناسب برای احداث مزارع هیبریدی بادی-خورشیدی انجام دادند. آن‌ها معیارها را طبقه‌بندی کردند و به هر طبقه ارزشی بین ۱ تا ۴ دادند. در گام بعد با جمع کردن ارزش‌های هر نقطه مکانی، مکان‌های احتمالی برای احداث نیروگاه بادی، خورشیدی و بادی-خورشیدی را شناسایی کردند. در نهایت، از روش AHP جهت ارزیابی چهار شهرستان استان ایغدیر ترکیه، برای احداث نیروگاه هیبریدی استفاده کردند.

در این پژوهش روش AHP برای وزن‌دهی به معیارها به کار گرفته شده است. همچنین، GIS و WLC برای ارزیابی گزینه‌های مکانی استفاده شدند. وجه تمایز این مطالعه با تحقیقات مشابه، تشکیل ماتریس مقایسات زوجی در روش AHP با استفاده از مطالعات قبلی است. همچنین سایت‌های مستعد برای احداث نیروگاه هیبریدی، با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای اعتبارسنجی شده‌اند. شکل ۲ مراحل انجام این پژوهش را نشان می‌دهد. در بخش ۱.۲ منطقه مورد مطالعه بررسی می‌شود. پس از مرور ادبیات مطالعات انجام‌شده (بخش ۱)، معیارهای مورد نیاز برای مکان‌یابی نیروگاه‌های بادی و فتوولتائیک انتخاب شدند (بخش ۲.۲). در این پژوهش معیارها به دو دسته معیارهای ارزیابی<sup>۸</sup> و معیارهای حذف<sup>۹</sup> تقسیم شدند. معیارهای ارزیابی، برای

1. Analytic Hierarchy Process (AHP)
2. Weighted Linear Combination (WLC)
3. Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS)
4. Élimination Et Choix Traduisant la Réalité
5. Ordered Weighted Averaging (OWA)
6. Operational Competitiveness Rating Analysis
7. Višekriterijumsko Kompromisno Rangiranje
8. Evaluation criteria
9. Exclusion criteria

ارزیابی و رتبه‌بندی مکان‌ها استفاده می‌شوند که هریک می‌تواند وزن و اولویت متفاوتی با بقیه داشته باشد. معیارهای حذف، برای شناسایی مناطقی استفاده می‌شوند که برای احداث مزارع انرژی‌های تجدیدپذیر مناسب نیستند. در گام بعد با جست‌وجو در منابع مختلف، داده‌های مرتبط با معیارها برای منطقه مورد مطالعه جمع‌آوری و پردازش شدند (بخش ۲.۳). سپس لایه‌های مرتبط با معیارهای ارزیابی، با استفاده از منطق فازی، استاندارد شدند (بخش ۲.۴) و هریک با کمک روش AHP وزن‌دهی شدند (بخش ۲.۵). در بخش ۲.۶ از روش WLC برای هم‌پوشانی لایه‌های فازی استفاده شد. در بخش ۲.۷ مناطقی که برای احداث مزارع بادی و فتوولتائیک نامناسب هستند از محدوده مورد نظر حذف شدند. با حذف این مناطق، نقشه‌های تناسب برای مزارع بادی و فتوولتائیک به دست آمد، که با تلفیق آن‌ها مکان‌های مناسب برای احداث مزارع بادی-فتوولتائیک شناسایی شدند. برای پردازش لایه‌های اطلاعاتی، انجام محاسبات و استخراج نتایج، از نرم‌افزار ArcGIS نسخه ۱۰.۸ استفاده شد.

مرحله اول	انتخاب منطقه مورد مطالعه
مرحله دوم	انتخاب معیارهای موردنیاز برای مکان‌یابی مزارع فتوولتائیک و بادی
مرحله سوم	جمع‌آوری داده‌های مرتبط با معیارها و تشکیل لایه‌های اطلاعاتی در ArcGIS
مرحله چهارم	استانداردسازی لایه‌های مرتبط با معیارهای ارزیابی با منطق فازی
مرحله پنجم	وزن‌دهی به معیارهای ارزیابی با استفاده از روش AHP
مرحله ششم	هم‌پوشانی لایه‌های فازی با روش WLC
مرحله هفتم	حذف مناطق نامناسب از محدوده استان با استفاده از منطق بولین

شکل ۲. مراحل انجام مطالعه حاضر

## ۲. مواد و روش‌ها

### ۲.۱. منطقه مورد مطالعه

استان خراسان جنوبی، با وسعتی حدود ۱۴۸۹۸۳ کیلومتر مربع، سومین استان پهناور ایران است. خراسان جنوبی در نواحی پست، آب‌وهوای خشک و بیابانی و در نواحی کوهستانی آب‌وهوای نیمه‌خشک دارد. بخش‌هایی از دشت لوت در این استان قرار دارد که بر آب‌وهوای آن تأثیر زیادی می‌گذارد. دشت لوت از خشک‌ترین و گرم‌ترین بیابان‌های جهان است و شدت تابش خورشید، کمبود رطوبت و بارش و همچنین تبخیر زیاد از ویژگی‌های آن است. میانگین بارش ۳۰ ساله در این استان ۱۲۹/۶ میلی‌متر و متوسط دما ۱۷/۶ درجه سلسیوس است [۲۶].

### ۲.۲. معیارها

#### ۲.۲.۱. معیارهای ارزیابی

برای شناسایی مکان‌های مناسب به منظور احداث نیروگاه‌های بادی و فتوولتائیک، عوامل مختلفی تأثیرگذار هستند. در این مطالعه معیارهای ارزیابی به چهار دسته اقلیمی<sup>۱</sup>، جغرافیایی<sup>۲</sup>، زیست‌محیطی<sup>۳</sup> و موقعیت مکانی<sup>۴</sup> تقسیم شدند که جدول ۱ آن‌ها را نشان می‌دهد.

#### ۲.۲.۱.۱. اقلیمی

تابش خورشیدی: میزان تابش خورشیدی دریافت‌شده توسط پنل‌های فتوولتائیک، تأثیر بسزایی در عملکرد فنی و اقتصادی نیروگاه‌های خورشیدی دارد. برای اندازه‌گیری تابش خورشیدی در کاربردهای فتوولتائیک، تابش افقی جهانی<sup>۵</sup>، به عنوان مقدار کل تابش موج کوتاه دریافت‌شده توسط یک سطح افقی واقع بر روی زمین تعریف می‌شود [۲۷].

1. Climatic
2. Geographical
3. Environmental
4. Location
5. Global Horizontal Irradiance (GHI)

سرعت باد: سرعت باد یک عامل مهم و تأثیرگذار در مکان‌یابی نیروگاه‌های بادی است. توربین‌های بادی انرژی جنبشی باد را در شفت به انرژی مکانیکی تبدیل می‌کنند و در نهایت این انرژی در ژنراتور، به انرژی الکتریکی تبدیل می‌شود [۲۸]. دمای هوا: دما بر کارایی پنل‌های PV اثرگذار است. توان خروجی پنل‌های PV، رابطه معکوس با دما دارد [۲۹]. رطوبت نسبی: پارامتر رطوبت نسبی، نشان‌دهنده میزان بخار آب موجود در هوا است. تابش خورشیدی تحت تأثیر ابرها و باران قرار می‌گیرد و میزان انرژی خورشیدی موج کوتاه دریافتی با وجود بخار آب در هوا کاهش می‌یابد [۵]. مدت زمان تابش آفتاب: انرژی خورشیدی ماهیت متناوب دارد و اگر خورشید نتابد، پنل PV برقی تولید نمی‌کند. بنابراین، مدت زمان تابش آفتاب یا ساعات‌های آفتابی، یک عامل مهم است که معمولاً با ابزار خاصی اندازه‌گیری می‌شود [۱۷].

جدول ۱. معیارهای ارزیابی انتخاب‌شده برای مکان‌یابی نیروگاه‌های بادی و فتوولتائیک

دسته	معیار	برای مزارع فتوولتائیک	برای مزارع بادی
اقلیمی	تابش خورشیدی	✓	
	سرعت باد		✓
	دمای هوا	✓	
	رطوبت نسبی	✓	
	مدت زمان تابش آفتاب <sup>۱</sup>	✓	
جغرافیایی	شیب	✓	✓
	جهت شیب <sup>۲</sup>	✓	
	ارتفاع	✓	✓
زیست‌محیطی	پوشش زمین <sup>۳</sup>	✓	✓
	فاصله از مناطق شهری	✓	✓
	فاصله از مناطق روستایی	✓	✓
	فاصله از خطوط انتقال برق	✓	✓
	فاصله از پست‌های برق	✓	✓
	فاصله از جاده‌ها	✓	✓
	موقعیت مکانی		

## ۲.۱.۲.۲. جغرافیایی

شیب: شیب زمین، هزینه‌های ساخت و تعمیر و نگهداری نیروگاه‌های بادی و PV را تحت تأثیر قرار می‌دهد [۱۹ و ۲۷]. جهت شیب: در نیمکره شمالی، بهترین جهت برای استقرار پنل‌های PV به سمت جنوب است [۱۳ و ۲۷]. همچنین مناطق مسطح نیز مطلوبیت بالایی دارند [۱۳]. ارتفاع: ارتفاع بالا، هزینه‌های ساخت نیروگاه‌های بادی و خورشیدی را افزایش می‌دهد [۵ و ۳۰]. همچنین با افزایش ارتفاع از سطح دریا، چگالی هوا کاهش می‌یابد، در نتیجه توربین‌های بادی توان خروجی کمتری خواهند داشت [۳۰].

## ۲.۱.۲.۲. زیست‌محیطی

تنها معیار موجود در این دسته پوشش زمین است. اولویت بر این است که نیروگاه‌های بادی و خورشیدی در زمین‌های بایر یا با پوشش گیاهی کم احداث شوند [۲۴ و ۳۱]. جنگل‌ها، تالاب‌ها، مرداب‌ها، پهنه‌های آبی جزء منابع زیست‌محیطی هستند و باید حفاظت شوند [۵].

## ۲.۱.۲.۲. موقعیت مکانی

فاصله از مناطق شهری و روستایی: احداث نیروگاه‌های بادی و خورشیدی در نزدیکی شهرها و روستاها، سبب کاهش هزینه‌های

1. Sunshine duration  
2. Aspect  
3. Land cover

انتقال برق به مصرف‌کننده‌ها می‌شود [۱۹ و ۲۷]. اما جنبه‌های اجتماعی و زیست‌محیطی را هم باید در نظر گرفت. توربین‌های بادی باعث انتشار نویز مکانیکی و نویز آیرودینامیکی می‌شوند [۲۴]. همچنین نیروگاه‌های بادی می‌توانند جلوه‌های بصری نامطلوب ایجاد کنند و بر مناظر شهری تأثیر بگذارند [۲۴]. نیروگاه‌های PV اگرچه فاقد آلودگی صوتی هستند، اما تأثیر بصری آن‌ها بسیار مورد توجه جوامع بشری قرار گرفته است [۲۷].

فاصله از خطوط انتقال و پست‌های برق: فاصله از خطوط انتقال و پست‌های برق، دو عامل تأثیرگذار در احداث نیروگاه‌های بادی و خورشیدی هستند. توسعه زیرساخت‌های جدید هزینه‌های سرمایه‌گذاری و عملیاتی را افزایش می‌دهد و همچنین محیط زیست را تخریب می‌کند [۵].

فاصله از جاده‌ها: فاصله از جاده‌ها یک عامل مهم در مکان‌یابی نیروگاه‌های بادی و خورشیدی است. نزدیکی به راه‌ها باعث کاهش هزینه‌های حمل‌ونقل تجهیزات نیروگاهی، حمل‌ونقل پرسنل و پشتیبانی نیروگاه می‌شود [۱۹ و ۱۷].

### ۲.۲.۲. معیارهای حذف

در این پژوهش پس از شناسایی معیارهای حذف، یک حد مناسب، برای حذف مناطق نامناسب در نظر گرفته شد. مقادیر به‌کارگرفته‌شده، از پژوهش‌های قبلی و قوانین ملی ایران استخراج شدند. جدول ۲ معیارهای حذف و مقادیر در نظر گرفته‌شده برای آن‌ها را نشان می‌دهد.

جدول ۲. معیارهای حذف برای مکان‌یابی مزارع فتوولتائیک و بادی

دسته	معیار	مناطق نامناسب		مرجع	
		برای مزارع فتوولتائیک	برای مزارع بادی		
اقلیمی	تابش خورشیدی	کمتر از ۱۷۰۰ (kWh/m <sup>2</sup> /year)	-	[۳۳]	
	سرعت باد	-	کمتر از ۵ m/s	[۲۰]	
جغرافیایی	شیب	بیشتر از ۱۰ درصد	بیشتر از ۱۵ درصد	[۳۴،۳۵]	
	ارتفاع	بیشتر از ۲۰۰۰ متر	بیشتر از ۲۰۰۰ متر	[۱۹،۳۵]	
زیست‌محیطی	پهنه‌های آبی (کمتر از ۵۰۰ متر)	پهنه‌های آبی (کمتر از ۱۰۰۰ متر)	[۱۴]	[۱۹،۳۵]	
		جنگل‌ها (کمتر از ۱۰۰۰ متر)	[۱۲،۳۴]	[۳۴]	
	پوشش زمین	تالاب‌ها	[۱۷]	[۳۷]	
		مرداب‌ها	[۳۸]	[۳۸]	
	رودخانه‌ها	کمتر از ۵۰۰ متر	کمتر از ۵۰۰ متر	[۵،۱۲،۱۴]	[۱۹،۳۵]
		مناطق حفاظت‌شده	کمتر از ۲۰۰۰ متر	کمتر از ۲۰۰۰ متر	[۵]
ایمنی/ اجتماعی	مناطق شهری	کمتر از ۱۰۰۰ متر	کمتر از ۲۵۰۰ متر	[۱۹]	
	مناطق روستایی	کمتر از ۵۰۰ متر	کمتر از ۵۰۰ متر	[۱۹،۳۵]	
	جاده‌ها	کمتر از ۵۰۰ متر	کمتر از ۵۰۰ متر	[۱۹،۳۷]	
	خطوط ریلی	کمتر از ۵۰۰ متر	کمتر از ۵۰۰ متر	[۳۹]	
	خطوط انتقال برق	کمتر از ۲۵۰ متر	کمتر از ۲۵۰ متر	[۱۹،۳۵]	
	پست‌های برق	کمتر از ۲۵۰ متر	کمتر از ۲۵۰ متر	[۱۹]	
	خطوط گسل	کمتر از ۵۰۰ متر	کمتر از ۵۰۰ متر	[۱۹،۳۵]	
	جاذبه‌های گردشگری	کمتر از ۷۰۰ متر	کمتر از ۷۰۰ متر	[۱۹،۳۵]	
	فرودگاه‌ها	کمتر از ۳۰۰۰ متر	کمتر از ۵۰۰۰ متر	[۳۷]	
	مناطق صنعتی	کمتر از ۵۰۰ متر	کمتر از ۳۰۰ متر	[۳۰]	
	مناطق نظامی	کمتر از ۱۵۰۰۰ متر	کمتر از ۱۵۰۰۰ متر	[۳۵]	



### ۳.۲. تشکیل لایه‌های اطلاعاتی

جدول ۳ لایه‌های اطلاعاتی و منابع آن‌ها را نشان می‌دهد. میانگین بلندمدت سالانه GHI از پایگاه داده Solargis به دست آمد. داده سرعت باد برای ارتفاع ۵۰ متر، از Global Wind Atlas استخراج شد. سپس با استفاده از قانون قدرت پروفیل باد<sup>۱</sup> که به عنوان قانون قدرت هلمن<sup>۲</sup> نیز شناخته می‌شود [۲۰]، لایه سرعت باد در ارتفاع ۸۰ متر (ارتفاع هاب<sup>۳</sup> توربین‌های جدید نصب‌شده در ایران) ساخته شد. معادله ۱ قانون قدرت پروفیل باد را نشان می‌دهد. در این معادله  $V$  سرعت باد در ارتفاع  $Z$ ،  $V_r$  سرعت باد در ارتفاع مرجع  $Z_r$  است.  $\alpha$  نیز توان هلمن<sup>۴</sup> است که در این پژوهش برابر با  $0.143$  فرض شد [۳۲].

$$\frac{V}{V_r} = \left( \frac{Z}{Z_r} \right)^\alpha \quad (1)$$

جدول ۳. لایه‌های اطلاعاتی مورد استفاده در پژوهش همراه منابع آن‌ها

منبع	مقیاس (رزولوشن)	فرمت داده خام	لایه
SOLARGIS ( <a href="https://solargis.com">https://solargis.com</a> )	(۲۵۰ متر)	GeoTIFF	تابش خورشیدی
GLOBAL WIND ATLAS ( <a href="https://globalwindatlas.info">https://globalwindatlas.info</a> )	(۲۵۰ متر)	GeoTIFF	سرعت باد
سالنامه آماری استان خراسان جنوبی ( <a href="https://nnt.sci.org.ir">https://nnt.sci.org.ir</a> )	-	-	دمای هوا
سالنامه آماری استان خراسان جنوبی ( <a href="https://nnt.sci.org.ir">https://nnt.sci.org.ir</a> )	-	-	مدت زمان تابش
سالنامه آماری استان خراسان جنوبی ( <a href="https://nnt.sci.org.ir">https://nnt.sci.org.ir</a> )	-	-	رطوبت نسبی
سازمان زمین‌شناسی ایالات متحده ( <a href="https://earthexplorer.usgs.gov">https://earthexplorer.usgs.gov</a> )	(۳۰ متر)	GeoTIFF	ارتفاع
سازمان زمین‌شناسی ایالات متحده ( <a href="https://earthexplorer.usgs.gov">https://earthexplorer.usgs.gov</a> )	(۳۰ متر)	GeoTIFF	شیب
سازمان زمین‌شناسی ایالات متحده ( <a href="https://earthexplorer.usgs.gov">https://earthexplorer.usgs.gov</a> )	(۳۰ متر)	GeoTIFF	جهت شیب
Google Earth Engine ( <a href="https://earthengine.google.com">https://earthengine.google.com</a> )	(۱۰ متر)	GeoTIFF	پوشش زمین
شرکت آب منطقه‌ای خراسان جنوبی ( <a href="https://skhrw.ir">https://skhrw.ir</a> )	۱ : ۳۰۰۰۰۰۰	JPG	رودخانه‌ها
سازمان حفاظت از محیط زیست ( <a href="https://natural.doe.ir">https://natural.doe.ir</a> )	-	KMZ	مناطق حفاظت‌شده
پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله ( <a href="http://www.iiees.ac.ir">www.iiees.ac.ir</a> )	۱ : ۲۵۰۰۰۰۰	PDF	خطوط گسل
Google Maps ( <a href="https://maps.google.com">https://maps.google.com</a> )	-	-	مناطق شهری
سامانه خدمات اطلاع‌رسانی آماری ( <a href="https://ssis.sci.org.ir">https://ssis.sci.org.ir</a> )	-	Shapefile	مناطق روستایی
OpenStreetMap ( <a href="https://export.hotosm.org">https://export.hotosm.org</a> )	-	Shapefile	جاده‌ها
OpenStreetMap ( <a href="https://export.hotosm.org">https://export.hotosm.org</a> )	-	Shapefile	خطوط ریلی
OpenStreetMap ( <a href="https://export.hotosm.org">https://export.hotosm.org</a> )	-	Shapefile	فرودگاه‌ها
OpenStreetMap ( <a href="https://export.hotosm.org">https://export.hotosm.org</a> )	-	Shapefile	مناطق صنعتی
OpenStreetMap ( <a href="https://export.hotosm.org">https://export.hotosm.org</a> )	-	Shapefile	مناطق نظامی
OpenStreetMap ( <a href="https://export.hotosm.org">https://export.hotosm.org</a> )	-	Shapefile	خطوط انتقال برق
OpenStreetMap ( <a href="https://export.hotosm.org">https://export.hotosm.org</a> )	-	Shapefile	پست‌های برق
سازمان نقشه‌برداری کشور ( <a href="https://ncc.gov.ir">https://ncc.gov.ir</a> )	۱ : ۱۲۰۰۰۰۰	JPG	جاذبه‌های گردشگری
سازمان نقشه‌برداری کشور ( <a href="https://ncc.gov.ir">https://ncc.gov.ir</a> )	۱ : ۱۵۰۰۰۰۰	JPG	محدوده استان

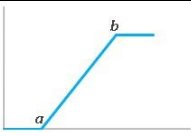
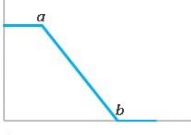
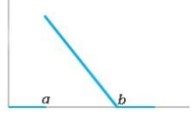
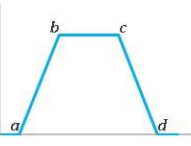
### ۴.۲. استانداردسازی فازی

از آنجا که لایه‌های مربوط به معیارها، دارای دامنه و واحد اندازه‌گیری متفاوتی هستند، برای تلفیق آن‌ها نیاز است تمام مقادیر لایه‌ها به یک مقیاس و واحد مشترک تبدیل شوند [۵]. در این مطالعه از منطق فازی برای استانداردسازی لایه‌ها استفاده شده است. منطق فازی اولین بار توسط پروفیسور لطفی‌زاده، در سال ۱۹۶۵ میلادی معرفی شد [۴۰]. در منطق فازی تابع عضویت به هر عنصر یک عدد حقیقی بین صفر و یک نسبت می‌دهد. درجه عضویت صفر نشان می‌دهد عنصر مورد نظر کاملاً خارج از مجموعه است. در حالی که عدد یک نشان می‌دهد عنصر مورد نظر کاملاً به مجموعه تعلق دارد.

1. Wind profile power law
2. Hellmann's power law
3. Hub height
4. Hellmann Exponent

در این مطالعه توابع عضویت خطی و دوزنقه‌ای به کار گرفته شدند که تابع خطی می‌تواند صعودی یا نزولی باشد. جدول ۴ معادله ریاضی و نمودار این توابع را نشان می‌دهد. در هر نقشه هر پیکسل با استفاده از یک تابع عضویت مناسب، مقداری بین صفر تا یک می‌گیرد. در حقیقت مقدار هر پیکسل نشان‌دهنده درجه عضویت در مجموعه فازی معیار است. توابع عضویت مورد استفاده برای هر معیار ارزیابی، در جدول ۵ آورده شده است. همچنین لایه پوشش زمین و جهت شیب، با استفاده از مقادیری بین ۰ تا ۱ استاندارد شدند که جدول‌های ۶ و ۷ آن‌ها را نشان می‌دهد.

جدول ۴. توابع عضویت فازی مورد استفاده در پژوهش

نمودار	معادله ریاضی	نوع تابع
	$\mu(x) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a < x < b \\ 1, & x \geq b \end{cases}$	صعودی خطی
	$\mu(x) = \begin{cases} 1, & x \leq a \\ \frac{x-b}{a-b}, & a < x < b \\ 0, & x \geq b \end{cases}$	نزولی خطی (۱)
	$\mu(x) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x-b}{a-b}, & a < x < b \\ 0, & x \geq b \end{cases}$	نزولی خطی (۲)
	$\mu(x) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a < x < b \\ 1, & b \leq x \leq c \\ \frac{x-d}{c-d}, & c < x < d \\ 1, & x \geq d \end{cases}$	دوزنقه‌ای

جدول ۵. توابع عضویت مورد استفاده برای معیارهای ارزیابی به همراه مقادیر پارامترهای آن‌ها

مرجع	پارامترهای تابع				واحد	تابع عضویت فازی	معیار
	a	b	c	d			
[۵،۲۷]	۱۷۰۰	۲۱۹۰	-	-	kWh/m <sup>2</sup> /year	صعودی خطی	GHI
[۴۱]	۵	۹/۵	-	-	m/s	صعودی خطی	سرعت باد
[۵]	min	max	-	-	°C	نزولی خطی (۲)	دمای هوا
[۵]	min	max	-	-	%	نزولی خطی (۲)	رطوبت نسبی
[۵]	min	max	-	-	h/year	صعودی خطی	مدت زمان تابش آفتاب
[۵،۱۶،۲۷]	۲	۱۰	-	-	%	نزولی خطی (۱)	شیب*
[۳۰]	۳	۱۵	-	-	%	نزولی خطی (۱)	شیب**
[۵،۳۶]	۱	۲	-	-	km	نزولی خطی (۱)	ارتفاع*
[۳۰]	۱	۲	-	-	km	نزولی خطی (۱)	ارتفاع**
[۵،۲۷،۳۶]	۱	۵	۱۰	۲۰	km	دوزنقه‌ای	فاصله از مناطق شهری*
[۴۲]	۲/۵	۶	۱۲	۲۵	km	دوزنقه‌ای	فاصله از مناطق شهری**
[۵،۲۷،۳۶]	۰/۵	۱	۳	۵	km	دوزنقه‌ای	فاصله از مناطق روستایی*
[۴۲]	۰/۵	۱	۳	۵	km	دوزنقه‌ای	فاصله از مناطق روستایی**
[۵]	۰/۲۵	۷	-	-	km	نزولی خطی (۲)	فاصله از خطوط انتقال برق*
[۳۰]	۰/۲۵	۱۰	-	-	km	نزولی خطی (۲)	فاصله از خطوط انتقال برق**
[۵]	۰/۲۵	۷	-	-	km	نزولی خطی (۲)	فاصله از پست‌های برق*
[۳۰]	۰/۲۵	۱۰	-	-	km	نزولی خطی (۲)	فاصله از پست‌های برق**
[۱۶،۱۷]	۰/۵	۶	-	-	km	نزولی خطی (۲)	فاصله از جاده‌ها*
[۳۰،۴۱]	۰/۵	۵	-	-	km	نزولی خطی (۲)	فاصله از جاده‌ها**

\* برای مزارع فتوولتائیک، \*\* برای مزارع بادی

جدول ۶. ارزش‌گذاری لایه جهت شیب [۱۳].

جهت	جنوب	جنوب غربی	جنوب شرقی	شرق	غرب	شمال شرقی	شمال غربی	شمال	مسطح
مقدار ارزش‌گذاری شده	۱	۰/۷	۰/۷	۰/۵	۰/۵	۰/۳	۰/۳	۰	۱

جدول ۷. ارزش‌گذاری لایه پوشش زمین [۳۴، ۲۹، ۱۵].

پوشش	شهری	پهنه آبی	تالاب	کلوت	مرداب	زمین شور	رس	جنگل	رخنمون	دشت بدون پوشش	شن و ماسه	زمین کشاورزی	مرتع
مقدار ارزش‌گذاری شده*	۰	۰	۰	۰/۱	۰	۰/۳	۰/۶	۰	۰/۲	۱	۰	۰/۴	۰/۸
مقدار ارزش‌گذاری شده**	۰	۰	۰	۰/۱	۰	۰/۳	۰/۶	۰	۰/۲	۱	۰/۸	۰/۴	۰/۸

\* برای مزارع فتوولتائیک، \*\* برای مزارع بادی

## ۵.۲. وزن‌دهی به معیارهای ارزیابی

در این مطالعه، برای وزن‌دهی به معیارها از روش AHP استفاده شده است. AHP از معروف‌ترین و پرکاربردترین روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره است که برای اولین بار در سال ۱۹۸۰ توسط ساعتی معرفی شد [۴۳]. اساس روش AHP بر سطح‌بندی مسئله مورد نظر و مقایسه‌های زوجی گزینه‌ها و معیارهای تصمیم‌گیری است که این نیازمند جمع‌آوری اطلاعات از متخصصان و کارشناسان مربوطه است. مقایسه زوجی این امکان را به تصمیم‌گیرنده می‌دهد که فارغ از هر گونه مزاحمت عوامل خارجی، تنها روی مقایسه دو معیار یا گزینه تمرکز کند، بنابراین فرایند تصمیم‌گیری منطقی‌تر خواهد شد.

اهمیت نسبی مقایسات زوجی با توجه به یک مقیاس عددی از ۱ تا ۹ تعیین می‌شود. مقادیر ۱، ۳، ۵، ۷ و ۹ به ترتیب نشان‌دهنده اهمیت برابر، متوسط، قوی، بسیار قوی و فوق‌العاده هستند. مقادیر ۲، ۴، ۶ و ۸ نیز مقادیر میانی هستند و بین فواصل فوق‌الحد قرار دارند. ماتریس مقایسات زوجی ابتدا باید برای معیارها تشکیل شود. برای نرمال‌سازی این ماتریس، هر عنصر بر مجموع عناصر ستون خود تقسیم می‌شود. میانگین عناصر هر ردیف این ماتریس بی‌مقیاس، وزن معیارها را نشان می‌دهد. پس از مشخص شدن وزن معیارها، ماتریس مقایسات زوجی گزینه‌ها نسبت به هر معیار باید ایجاد شود. مانند قبل، ماتریس‌ها باید بی‌مقیاس شوند و وزن هر گزینه در هر ماتریس به دست آید. برای محاسبه وزن نهایی گزینه‌ها، ماتریس وزن نسبی گزینه‌ها در ماتریس وزن معیارها ضرب می‌شود. در این پژوهش، از آنجا که گزینه‌های تصمیم‌گیری، میلیون‌ها پیکسل در سطح منطقه مورد مطالعه موجود هستند، امکان مقایسه زوجی گزینه‌ها وجود ندارد. بنابراین هدف ساختار سلسله‌مراتبی مطالعه حاضر، اولویت‌بندی معیارهای مورد نیاز برای مکان‌یابی نیروگاه‌های بادی و PV است.

یکی از مزیت‌های مهم AHP، امکان بررسی سازگاری قضاوت‌های انجام‌شده توسط مقایسات زوجی است. برای ارزیابی میزان ناسازگاری قضاوت کارشناسان، نسبت سازگاری<sup>۱</sup> به این صورت تعریف می‌شود:

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (۲)$$

در معادله یادشده CI، شاخص سازگاری<sup>۲</sup> است و از معادله<sup>۳</sup> به دست می‌آید:

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (۳)$$

که در آن  $\lambda_{max}$  حداکثر مقدار ویژه ماتریس مقایسه و  $n$  تعداد سطر و ستون ماتریس است. RI نیز شاخص تصادفی<sup>۳</sup> است که نشان‌دهنده میانگین انحراف از ماتریس‌های تولیدشده به طور تصادفی، با اندازه‌های مختلف است [۴۴]. اگر CR کوچک‌تر یا مساوی ۱۰ درصد باشد، سطح سازگاری قابل قبول است، در غیر این صورت مقایسات زوجی باید تکرار شوند [۱۴].

در این پژوهش، مقادیر مقایسات زوجی بر اساس مطالعات قبلی صورت‌گرفته در ایران (۵، ۱۳، ۱۷، ۱۹، ۳۵، ۴۴ و ۴۵)، وارد

1. Consistency ratio (CR)  
2. Consistency index (CI)  
3. Random Index.

ماتریس شدند. در هر مطالعه، اهمیت نسبی هر معیار نسبت به دیگری، با محاسبه نسبت وزن‌های هر جفت معیار تعیین شد. از میانگین هندسی برای تلفیق ضرایب اهمیت استفاده شد [۴۵] و مقادیر حاصل، به شکل مقیاس ساعتی درآمدند. در نهایت، ماتریس ساخته‌شده وارد نرم‌افزار Super Decisions شد و وزن هر معیار به دست آمد. مقدار CR برای ماتریس مقایسه نیروگاه‌های بادی و فتوولتائیک، به ترتیب برابر با ۶/۴ و ۳/۶ درصد به دست آمد، که نشان می‌دهد وزن‌های تعیین شده سازگاری بالایی دارند. جدول ۸ وزن‌های به دست آمده از روش AHP را نشان می‌دهد.

جدول ۸. وزن‌های به دست آمده از روش AHP برای معیارهای ارزیابی

وزن (%)		معیار
برای مزارع بادی	برای مزارع فتوولتائیک	
-	۲۵/۵	تابش خورشیدی
۳۱/۹	-	سرعت باد
-	۱۰/۱	دمای هوا
-	۳/۸	رطوبت نسبی
-	۱۵/۴	ساعت‌های آفتابی
۴/۲	۴/۷	شیب
-	۴/۸	جهت شیب
۶/۷	۲/۷	ارتفاع
۷/۶	۹/۲	پوشش زمین
۱۲/۷	۲/۳	فاصله از مناطق شهری
۶/۱	۲/۱	فاصله از مناطق روستایی
۱۲/۵	۵/۲	فاصله از خطوط انتقال برق
۹/۷	۱۱/۷	فاصله از پست‌های برق
۸/۶	۲/۵	فاصله از جاده‌ها

## ۲.۶. هم‌پوشانی لایه‌های فازی شده

ترکیب خطی وزنی (WLC) یک روش رایج برای هم‌پوشانی لایه‌های رستری است [۵]. در این روش، مقدار هر سلول در لایه استاندارد شده، در وزن اختصاص داده شده به آن لایه ضرب می‌شود. این عمل برای همه لایه‌ها انجام می‌شود و در نهایت جمع خطی آن‌ها مقدار هر پیکسل را مشخص می‌کند. برای پیاده‌سازی روش WLC و ترکیب لایه‌های فازی از معادله ۴ استفاده شد [۵ و ۱۷]. در این معادله S نشان‌دهنده درجه مناسب بودن هر پیکسل است.  $X_i$  مقدار پیکسل در لایه فازی  $i$ ،  $W_i$  وزن اختصاص داده شده به لایه  $i$  و  $n$  تعداد معیارها است.

$$S = \sum_{i=1}^n X_i W_i \quad (4)$$

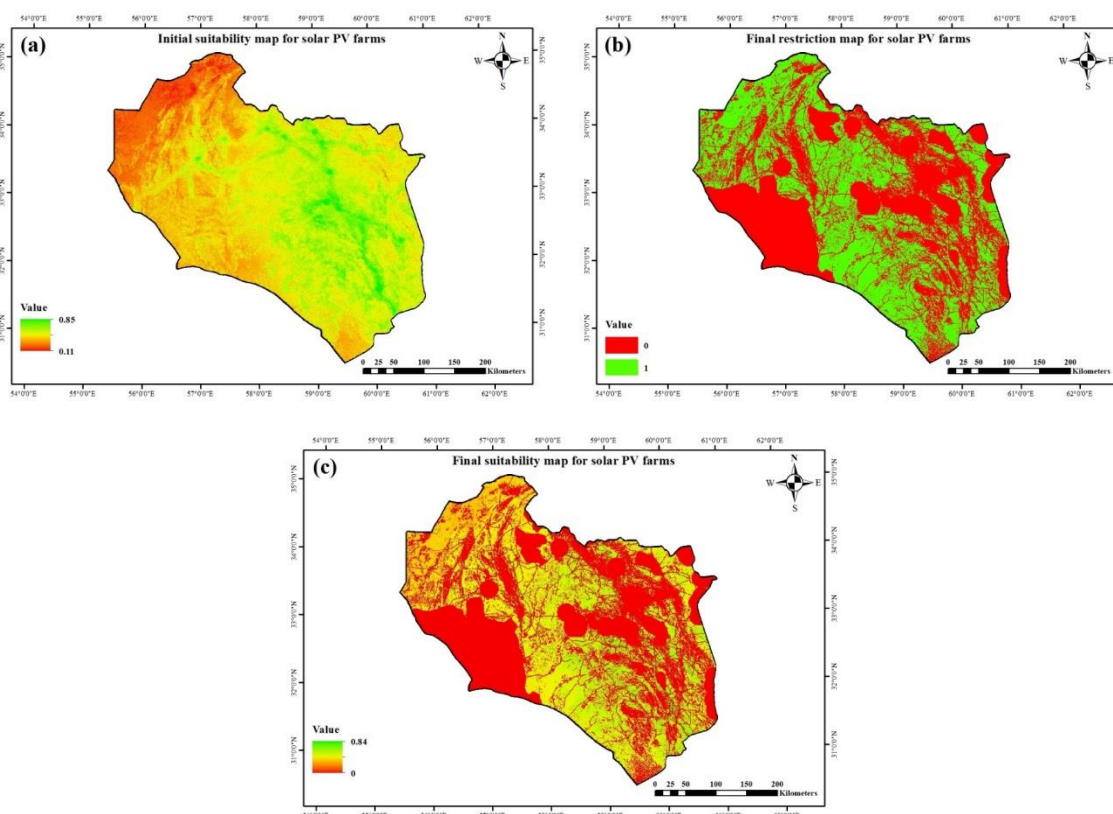
## ۲.۷. حذف مناطق نامناسب

پس از هم‌پوشانی لایه‌های فازی، مناطقی که محدودیت دارند، باید از نقشه تناسب اولیه حذف شوند. برای هر معیار حذف، با استفاده از منطق منطقی بولین، یک نقشه محدودیت تهیه شد. در هر نقشه، مقادیر ۱ نشان‌دهنده مناطق مجاز، و مقادیر صفر مناطق دارای محدودیت را نشان می‌دهند. لایه محدودیت نهایی با استفاده از عملگر AND به دست می‌آید. به این صورت که همه لایه‌های محدودیت در هم ضرب می‌شوند. اگر یک سلول، حداقل در یک لایه مقدار صفر داشته باشد در لایه محدودیت نهایی نیز صفر خواهد بود. مقدار یک سلول تنها در صورتی برابر با ۱ است که آن سلول در تمامی لایه‌ها، مقدار ۱ داشته باشد.

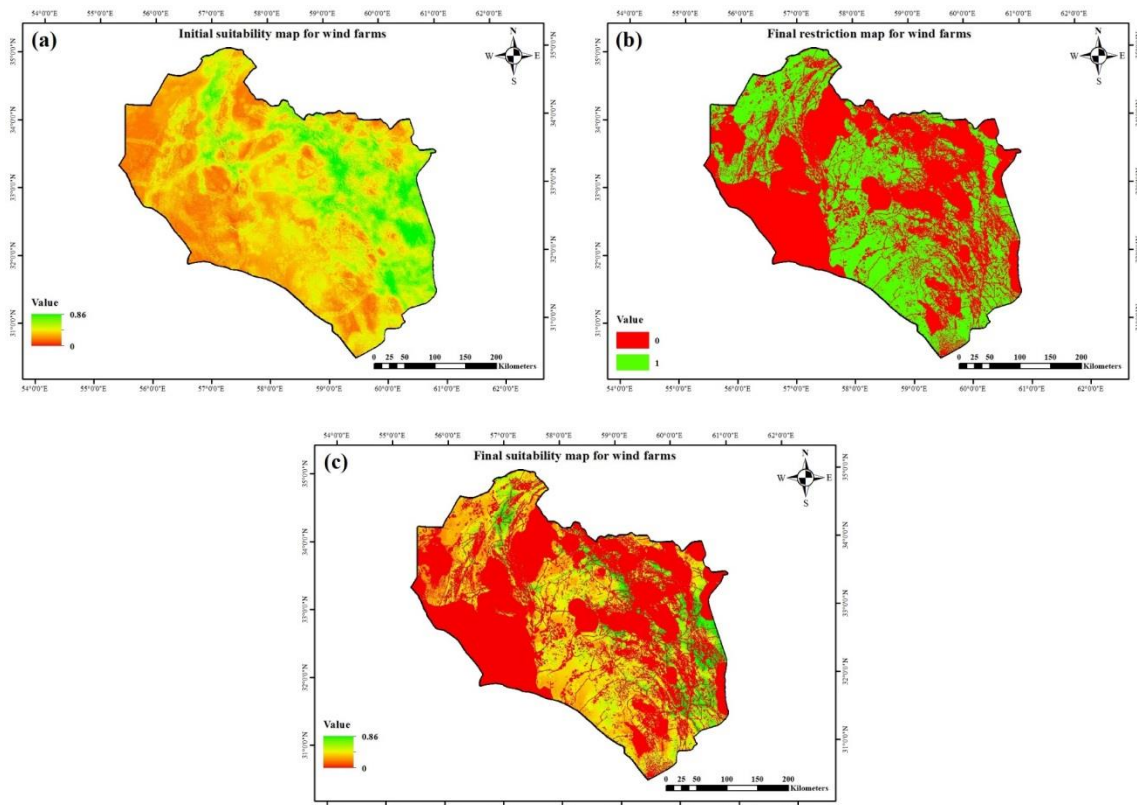
## ۳. نتایج و بحث

با تلفیق لایه‌های استاندارد شده فازی، نقشه تناسب اولیه، برای مزارع فتوولتائیک و بادی به دست آمد. برای استخراج نقشه تناسب

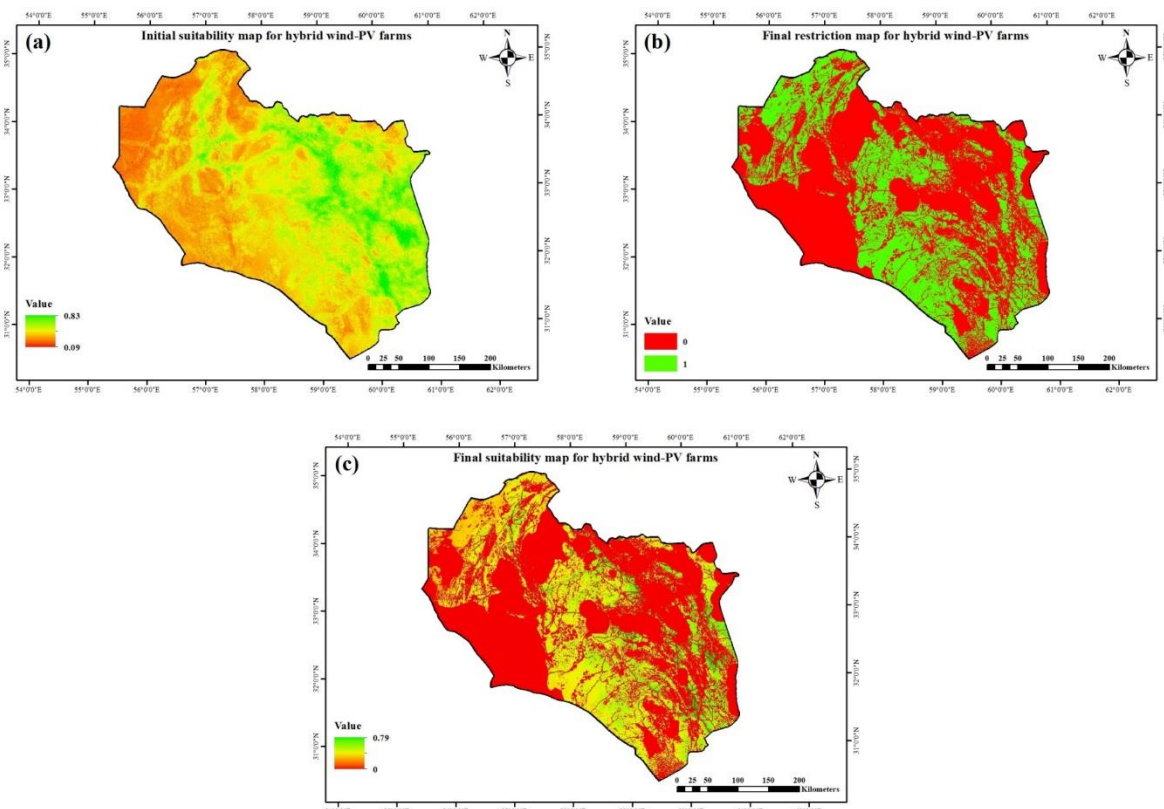
اولیه برای مزارع هیبریدی بادی-فتوولتائیک، به هر یک از لایه‌های تناسب، مقدار ۵۰ درصد وزن داده شد و با روش WLC تلفیق شدند. شکل‌های ۳a، ۴a و ۵a ترتیب، نقشه‌های تناسب اولیه را برای مزارع فتوولتائیک، بادی و هیبریدی بادی-فتوولتائیک نشان می‌دهد. در این نقشه‌ها هرچه عدد یک پیکسل بالاتر باشد، دارای مطلوبیت بالاتری برای احداث نیروگاه است. با ترکیب لایه‌های محدودیت، نقشه‌های محدودیت نهایی برای مزارع فتوولتائیک و بادی ایجاد شد. سپس با عملگر AND هر دو نقشه ترکیب شدند و نقشه محدودیت نهایی برای مزارع هیبریدی بادی-فتوولتائیک به دست آمد. شکل‌های ۳b، ۴b و ۵b نشان‌دهنده نقشه‌های محدودیت هستند. هدف از ایجاد این نقشه‌ها حذف مناطق دارای محدودیت، برای احداث نیروگاه است. در هر نقشه عدد صفر نشان می‌دهد احداث نیروگاه در آن منطقه ناممکن است. پیکسل‌های دارای ارزش یک نیز مناطق مجاز برای احداث نیروگاه را نشان می‌دهند. با ضرب کردن مقادیر لایه‌های محدودیت نهایی و تناسب اولیه در یکدیگر، مناطق نامناسب از محدوده نقشه تناسب اولیه حذف شدند و نقشه‌های تناسب نهایی ایجاد شدند (شکل‌های ۳c، ۴c و ۵c). در این مطالعه، نقشه‌های تناسب نهایی، با توجه به مقادیر درجه تناسب، به پنج کلاس تقسیم شدند. این پنج کلاس عبارتند از: نامناسب (۰)، کم (۰/۳-۰/۵)، در حد متوسط (۰/۳-۰/۵)، زیاد (۰/۵-۰/۷) و خیلی زیاد (۰/۷-۱). شکل‌های ۶-۸ نقشه‌های طبقه‌بندی شده برای احداث مزارع فتوولتائیک، بادی و هیبریدی بادی-فتوولتائیک را نشان می‌دهند. جدول ۹ مساحت هر یک از کلاس‌های تناسب زمین را نشان می‌دهد. حدود ۶۲ درصد از مساحت استان خراسان جنوبی برای احداث مزارع هیبریدی بادی-فتوولتائیک مناسب نیستند. در نقشه طبقه‌بندی شده برای توسعه مزارع هیبریدی بادی-فتوولتائیک، ۲/۷۳ درصد از مناطق استان در دسته زیاد و ۰/۰۲ درصد (۳۶/۵۴ کیلومتر مربع) در دسته خیلی زیاد قرار دارند. با بررسی و تحلیل لایه‌های رستری مشخص شد، مناطق با درجه تناسب یکسان، به طور یکنواخت توزیع نمی‌شوند. در این پژوهش مناطقی که بیشترین یکنواختی را از درجه تناسب خیلی زیاد داشتند شناسایی شدند. در نهایت، با توجه به مساحت زمین، شش سایت برای احداث مزارع هیبریدی بادی-فتوولتائیک انتخاب شدند (شکل ۹). جدول ۱۰ موقعیت جغرافیایی و مساحت این سایت‌ها را نشان می‌دهد. طبق تصاویر ماهواره‌ای، هیچ‌یک از سایت‌ها در مناطق دارای محدودیت واقع نیستند. همچنین از لحاظ دسترسی خطوط حمل و نقل، تأسیسات برق و مناطق مسکونی در موقعیت مناسبی قرار دارند.



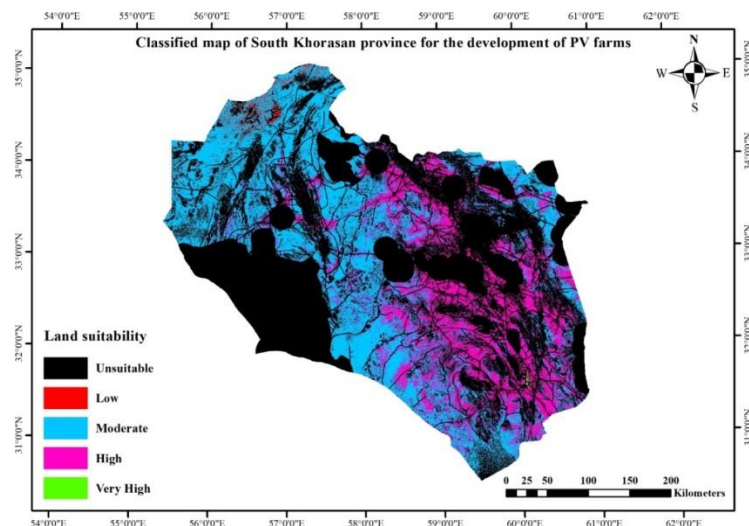
شکل ۳. نقشه‌های به‌دست‌آمده برای مزارع فتوولتائیک، (a) نقشه تناسب اولیه، (b) نقشه محدودیت نهایی، (c) نقشه تناسب نهایی



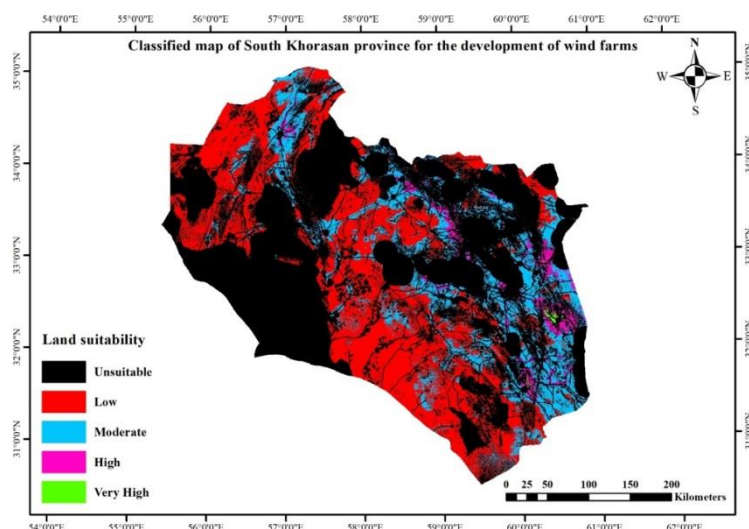
شکل ۴. نقشه‌های به‌دست‌آمده برای مزارع بادی، (a) نقشه تناسب اولیه، (b) نقشه محدودیت نهایی، (c) نقشه تناسب نهایی



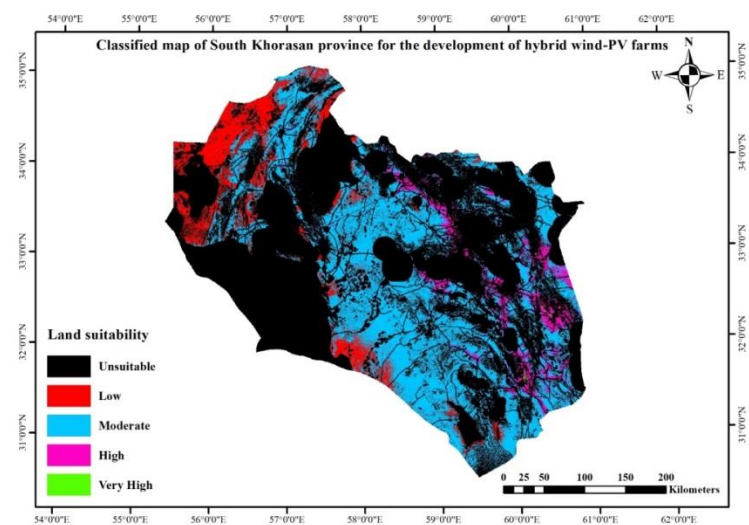
شکل ۵. نقشه‌های به‌دست‌آمده برای مزارع هیبریدی بادی - فتوولتائیک، (a) نقشه تناسب اولیه، (b) نقشه محدودیت نهایی، (c) نقشه تناسب نهایی



شکل ۶. نقشه طبقه‌بندی‌شده استان خراسان جنوبی برای احداث مزارع فتوولتائیک



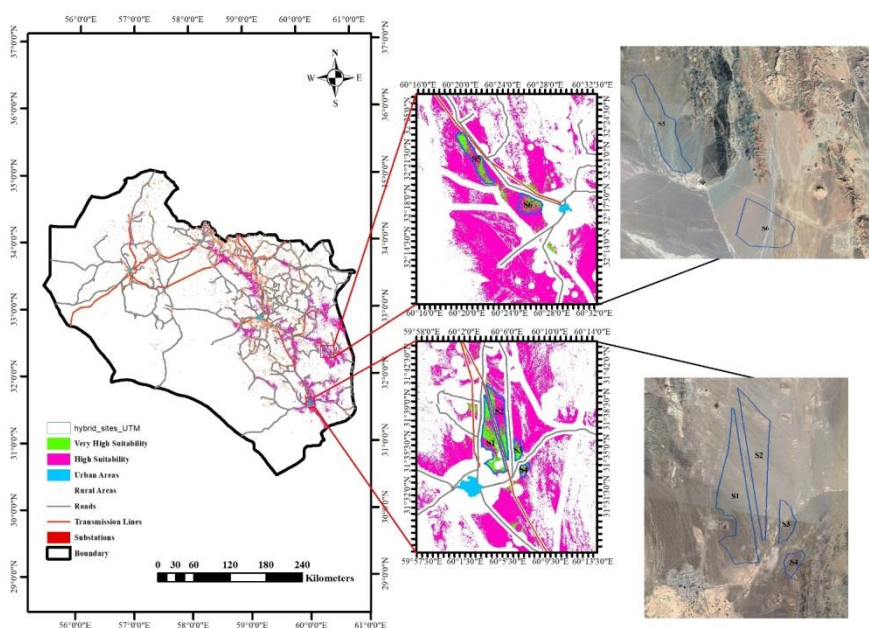
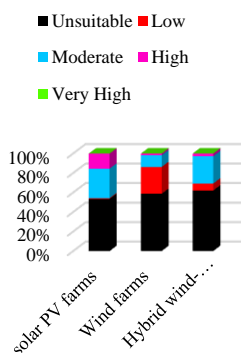
شکل ۷. نقشه طبقه‌بندی‌شده استان خراسان جنوبی برای احداث مزارع بادی



شکل ۸. نقشه طبقه‌بندی‌شده استان خراسان جنوبی برای احداث مزارع هیبریدی بادی - فتوولتائیک

جدول ۹. مساحت هر یک از کلاس‌های تناسب زمین برای مزارع فتوولتائیک، بادی و هیبریدی بادی- فتوولتائیک

تناسب زمین <sup>۱</sup>	مزارع فتوولتائیک		مزارع بادی		مزارع بادی- فتوولتائیک	
	مساحت		مساحت		مساحت	
	%	km <sup>2</sup>	%	km <sup>2</sup>	%	km <sup>2</sup>
نامناسب	۵۳/۵۴	۷۹۶۷۹/۶۹	۵۸/۷۲	۸۷۳۸۸/۶۵	۶۲/۱۳	۹۲۴۶۸/۳۵
کم	۰/۷۲	۱۰۷۴/۶۸	۲۷/۵۴	۴۰۹۹۰/۵۷	۷/۱۳	۱۰۶۰۷/۱۱
در حد متوسط	۳۰/۲۷	۴۵۰۵۲/۶۳	۱۱/۹۵	۱۷۷۸۸/۹۷	۲۷/۹۹	۴۱۶۶۳/۱۵
زیاد	۱۵/۴۴	۲۲۹۸۱/۵۸	۱/۷۱	۲۵۴۲/۸۹	۲/۷۳	۴۰۶۰/۱۰
خیلی زیاد	۰/۰۳	۴۵/۶۸	۰/۰۸	۱۲۴/۱۷	۰/۰۲	۳۶/۵۴



شکل ۹. موقعیت مکانی سایت‌های منتخب برای احداث مزارع هیبریدی بادی- فتوولتائیک

جدول ۱۰. موقعیت جغرافیایی و مساحت سایت‌های منتخب برای توسعه مزارع هیبریدی بادی- فتوولتائیک

سایت	عرض جغرافیایی	طول جغرافیایی	مساحت (کیلومتر مربع)
S1	۳۱° ۳۷' ۴۳" N	۶۰° ۳' ۵۷" E	۱۷/۵۵
S2	۳۱° ۳۶' ۱۱" N	۶۰° ۵' ۲۶" E	۱۲/۵۴
S3	۳۱° ۳۵' ۲۱" N	۶۰° ۶' ۳۹" E	۲/۸۳
S4	۳۱° ۳۳' ۴۳" N	۶۰° ۷' ۵" E	۱/۸۹
S5	۳۲° ۲۱' ۸" N	۶۰° ۲۱' ۱۶" E	۱۱/۳۸
S6	۳۲° ۱۷' ۳۱" N	۶۰° ۲۶' ۱۰" E	۷/۶۶

#### ۴. بحث و نتیجه‌گیری

این مطالعه با هدف یافتن مکان‌های مناسب برای توسعه مزارع هیبریدی بادی- فتوولتائیک انجام گرفت. ابتدا با مرور مطالعات انجام‌شده در حوزه مکان‌یابی نیروگاه‌های بادی و خورشیدی، معیارهای مورد نیاز شناسایی شدند. در مرحله بعد یک پایگاه داده در نرم‌افزار ArcGIS ایجاد شد. سپس لایه‌های ارزیابی، با استفاده از منطق فازی استاندارد شدند و سپس با کمک روش AHP هر یک وزن متفاوتی گرفتند. برای مزارع بادی، معیار سرعت باد با ۳۱/۹ درصد بالاترین وزن را به خود اختصاص داد. برای مزارع



فتوولتائیک نیز تابش خورشیدی با ۲۵/۵ درصد مهم‌ترین عامل شناخته شد. در گام بعد، لایه‌های فازی با روش WLC با یکدیگر تلفیق شدند و نقشه‌های تناسب اولیه برای مزارع بادی و فتوولتائیک به دست آمد. با هم‌پوشانی این نقشه‌ها، نقشه تناسب اولیه برای مزارع هیبریدی بادی- فتوولتائیک استخراج شد. با حذف مناطق دارای محدودیت، نقشه‌های تناسب نهایی برای مزارع بادی، فتوولتائیک و هیبریدی بادی- فتوولتائیک به دست آمد. برای ارزیابی بهتر، نقشه‌های حاصل با توجه به مقادیر درجه تناسب، در پنج کلاس نامناسب، کم، در حد متوسط، زیاد و خیلی زیاد، طبقه‌بندی شدند. نتایج نشان داد ۶۲ درصد از مناطق استان، برای احداث مزارع بادی- فتوولتائیک دارای محدودیت هستند. همچنین ۲/۷۳ و ۰/۰۲ درصد از مساحت استان در کلاس زیاد و خیلی زیاد قرار دارند. در نهایت، با توجه به عدم پیوستگی و یکنواختی پیکسل‌های هر کلاس، شش سایت، برای توسعه مزارع بادی- فتوولتائیک انتخاب شدند. بررسی تصاویر ماهواره‌ای و موقعیت این سایت‌ها نشان داد نتایج دقت قابل قبولی دارند. روش به‌کارگرفته در این پژوهش می‌تواند مورد استفاده محققان و توسعه‌دهندگان انرژی‌های بادی و خورشیدی قرار بگیرد. همچنین بررسی فنی و اقتصادی مزارع بادی- فتوولتائیک و چالش‌های استفاده از سیستم‌های هیبریدی، موضوعاتی هستند که در مطالعات آینده می‌توانند مورد توجه قرار بگیرند.

## منابع

1. REN21. Renewables 2022 Global Status Report [Internet]. REN21 Secretariat; 2022 [cited 2023 Apr 27]. Available from: [https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/GSR2022\\_Full\\_Report.pdf](https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/GSR2022_Full_Report.pdf)
2. Patibandla A, Kollu R, Rayapudi SR, Manyala RR. A multi-objective approach for the optimal design of a standalone hybrid renewable energy system. *Int J Energy Res*. 2021 Oct 10;45(12):18121–48.
3. Al Busaidi AS, Kazem HA, Al-Badi AH, Farooq Khan M. A review of optimum sizing of hybrid PV-Wind renewable energy systems in oman. Vol. 53, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Elsevier Ltd; 2016. p. 185–93.
4. AECOM Australia Pty Ltd. Co-location investigation: a study into the potential for co-locating wind and solar farms in Australia [Internet]. Sydney; 2016 [cited 2023 Apr 27]. Available from: <http://www.aecom.com/au/wp-content/uploads/2016/03/Wind-solar-Co-location-Study-Final.pdf>
5. Noorollahi Y, Ghenaatpisheh Senani A, Fadaei A, Simaee M, Moltames R. A framework for GIS-based site selection and technical potential evaluation of PV solar farm using Fuzzy-Boolean logic and AHP multi-criteria decision-making approach. *Renew Energy*. 2022 Mar 1;186:89–104.
6. The country's wind energy technology development document [Internet]. 1st ed. Niroo Research Institute; 2016 [cited 2023 Aug 31]. Available from: <https://www.nri.ac.ir/Tech-Plan>
7. Iran's energy balance sheet in 1399 (2020-2021) [Internet]. Deputy of Electricity and Energy Affairs of Iran, Iran's Ministry of Energy; 2023 [cited 2023 Apr 27]. Available from: <https://pep.moe.gov.ir/>
8. Iran data overview and analysis [Internet]. U.S. Energy Information Administration (EIA). [cited 2023 Apr 27]. Available from: <https://www.eia.gov/international/analysis/country/IRN>
9. Taherdoost H, Madanchian M. Multi-Criteria Decision Making (MCDM) Methods and Concepts. *Encyclopedia*. 2023 Jan 9;3(1):77–87.
10. What is GIS? [Internet]. Environmental Systems Research Institute (Esri). [cited 2023 Apr 27]. Available from: <https://www.esri.com/en-us/what-is-gis/overview>
11. Sánchez-Lozano JM, Teruel-Solano J, Soto-Elvira PL, Socorro García-Cascales M. Geographical Information Systems (GIS) and Multi-Criteria Decision Making (MCDM) methods for the evaluation of solar farms locations: Case study in south-eastern Spain. Vol. 24, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Elsevier Ltd; 2013. p. 544–56.
12. Sun L, Jiang Y, Guo Q, Ji L, Xie Y, Qiao Q, et al. A GIS-based multi-criteria decision making method for the potential assessment and suitable sites selection of PV and CSP plants. *Resour Conserv Recycl*. 2021 May 1;168.
13. Azizkhani M, Vakili A, Noorollahi Y, Naseri F. Potential survey of photovoltaic power plants using Analytical Hierarchy Process (AHP) method in Iran. Vol. 75, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Elsevier Ltd; 2017. p. 1198–206.
14. Alami Merrouni A, Elwali Elaloui F, Mezrhah A, Mezrhah A, Ghennioui A. Large scale PV sites selection by combining GIS and Analytical Hierarchy Process. Case study: Eastern Morocco. *Renew Energy*. 2018 Apr 1;119:863–73.
15. Colak HE, Memisoglu T, Gercek Y. Optimal site selection for solar photovoltaic (PV) power plants using GIS and AHP: A case study of Malatya Province, Turkey. *Renew Energy*. 2020 Apr 1;149:565–76.
16. Asakereh A, Soleymani M, Sheikhdavoodi MJ. A GIS-based Fuzzy-AHP method for the evaluation of solar farms locations: Case study in Khuzestan province, Iran. *Solar Energy*. 2017;155:342–53.
17. Zoghi M, Houshang Ehsani A, Sadat M, javad Amiri M, Karimi S. Optimization solar site selection by fuzzy logic model and weighted linear combination method in arid and semi-arid region: A case study Isfahan-IRAN. Vol. 68, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Elsevier Ltd; 2017. p. 986–96.
18. Sánchez-Lozano JM, García-Cascales MS, Lamata MT. Comparative TOPSIS-ELECTRE TRI methods for optimal sites for photovoltaic solar farms. Case study in Spain. *J Clean Prod*. 2016 Jul 20;127:387–98.
19. Moradi S, Yousefi H, Noorollahi Y, Rosso D. Multi-criteria decision support system for wind farm site selection and sensitivity analysis: Case study of Alborz Province, Iran. *Energy Strategy Reviews*. 2020 May 1;29.
20. Baseer MA, Rehman S, Meyer JP, Alam MM. GIS-based site suitability analysis for wind farm development in Saudi Arabia. *Energy*. 2017;141:1166–76.
21. Arca D, Keskin Citiroglu H. Geographical information systems-based analysis of site selection for wind power plants in Kozlu District (Zonguldak-NW Turkey) by multi-criteria decision analysis method. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects*. 2020;
22. Villacreses G, Gaona G, Martínez-Gómez J, Jijón DJ. Wind farms suitability location using geographical information system (GIS), based on multi-criteria decision making (MCDM) methods: The case of continental Ecuador. *Renew Energy*. 2017;109:275–86.
23. Li M, Xu Y, Guo J, Li Y, Li W. Application of a GIS-based fuzzy multi-criteria evaluation approach for wind farm site selection in China. *Energies (Basel)*. 2020 May 1;13(10).

24. Tercan E. Land suitability assessment for wind farms through best-worst method and GIS in Balıkesir province of Turkey. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. 2021 Oct 1;47.
25. Koc A, Turk S, Şahin G. Multi-criteria of wind-solar site selection problem using a GIS-AHP-based approach with an application in Iğdir Province/Turkey. *Environmental Science and Pollution Research*. 2019 Nov 1;26(31):32298–310.
26. Chapter 1 - LAND AND CLIMATE. In: South Khorasan Province Statistical Yearbook 1399 (2020-2021) [Internet]. Statistical Center of Iran; [cited 2023 Apr 28]. Available from: [https://nnt.sci.org.ir/sites/Apps/yearbook/Lists/year\\_book\\_req/Item/newifs.aspx](https://nnt.sci.org.ir/sites/Apps/yearbook/Lists/year_book_req/Item/newifs.aspx)
27. Hafeznia H, Yousefi H, Razi Astaraei F. A novel framework for the potential assessment of utility-scale photovoltaic solar energy, application to eastern Iran. *Energy Convers Manag*. 2017 Nov 1;151:240–58.
28. Hansen MOL. *Aerodynamics of Wind Turbines*. 3rd ed. Routledge; 2015.
29. Günen MA. A comprehensive framework based on GIS-AHP for the installation of solar PV farms in Kahramanmaraş, Turkey. *Renew Energy*. 2021 Nov 1;178:212–25.
30. Doljak D, Stanojević G, Miljanović D. A GIS-MCDA BASED ASSESSMENT FOR SITING WIND FARMS AND ESTIMATION OF THE TECHNICAL GENERATION POTENTIAL FOR WIND POWER IN SERBIA. *Int J Green Energy*. 2021;18(4):363–80.
31. Giamalaki M, Tsoutsos T. Sustainable siting of solar power installations in Mediterranean using a GIS/AHP approach. *Renew Energy*. 2019 Oct 1;141:64–75.
32. Al-Ghussain L, Darwish Ahmad A, Abubaker AM, Mohamed MA. An integrated photovoltaic/wind/biomass and hybrid energy storage systems towards 100% renewable energy microgrids in university campuses. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. 2021 Aug 1;46.
33. Aly A, Jensen SS, Pedersen AB. Solar power potential of Tanzania: Identifying CSP and PV hot spots through a GIS multicriteria decision making analysis. *Renew Energy*. 2017;113:159–75.
34. Ali S, Taweekun J, Techato K, Waewsak J, Gyawali S. GIS based site suitability assessment for wind and solar farms in Songkhla, Thailand. *Renew Energy*. 2019 Mar 1;132:1360–72.
35. Noorollahi Y, Yousefi H, Mohammadi M. Multi-criteria decision support system for wind farm site selection using GIS. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. 2016 Feb 1;13:38–50.
36. Yousefi H, Hafeznia H, Yousefi-Sahzabi A. Spatial site selection for solar power plants using a gis-based boolean-fuzzy logic model: A case study of Markazi Province, Iran. *Energies (Basel)*. 2018;11(7).
37. Ayodele TR, Ogunjuyigbe ASO, Odigie O, Munda JL. A multi-criteria GIS based model for wind farm site selection using interval type-2 fuzzy analytic hierarchy process: The case study of Nigeria. *Appl Energy*. 2018 Oct 15;228:1853–69.
38. Santana-Sarmiento F, Velázquez-Medina S. Development of a Territorial Planning Model of Wind and Photovoltaic Energy Plants for Self-Consumption as a Low Carbon Strategy. *Complexity*. 2021;2021.
39. Atici KB, Simsek AB, Ulucan A, Tosun MU. A GIS-based Multiple Criteria Decision Analysis approach for wind power plant site selection. *Util Policy*. 2015 Dec 1;37:86–96.
40. Zadeh LA. Fuzzy sets. *Information and Control* [Internet]. 1965;8(3):338–53. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S001999586590241X>
41. Latinopoulos D, Kechagia K. A GIS-based multi-criteria evaluation for wind farm site selection. A regional scale application in Greece. *Renew Energy*. 2015;78:550–60.
42. Nasehi S, Karimi S, Jafari H. Application of fuzzy GIS and ANP for wind power plant site selection in East Azerbaijan Province of Iran. *Computational Research Progress in Applied Science & Engineering*. 2016;2(3):116–24.
43. Saaty TL. *The analytic hierarchy process: planning, priority setting, resource allocation*. New York ; London : McGraw-Hill International Book Co.; 1980.
44. Ghasemi G, Noorollahi Y, Alavi H, Marzband M, Shahbazi M. Theoretical and technical potential evaluation of solar power generation in Iran. *Renew Energy*. 2019 Aug 1;138:1250–61.
45. Barzehkar M, Parnell KE, Mobarghaee Dinan N, Brodie G. Decision support tools for wind and solar farm site selection in Isfahan Province, Iran. *Clean Technol Environ Policy*. 2021 May 1;23(4):1179–95.