

## **Location Selection of Solar Power Plants, Wind and Distributed Generation and Design of Electrical Distribution Network**

**Fereshte Shahbazi\*, Hadi Sahebi\*\*, Ahmad Makui\*\*\***

### **Abstract**

Today, the required energy mostly comes from fossil fuels. Due to the limitation of fossil fuel reserves in the world and emissions of pollutants, today's industries have been challenged to replace renewable energy source. Among these renewable energies, solar and wind are important. In this research, firstly, the factors affecting the location of the solar and distributed generation have been investigated and mapping of criteria in the GIS has been prepared. Then, considering the importance of integrating the information, the ANP technique is chosen for weighting the layers and implemented with Super Decision software. Finally, the model of supply chain of the distribution network is proposed with the aim of maximizing the supplier's profit and minimizing the emissions. Zanjan province is considered as the case study for which the model is solved. According to the results, areas of Khodabandeh, Ijrud, and Mahnashan are suitable for the construction of wind power plants and areas of Khodabande and Ijrud are suitable for the construction of solar power plant. Finally, Khodabandeh, Zanjan, and Mahnashan are suitable for construction of the small gas scale plant.

**Keywords: Electrical Distribution Network; Location Selection; Solar and DG Power Plants; GIS;  $\epsilon$  – Constraint Method.**

---

Received: Mar. 01, 2020; Accepted: Jul. 02, 2020.

\* M.Sc., Iran University of Science and Technology.

\*\* Assistant Professor, Iran University of Science and Technology (Corresponding Author).

E-mail: [hadi\\_sahebi@iust.ac.ir](mailto:hadi_sahebi@iust.ac.ir)

\*\*\* Professor, Iran University of Science and Technology.

## مکان‌یابی و طراحی مدل شبکه توزیع برق نیروگاه‌های خورشیدی، بادی و کوچک‌مقیاس گازی

فرشته شهبازی\*، هادی صاحبی\*\*، احمد ماکوئی\*\*\*

### چکیده

امروزه بخش عمده‌ای از انرژی موردنیاز از سوخت‌های فسیلی به‌دست می‌آید. محدودیت ذخایر انرژی فسیلی در جهان و انتشار مواد آلاینده بشر را برای جایگزین کردن منابع انرژی جدید به چالش کشیده است. در این میان باد و خورشید با دارا بودن مزایایی چون نداشتن آلودگی زیست‌محیطی، رایگان بودن و قابل تجدیدبودن، جایگاه و اهمیت ویژه‌ای دارند. در این پژوهش ابتدا به بررسی عوامل مؤثر بر مکان‌یابی نیروگاه‌های خورشیدی، بادی و کوچک‌مقیاس گازی پرداخته شده و نقشه‌های مربوط به معیارها در محیط سیستم اطلاعات جغرافیایی تهیه شده است؛ سپس با توجه به اهمیت تلفیق اطلاعات فرآیند تحلیل شبکه‌ای برای وزن‌دهی به لایه‌ها انتخاب و به کمک نرم‌افزار سوپردسیژن اجرا شده است؛ در نهایت مدل زنجیره تأمین شبکه توزیع برق با هدف بیشینه‌کردن سود تأمین‌کننده و کمینه‌کردن انتشار آلاینده ارائه و برای استان زنجان به‌عنوان مطالعه موردی حل شده است. طبق نتایج مناطقی از شهرهای خدابنده، ایجرود، ماهنشان برای احداث نیروگاه بادی و مناطقی از خدابنده و ایجرود برای احداث نیروگاه خورشیدی و خدابنده، زنجان و ماهنشان برای احداث نیروگاه کوچک‌مقیاس گازی مناسب هستند.

**کلیدواژه‌ها:** شبکه توزیع برق؛ مکان‌یابی؛ نیروگاه‌های خورشیدی؛ بادی و تولید پراکنده؛ سیستم اطلاعات جغرافیایی؛ روش محدودیت اسپیلون.

---

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۷/۱۲/۱۱، تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۰۴/۱۲.

\* کارشناس ارشد، دانشگاه علم و صنعت ایران.

\*\* استادیار، دانشگاه علم و صنعت ایران (نویسنده مسئول).

E-mail: hadi\_sahebi @ iust.ac.ir

\*\*\* استاد، دانشگاه علم و صنعت ایران.

## ۱. مقدمه

آنچه امروزه به‌عنوان بزرگ‌ترین مشکل جهانی زندگی بشر را تهدید می‌کند، کمبود انرژی و آلودگی زیست‌محیطی ناشی از استفاده سوخت‌های فسیلی است. وابستگی شدید به منابع نفتی و محدودبودن این منابع از مهم‌ترین مسائلی است که تأمین انرژی موردنیاز کشور در آینده را تهدید می‌کند؛ از این رو توسعه انرژی‌های پاک اهمیت ویژه‌ای یافته است. در این میان باد و خورشید با دارا بودن مزایایی چون نداشتن آلودگی زیست‌محیطی، رایگان بودن و قابل تجدیدبودن، جایگاه و اهمیت ویژه‌ای دارند؛ از این رو این پژوهش به بررسی طراحی ساختار زنجیره تأمین شبکه توزیع برق با استفاده از نیروگاه‌های خورشیدی و تولید پراکنده برای مطالعه موردی در استان زنجان پرداخته است. نخستین حلقه از این زنجیره تأمین نیروگاه‌های خورشیدی و بادی و کوچک‌مقیاس گازی است که به‌عنوان تأمین‌کننده انرژی موردنیاز در شبکه‌ی زنجیره تأمین هستند که این نقاط بالقوه بوده و نیازمند این هستند که مکان‌یابی شوند. دومین حلقه این زنجیره شرکت‌های تولیدکننده توان هستند که دارای امکانات و تجهیزات تولید برق و صاحبان نیروگاه‌های توان هستند و توان الکتریکی تولیدشده توسط نیروگاه‌ها را به تأمین‌کنندگان می‌فروشند. سومین حلقه این زنجیره، تأمین‌کنندگان هستند که انرژی را از تولیدکنندگان می‌خرند و به مصرف‌کنندگان در بازارهای مختلف می‌فروشند. آخرین حلقه بازارهای تقاضا یا مصرف‌کننده هستند که در این پژوهش ۶ دسته مصرف‌کننده در نظر گرفته شده است: مصارف خانگی؛ کشاورزی؛ تولید و صنعت؛ تجاری؛ روشنایی معابر و مصارف عمومی. در مدل ارائه‌شده توابع هدف اقتصادی - زیست‌محیطی هم‌زمان در نظر گرفته شده‌اند. در این پژوهش پس از جمع‌آوری اطلاعات از منابع در دسترس و با استفاده از نرم‌افزار سیستم اطلاعات جغرافیایی<sup>۱</sup> که برای تصمیم‌گیری درباره منابع طبیعی می‌تواند یک ابزار قدرتمند برای ارزیابی مکانی گزینه‌های انتخابی باشد به مکان‌یابی بر مبنای معیارهای موردنظر پرداخته شده است. پس از آماده‌سازی و تعیین لایه‌های اطلاعاتی برای تعیین وزن کلاس‌های هر لایه و وزن نهایی معیارها از روش فرآیند تحلیل شبکه‌ای<sup>۲</sup> استفاده شده است. در روش یادشده ابتدا با استفاده از نظر خبرگان مقایسه زوجی هر یک از معیارها صورت گرفت؛ سپس معیارها با استفاده از نرم‌افزار سوپردسیژن وزندهی شدند. در گام بعد وزن‌های به‌دست‌آمده وارد محیط GIS شده و در هر یک از لایه‌ها ضرب شد و همراه با آن روی هم‌گذاری موزون صورت گرفت. در نهایت خروجی مدل GIS وارد مدل ریاضی شده و مدل دوهدفه زنجیره تأمین شبکه توزیع برق با در نظر گرفتن نیروگاه‌های خورشیدی، بادی و کوچک‌مقیاس گازی به‌عنوان منابع تولیدکننده انرژی برق با نرم‌افزار GAMS اجرا شد؛

1. GIS

2. Analytic network process

به عبارتی خروجی فاز نخست به‌عنوان مکان‌های دارای ظرفیت مناسب برای احداث نیروگاه‌ها به مدل ریاضی وارد می‌شود و سپس این مدل ریاضی به مکان‌یابی این تسهیلات می‌پردازد. ادامه پژوهش حاضر به شرح زیر است: در بخش ۲، خلاصه‌ای از پژوهش‌های انجام‌شده در حوزه پژوهشی آورده شده است. در بخش ۳، مدل ریاضی برای طراحی شبکه زنجیره تأمین توزیع برق ارائه شده و در بخش ۴، نتایج عددی حاصل از این مدل آمده و به مکان‌یابی نیروگاه‌های خورشیدی، بادی و کوچک‌مقیاس گازی پرداخته شده است. در نهایت در بخش ۵، نتایج و پیشنهادهایی برای پژوهش‌های آتی آورده شده است.

## ۲. مبانی نظری و پیشینه پژوهش

در این قسمت به‌منظور آشنایی بیشتر با پژوهش‌های انجام‌شده در حوزه زنجیره تأمین شبکه توزیع برق، تعدادی از مقاله‌های انجام‌شده در سال‌های اخیر مرور شده‌اند.

**مرور مبانی نظری حوزه طراحی شبکه توزیع برق.** چن و همکاران (۲۰۱۴)<sup>۱</sup>، یک مدل زنجیره تأمین شبکه توان الکتریکی تک‌هدفه غیرخطی ارائه داده‌اند که تابع هدف، سود کل زنجیره و متغیرهای تصمیم، مقدار توان الکتریکی تولیدشده و منتقل‌شده بین سطوح زنجیره است. دوره برنامه‌ریزی در این پژوهش کوتاه‌مدت فرض شده است [۷]. ناگورنی و همکاران (۲۰۰۶)<sup>۲</sup>، مدلی برای زنجیره تأمین شبکه تولید و توزیع و انتقال برق ارائه دادند. تابع هدف این مدل غیرخطی، حداکثرکردن سود تولیدکننده و تأمین‌کننده و متغیرهای تصمیم، مقدار برق تولیدشده است. این مدل با روش دقیق حل شده است [۳۱]. بوجس و همکاران (۲۰۱۲)<sup>۳</sup>، با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک یک مدل چندهدفه غیرخطی را حل کردند که توابع هدف، کاهش اتلاف انرژی هزینه سرمایه‌گذاری و افزایش اطمینان‌پذیری است [۶]. ناگورنی و همکاران (۲۰۰۶)<sup>۴</sup>، یک مدل زنجیره تأمین شبکه توان الکتریکی غیرخطی ارائه کردند که تابع تک‌هدفه، سود کل زنجیره و با در نظر گرفتن مالیات دی‌اکسید کربن در تابع هدف است. متغیرهای تصمیم مقدار برقی است که در سطوح شبکه زنجیره تأمین جریان دارد [۲۰].

جلالی و همکاران (۲۰۱۴)<sup>۵</sup>، یک مدل چندهدفه خطی ارائه داده‌اند که اهداف آن شامل حداکثرکردن هزینه سرتاسری و اتلاف‌های توان است. متغیرهای تصمیم، طراحی جایگاه‌های ایستگاه برق و پیکره‌بندی شاخه‌ها است. آن‌ها از روش مدل‌سازی ریاضی MINLP بهره

- 
1. Chen, M et al
  2. Wu, K., Nagurney , A
  3. Borges, C. L. T.,
  4. Nagurney, A et al
  5. Jalali et al

گرفته‌اند [۱۵]. ستایش‌نظر و همکاران (۲۰۰۹)<sup>۱</sup>، یک مدل قطعی سناریومحور<sup>۲</sup> چندهدفه و غیرخطی برای طراحی شبکه ارائه کردند. الگوریتم بهینه‌سازی برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح مختلط است. اهداف، هزینه کلی و قابلیت اطمینان است و متغیرهای تصمیم، سناریوی مشارکت در بازار خرده‌فروشی، جایگاه‌های جدید و شاخه‌های جدید، مکان و اندازه فیدرها هستند [۲۲]. ساهو و همکاران (۲۰۱۳)<sup>۳</sup>، یک مدل غیرقطعی چندهدفه با توابع هدف حداقل کردن هزینه عملیاتی و سرمایه‌گذاری و حداکثر کردن اطمینان‌پذیری و متغیرهای تصمیم حالت مسیرهای فیدرها، اندازه جایگاه‌های جدید ارائه کرده‌اند و الگوریتم بهینه‌سازی برنامه‌ریزی دینامیک است [۱۲].

**مرور مبانی نظری حوزه مکان‌یابی.** گارنی و همکاران (۲۰۱۷)، مدلی برای مکان‌یابی نیروگاه‌های خورشیدی با استفاده از تکنیک‌های تصمیم‌گیری چندگانه و GIS ارائه کردند. آن‌ها عوامل زیست‌محیطی و فنی را با هدف حداکثر توان تولیدی و حداقل شدن هزینه پروژه در نظر گرفتند. در این پژوهش از فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی برای وزن‌دهی معیارها و محاسبه وزن لایه‌های GIS استفاده شده است. مورد مطالعه در این پژوهش عربستان سعودی است [۱]. احمدعلی و همکاران (۲۰۱۷)، برای دستیابی به مناطق مناسب به منظور احداث نیروگاه خورشیدی در تانزانیا از فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی و GIS استفاده کردند [۴]. عسگرزاده و همکاران (۲۰۱۷) از فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی فازی و GIS برای ارزیابی مکان‌های مناسب برای احداث مزرعه خورشیدی در خوزستان استفاده کردند، در این پژوهش جنبه‌های زیست‌محیطی، فنی و اقتصادی در انتخاب معیارها لحاظ شده است [۵]. گارنی و همکاران (۲۰۲۰)، رویکرد مونت‌کارلو را برای تحلیل حساسیت اثر معیارها بر مکان‌یابی نیروگاه‌های خورشیدی به‌کار بردند. در این پژوهش تأثیر معیارهای چندگانه همچون شدت تابش، دمای هوا، نواحی ابری، نزدیکی به بزرگراه‌ها، نزدیکی به خطوط انتقال انرژی، شیب و جهت آن در مکان‌یابی نقاط بالقوه بررسی شده و شبیه‌سازی مونت‌کارلو برای تحلیل مدل تصمیم‌گیری به‌کار رفته است [۲]. دیاز و همکاران (۲۰۱۸)، برای مکان‌یابی بهینه احداث نیروگاه‌های خورشیدی در جنوب اسپانیا یک روش بهینه ارائه دادند که در آن از تصمیم‌گیری چندمعیاره بر پایه فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی و از روش GIS برای تشکیل لایه‌های اطلاعات مختلف استفاده شده است [۹]. اوایان (۲۰۱۷)، به مکان‌یابی نیروگاه خورشیدی در مناطقی از ترکیه پرداخته است. در این پژوهش مکان‌های مناسب برای احداث نیروگاه خورشیدی با استفاده از GIS و فرآیند تحلیل

---

1. Nazar m et al  
2. Based-Scenario  
3. Sahoo,N et al

سلسله‌مراتبی که یکی از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره است، مشخص شده‌اند [۳۰]. شهیدعلی و همکاران (۲۰۱۹)، به مکان‌یابی نیروگاه خورشیدی و بادی با استفاده از فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی و سیستم اطلاعات جغرافیایی و با در نظر گرفتن معیارهای اقتصادی - اجتماعی و فیزیولوژیکی در تایلند پرداختند [۳]. دیاز و همکاران (۲۰۱۸)، در پژوهش خود به مکان‌یابی نیروگاه‌های بادی در مناطقی از اسپانیا با استفاده از GIS و رویکرد سناریومحور پرداختند [۱۰].

مقاله‌های بررسی‌شده در این پژوهش در قسمت نخست در حوزه طراحی شبکه توزیع برق است. در این پژوهش‌ها به مسئله مکان‌یابی نیروگاه‌های خورشیدی و تولید پراکنده به‌عنوان منابع تولید انرژی الکتریکی پرداخته نشده است. بیشتر پژوهش‌ها روش‌های حل ابتکاری<sup>۱</sup> و یا فراابتکاری<sup>۲</sup> را در نظر گرفته‌اند و در استفاده از روش حل دقیق شکاف زیادی در مبانی نظری وجود دارد. توابع هدف در نظر گرفته‌شده در بیشتر پژوهش‌ها در زمینه کاهش هزینه است و جای خالی توابع هدفی که به بررسی هم‌زمان توابع هدف اقتصادی و زیست‌محیطی همانند حداکثر کردن سود و حداقل کردن میزان انتشار گازهای آلاینده بپردازد، در مبانی نظری احساس می‌شود.

در بخش دوم مرور مبانی نظری، پژوهش‌هایی که به مکان‌یابی نیروگاه‌های تجدیدپذیر پرداخته‌اند، بررسی شده‌اند. در بیشتر این پژوهش‌ها از GIS به‌عنوان ابزاری برای یافتن مناطق بالقوه استفاده شده است؛ اما در نظر گرفتن معیارهای اقتصادی، اجتماعی، زیست‌محیطی و جغرافیایی با یکدیگر در مبانی نظری خالی است؛ همچنین در بیشتر پژوهش‌ها از روش تحلیل سلسله‌مراتبی استفاده شده که با توجه به مرتبط بودن معیارهای جغرافیایی و طبیعی با یکدیگر، در این پژوهش از روش فرآیند تحلیل شبکه‌ای استفاده شده است در این پژوهش مدلی برای طراحی زنجیره تأمین شبکه توزیع برق ارائه شده است. با توجه به مبانی نظری، نوآوری‌های پژوهش حاضر عبارت‌اند از: ۱. طراحی زنجیره تأمین شبکه توزیع برق با در نظر گرفتن هم‌زمان دو هدف بیشینه‌سازی سود و کمینه‌سازی میزان انتشار گاز CO<sub>2</sub>: ۲. مکان‌یابی نیروگاه‌های خورشیدی، بادی و کوچک‌مقیاس با استفاده از نرم‌افزار سیستم اطلاعات جغرافیایی.

### ۳. روش‌شناسی پژوهش

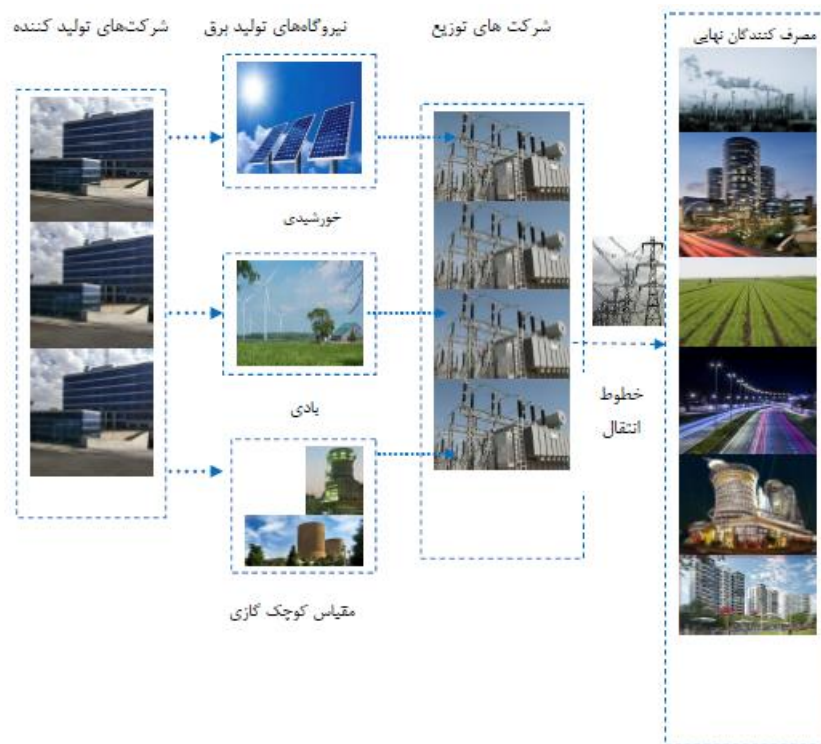
#### مفروضات مدل

- شبکه زنجیره تأمین موردنظر شامل چهار سطح نیروگاه‌ها، تولیدکننده‌ها، تأمین‌کننده‌ها و مصرف‌کنندگان است.

---

1. Heuristic  
2. Meta-Heuristic

- سه نوع نیروگاه بادی و خورشیدی و کوچک‌مقیاس گازی به‌عنوان مراکز تولید برق در نظر گرفته شده‌اند.
  - هر یک از نیروگاه‌ها دارای حداقل و حداکثر مقدار مجاز برای تولید هستند.
  - تعداد و ظرفیت شرکت‌های تولیدی طبق سیاست‌ها و بودجه در دسترس معلوم است.
  - میزان تقاضا و تمامی هزینه‌های موجود در شبکه مشخص است.
- شمای کلی از زنجیره تأمین مورد مطالعه در شکل ۱، آورده شده است.



شکل ۱. ساختار کلی شبکه زنجیره تأمین مدل

## مجموعه‌ها:

- $g$  : شرکت‌های تولیدکننده برق  
 $i$  : مکان نیروگاه‌های خورشیدی  
 $j$  : مکان نیروگاه‌های بادی  
 $l$  : مکان نیروگاه‌های مقیاس کوچک گازی  
 $s$  : تأمین‌کنندگان  
 $k$  : مصرف‌کنندگان  
 $m$  : ظرفیت نیروگاه خورشیدی  
 $m'$  : ظرفیت نیروگاه بادی  
 $m''$  : ظرفیت نیروگاه کوچک مقیاس گازی

## پارامترها:

- $pr^i$  : قیمت فروش برق خورشیدی به تأمین‌کننده  
 $pr^j$  : قیمت فروش برق بادی به تأمین‌کننده  
 $pr^l$  : قیمت فروش برق نیروگاه مقیاس کوچک به تأمین‌کننده  
 $Trcost$  : هزینه انتقال از تولیدکننده به تأمین‌کننده  
 $Trcost$  : هزینه انتقال از تأمین‌کننده به مشتری  
 $pr^k$  : قیمت فروش برق از تأمین‌کننده به مشتری  
 $cap_i^m$  : ظرفیت نیروگاه  $i$   
 $cap_j^{m'}$  : ظرفیت نیروگاه  $j$   
 $cap_l^{m''}$  : ظرفیت نیروگاه  $l$   
 $d_k$  : تقاضای بازار  $k$   
 $c_g$  : ظرفیت شرکت  $g$ ام (برای احداث نیروگاه خورشیدی)  
 $c'_g$  : ظرفیت شرکت  $g$ ام (برای احداث نیروگاه بادی)  
 $c''_g$  : ظرفیت شرکت  $g$ ام (نیروگاه کوچک مقیاس گازی)  
 $cr$  : درآمد کربن (g/kwh)  
 $E$  : ضریب شدت آلاینده‌گی (g/kwh)  
 $\alpha_{min}^i$  : حداقل میزان تقاضا که توسط نیروگاه خورشیدی برآورده می‌شود.  
 $\alpha_{min}^j$  : حداقل میزان تقاضا که توسط نیروگاه بادی برآورده می‌شود.  
 $\alpha_{min}^l$  : حداقل میزان تقاضا که توسط نیروگاه کوچک مقیاس گازی برآورده می‌شود.  
 $\alpha_{max}^i$  : حداکثر میزان تقاضا که توسط نیروگاه خورشیدی برآورده می‌شود.



$\alpha_{max}^j$  : حداکثر میزان تقاضا که توسط نیروگاه بادی برآورده می‌شود.  
 $\alpha_{max}^l$  : حداکثر میزان تقاضا که توسط نیروگاه کوچک‌مقیاس گازی برآورده می‌شود.

#### متغیرها:

$x_{i,g}^m$  : برابر یک است اگر نیروگاه خورشیدی توسط تولیدکننده  $g$  در مکان  $i$  ام به ظرفیت  $m$  ام تأسیس شود؛ در غیر این صورت صفر است.  
 $x_{j,g}^{m'}$  : برابر یک است اگر نیروگاه بادی توسط تولیدکننده  $g$  در مکان  $j$  ام به ظرفیت  $m'$  ام تأسیس شود؛ در غیر این صورت صفر است.  
 $x_{l,g}^{m''}$  : برابر یک است اگر نیروگاه کوچک‌مقیاس گازی توسط تولیدکننده  $g$  در مکان  $l$  ام به ظرفیت  $m''$  ام تأسیس شود؛ در غیر این صورت صفر است.  
 $p_g^i$  : برق تولیدشده توسط تولیدکننده  $g$  با نیروگاه  $i$   
 $p_g^j$  : برق تولیدشده توسط تولیدکننده  $g$  با نیروگاه  $j$   
 $p_g^l$  : برق تولیدشده توسط تولیدکننده  $g$  با نیروگاه  $l$   
 $p_{g \rightarrow s}^i$  : برق تولیدی شرکت  $g$  با استفاده از نیروگاه  $i$  که به تأمین‌کننده  $s$  می‌رسد.  
 $p_{g \rightarrow s}^j$  : برق تولیدی شرکت  $g$  با استفاده از نیروگاه  $j$  که به تأمین‌کننده  $s$  می‌رسد.  
 $p_{g \rightarrow s}^l$  : برق تولیدی شرکت  $g$  با استفاده از نیروگاه  $l$  که به تأمین‌کننده  $s$  می‌رسد.  
 $p_{s \rightarrow k}$  : مقدار برقی که از تأمین‌کننده  $s$  به مصرف‌کننده  $k$  منتقل می‌شود.  
 $p_{g \rightarrow s}$  : مقدار برقی که شرکت  $g$  به تأمین‌کننده  $s$  می‌فروشد.

#### توابع هدف مدل ریاضی

$$\max f_1 = (\sum_{s,k} pr^k \cdot p_{s \rightarrow k} + \sum_{g,i,s} cr \cdot p_{g \rightarrow s}^i + \sum_{g,j,s} cr \cdot p_{g \rightarrow s}^j) -$$

$$(\sum_{g,s,i} pr^i \cdot p_{g \rightarrow s}^i + \sum_{g,s,j} pr^j \cdot p_{g \rightarrow s}^j + \sum_{g,s,l} pr^l \cdot p_{g \rightarrow s}^l +$$

$$\sum_{g,s} Trcost_{g \rightarrow s} \cdot p_{g \rightarrow s} + \sum_{s,k} Trcost_{s \rightarrow k} \cdot p_{s \rightarrow k}) \quad (1)$$

$$\min f_2 = \sum_{g,l} E \cdot p_g^l \quad (2)$$

تابع هدف ۱، سود تأمین‌کننده را محاسبه می‌کند که عبارت است از: درآمد منهای هزینه. با توجه به این تابع هدف که حداکثر کردن سود است و همچنین برا پاسخگویی به کمبود بار شبکه توزیع برق و تأمین نیازمندی‌های شبکه در کنار دو نیروگاه تجدیدپذیر دیگر، نیروگاه کوچک‌مقیاس گازی که هزینه‌ای بسیار کمتر از دو نیروگاه دیگر دارد نیز در نظر گرفته شده است.

عبارت‌های اول تا سوم درآمد ناشی از فروش برق خورشیدی، بادی و کوچک‌مقیاس گازی به تقاضاکننده را نشان می‌دهد. عبارت‌های چهارم تا ششم هزینه‌ای که تأمین‌کننده برای خرید انرژی برق تولیدشده از نیروگاه خورشیدی، بادی و کوچک‌مقیاس گازی می‌پردازد را نشان می‌دهد. عبارت‌های هفتم و هشتم هزینه‌های انتقال شامل هزینه انتقال برق از شرکت‌های تولیدی به تأمین‌کننده و هزینه‌ی انتقال از تأمین‌کننده به مصرف‌کننده را نشان می‌دهند. تابع هدف دوم حداقل کردن انتشار آلاینده است. افزایش انتشار CO<sub>2</sub> یک مسئله مهم برای چرخه طبیعی در اکوسیستم محسوب می‌شود [۱۹]. از آنجاکه برق خورشیدی و بادی انتشار آلاینده ندارند، در این تابع هدف فقط برق تولیدشده توسط نیروگاه کوچک‌مقیاس گازی در نظر گرفته شده است که در این تابع هدف، پارامتر E ضریب شدت آلاینده‌ی<sup>۱</sup> گاز CO<sub>2</sub> است [۳۲].

### محدودیت‌های مدل:

$$\sum_s p_{g \rightarrow s}^i = p_g^i \forall g, i \quad (۳)$$

$$\sum_s p_{g \rightarrow s}^j = p_g^j \forall g, j \quad (۴)$$

$$\sum_s p_{g \rightarrow s}^l = p_g^l \forall g, l \quad (۵)$$

$$\sum_{g,i} p_{g \rightarrow s}^i + \sum_{g,j} p_{g \rightarrow s}^j + \sum_{g,l} p_{g \rightarrow s}^l = \sum_k p_{s \rightarrow k} \forall s \quad (۶)$$

$$\sum_s p_{s \rightarrow k} \geq d_k \forall k \quad (۷)$$

$$\sum_{m,i} cap_i^m \cdot x_{i,g}^m \leq c_g \forall g \quad (۸)$$

$$\sum_{m',j} cap_j^{m'} \cdot x_{j,g}^{m'} \leq c'_g \forall g \quad (۹)$$

$$\sum_{m'',l} cap_l^{m''} \cdot x_{l,g}^{m''} \leq c''_g \forall g \quad (۱۰)$$

$$\sum_{g,m} x_{i,g}^m \leq 1 \forall i \quad (۱۱)$$

$$\sum_{g,m'} x_{j,g}^{m'} \leq 1 \forall j \quad (۱۲)$$

$$\sum_{g,m''} x_{l,g}^{m''} \leq 1 \forall l \quad (۱۳)$$

$$\sum_m cap_i^m \cdot x_{i,g}^m \geq p_g^i \forall g \quad (۱۴)$$

$$\sum_{m'} cap_j^{m'} \cdot x_{j,g}^{m'} \geq p_g^j \forall g \quad (۱۵)$$

$$\sum_{m''} cap_l^{m''} \cdot x_{l,g}^{m''} \geq p_g^l \forall g \quad (۱۶)$$

$$\sum_k \alpha_{min}^i \cdot d_k \leq \sum_{g,i} p_g^i \leq \sum_k \alpha_{max}^i \cdot d_k \quad (۱۷)$$

$$\sum_k \alpha_{min}^j \cdot d_k \leq \sum_{g,j} p_g^j \leq \sum_k \alpha_{max}^j \cdot d_k \quad (۱۸)$$

$$\sum_k \alpha_{min}^l \cdot d_k \leq \sum_{g,l} p_g^l \leq \sum_k \alpha_{max}^l \cdot d_k \quad (۱۹)$$

1. Emission intensity

معادله ۳، نشان می‌دهد که مقدار برق تولیدشده در یک نیروگاه خورشیدی به‌وسیله شرکت برابر با برق منتقل‌شده از نیروگاه به همه شرکت‌های تأمین‌کننده است. معادله‌های ۴ و ۵، نیز همین محدودیت را به‌ترتیب برای نیروگاه بادی و کوچک‌مقیاس گازی نشان می‌دهند.

محدودیت ۶، نشان می‌دهد که مقدار کل برق خریداری‌شده توسط تأمین‌کننده توان برابر با مقدار کل برق خریداری‌شده از شرکت‌ها است که به‌وسیله نیروگاه‌های خورشیدی و بادی و کوچک‌مقیاس گازی در دسترس شرکت‌ها تولید شده است. محدودیت ۷، تضمین می‌کند که تقاضای برق برآورده شود. محدودیت ۸، نشان می‌دهد که اگر در مکان  $i$ ام نیروگاه  $m$  توسط شرکت  $g$  احداث شود. مجموع ظرفیت نیروگاه‌ها حداکثر برابر ظرفیت شرکت‌هایی است که نیروگاه خورشیدی احداث می‌کنند. محدودیت‌های ۹ و ۱۰، نیز همین محدودیت را به‌ترتیب برای نیروگاه بادی و کوچک‌مقیاس گازی نشان می‌دهد.

محدودیت ۱۱، نشان می‌دهد که در هر مکان  $i$  حداکثر یک نیروگاه خورشیدی می‌تواند احداث شود. محدودیت‌های ۱۲ و ۱۳، نیز همین محدودیت را به‌ترتیب برای نیروگاه بادی و کوچک‌مقیاس گازی نشان می‌دهد. نامعادلات ۱۴، ۱۵ و ۱۶، محدودیت‌های ظرفیت نیروگاه‌ها هستند که هر نیروگاه در صورت احداث، ظرفیت مشخصی خواهد داشت. نامعادلات ۱۷، ۱۸، ۱۹، نیز حداکثر و حداقل میزان برقی که از هر نوع نیروگاه تأمین می‌شود را نشان می‌دهند.

#### ۴. تحلیل داده‌ها و یافته‌های پژوهش

روش محدودیت اِپسِلون<sup>۱</sup> یکی از رویکردهای شناخته‌شده برای مواجهه با مسائل چندهدفه است. در این روش یکی از توابع هدف به‌عنوان تابع اصلی انتخاب می‌شود و سایر توابع هدف به شکل محدودیت در مسئله ظاهر خواهد شد [۱۱]. در مدل مفروض نیروگاه‌های تولید برق جز نقاط بالقوه هستند و باید مکان‌یابی شوند با استفاده از ابزار GIS و فرآیند تحلیل شبکه‌ای مکان‌های مناسب برای احداث نیروگاه به‌دست می‌آید.

**مدل GIS:** شناخت مکان‌های مناسب برای بهره‌برداری از نیروگاه‌های انرژی پاک و تولید پراکنده مسئله‌ای است که نیاز به در نظر گرفتن عوامل بسیاری داشته و نیاز به تجزیه و تحلیل دارد، استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی<sup>۲</sup> و سیستم‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره با یک رویکرد تلفیقی می‌تواند نقش مهمی در فرآیند مکان‌یابی داشته باشد. GIS یک بانک اطلاعات نوین است که وجه تمایز آن با یک بانک اطلاعاتی معمولی، فراگیر بودن و هوشمندی نسبی آن است. فراگیر است؛ زیرا اطلاعات گرافیکی (مکانی) و اطلاعات غیرگرافیکی (توصیفی - مقداری)

1.  $\epsilon$  - constraint

2. GIS

مربوط به زمینه‌های گوناگون یک جا جمع شده است و هوشمند است؛ از آن رو که قادر به انتخاب، تلفیق و تحلیل داده‌ها است [۱۸]. GIS دارای قابلیت‌ها و مزایای فراوانی برای مکان‌یابی نسبت به سایر روش‌ها است که مهم‌ترین آن‌ها عبارت‌اند از:

۱. قابلیت نمایش و انتخاب عوارض: GIS امکانات و ابزار نمایشی و ترسیمی مناسب و کارا برای نمایش عوارض مختلف در اختیار کاربر قرار می‌دهد؛

۲. قابلیت ایجاد منطقه حائل: GIS به کاربر امکان می‌دهد تا برای عوارض موردنظر، منطقه حائل یا حریم ایجاد کند و از آن در تحلیل‌های مختلف استفاده کند؛

۳. قابلیت مدل‌سازی و تجزیه و تحلیل: یکی از قابلیت‌های مهم GIS، قابلیت مدل‌سازی و تجزیه و تحلیل است، به این ترتیب یک سری از مدل‌ها و توابع به سیستم معرفی می‌شوند و سیستم بعد از تجزیه و تحلیل مدل‌ها می‌تواند اثر انجام یک کار را مشخص کرده و یا تصمیم‌گیری کند که آن کار یا عملیات به چه نحو انجام شود تا حالت بهینه را در بر داشته باشد؛

۴. تجزیه و تحلیل و هم‌پوشانی نقشه‌ها: با استفاده از GIS می‌توان چندین لایه اطلاعاتی را روی یکدیگر منطبق کرده و با اعمال اپراتورهای منطقی و ریاضی مکان‌های بهینه را به دست آورد. هدف استفاده از GIS در این مطالعه غربالگری اولیه و کمک به شناسایی مکان‌های مناسب برای احداث نیروگاه‌ها بر اساس معیارهای مختلف زیست‌محیطی، جغرافیایی، اقتصادی و اجتماعی است که در مدل‌سازی شبکه زنجیره تأمین به کار گرفته خواهد شد.

با توجه به پژوهش‌های انجام‌شده، معیارهای تأثیرگذار برای انتخاب مکان‌های مناسب به‌منظور احداث نیروگاه‌های خورشیدی، بادی و کوچک‌مقیاس‌گازی استخراج می‌شود و سپس بر اساس معیارهای ذکر شده لازم است در ابتدا لایه جغرافیایی هر یک از معیارها در محیط GIS تهیه شود. در مرحله بعد برای ترکیب این لایه‌ها می‌توان از روش‌های هم‌پوشانی بولین<sup>۱</sup> یا روش وزن‌دهی<sup>۲</sup> استفاده کرد که دو دسته عملیات هم‌پوشانی هستند که در GIS بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرد. روش وزن‌دهی به دلیل استفاده از قوانین ترکیبی جبرانی انعطاف‌پذیری بیشتری در تعیین مکان‌ها دارد. در این پژوهش از این روش برای ترکیب لایه‌ها روی یک نقشه پایه و تهیه نقشه نهایی شایستگی مناطق مختلف استفاده شده است [۲۷].

**مطالعه‌ی موردی.** به‌منظور اعتبارسنجی و صحت مدل ارائه‌شده در بخش قبل، شبکه توزیع برق استان زنجان در نظر گرفته شده است. استان زنجان با وسعتی بالغ بر ۲۲۱۶۱ کیلومتر مربع و با جمعیتی بالغ بر ۱,۰۱۵,۷۳۴ نفر، بر اساس تقسیمات شهری شامل ۸ منطقه است. این استان

---

1. Boolean overlay  
2. Weighted overlay

در مختصات جغرافیایی ۳۰ درجه و ۳۶ دقیقه شمالی و ۲۰ درجه و ۴۸ دقیقه شرقی قرار گرفته است.

در این پژوهش به مکان‌یابی مناطق مناسب استان زنجان برای احداث نیروگاه‌های بادی و خورشیدی و کوچک‌مقیاس گازی بر مبنای مهم‌ترین معیارهای اقتصادی، اجتماعی، فنی و اقلیمی - جغرافیایی با استفاده از GIS و فرآیند تحلیل شبکه‌ای<sup>۱</sup> پرداخته شده است. برای مطالعه منطقه، آمار و اطلاعات پایه‌ای زیر به کار رفت:

۱. نقشه‌ی توپوگرافی رقومی شده به مقیاس ۱:۲۵۰۰۰۰ از استان زنجان به‌عنوان منطقه مورد مطالعه؛

۲. آمار ماهانه و سالانه پارامترهای اقلیمی از ایستگاه‌های سینوپتیک و کلیماتولوژی منطقه و ایستگاه‌های مجاور به تعداد ۷ ایستگاه در دوره آماری ۲۰ ساله؛

۳. داده‌های موردنیاز در این پژوهش از سالنامه‌های سازمان هواشناسی برای مدت ۲۰ سال وارد محیط اکسل شد و با استفاده از نرم‌افزار GIS موردبررسی و تحلیل قرار گرفت.

**معیارهای مؤثر در جایابی بهینه نیروگاه‌های بادی.** مهم‌ترین معیارهای تعیین پهنه‌های مناسب برای استقرار نیروگاه‌های بادی عبارت‌اند از: ارتفاع، شیب و سرعت باد که حداکثر و حداقل این معیارها بر اساس استاندارد در جدول ۲، آورده شده است [۳، ۱۰، ۲۴]. عوامل مهم دیگری که در ظرفیت‌سنجی احداث نیروگاه بادی و خورشیدی تأثیر دارند به قرار زیر است: فاصله از مناطق مسکونی؛ فاصله از مسیرهای حمل‌ونقل؛ فاصله از فرودگاه‌ها؛ کاربری اراضی؛ فاصله از مناطق حفاظت‌شده؛ فاصله از رودخانه و مسیل؛ فاصله از گسل‌ها و معادن؛ فاصله از آب‌بندها و سدها؛ فاصله از خطوط انتقال نیرو و پست‌های برق که این عوامل به‌عنوان لایه محدودیت در نظر گرفته می‌شود که در جدول‌های ۱ و ۲، حداقل و حداکثر این معیارها بر اساس استاندارد آورده شده است [۹، ۱۰، ۲۱، ۲۶].

جدول ۱. حداقل و حداکثر فاصله از معیارهای موردبررسی

معیار مورد مطالعه	حداقل فاصله (m)	حداکثر فاصله (m)
شهرها	۲۰۰۰	-
راه‌های محلی	۵۰۰	۱۰۰۰۰
بزرگراه‌ها	۲۰۰۰	۱۰۰۰۰
راه‌آهن	۲۵۰	-
فرودگاه‌ها	۲۵۰۰	-
رودخانه‌ها و آبراهه	۵۰۰	-

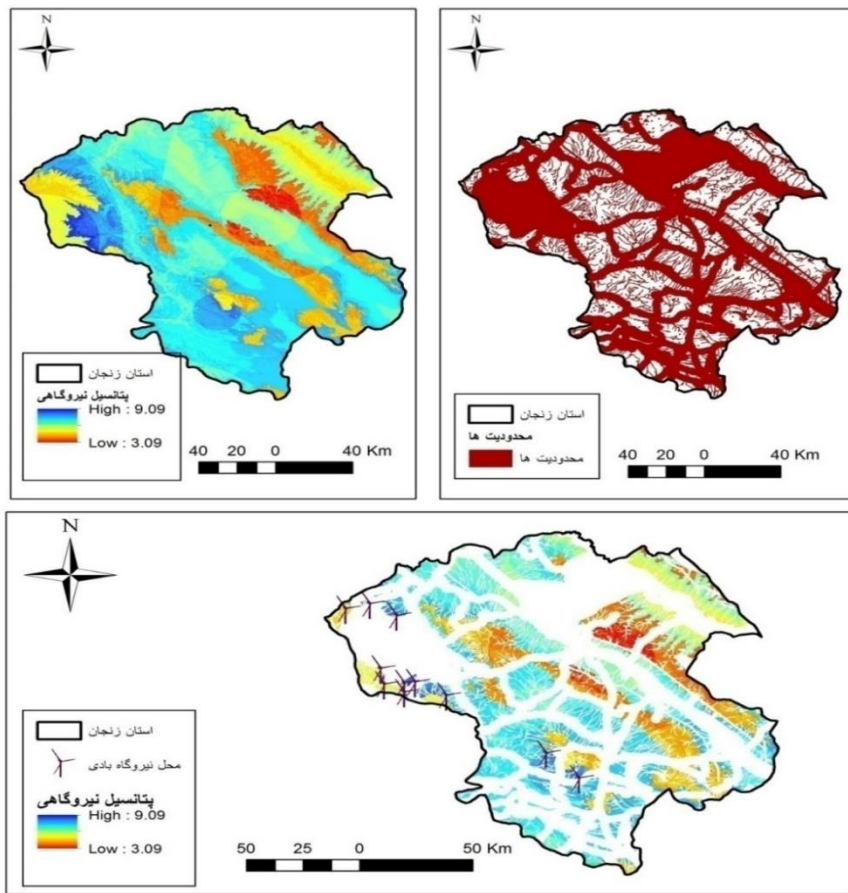
معیار مورد مطالعه	حداقل فاصله (m)	حداکثر فاصله (m)
مناطق حفاظت شده	۲۰۰۰	-
گسل‌ها	۱۰۰۰	-
سدها	۱۰۰۰	-
معادن فعال	۵۰۰	-
خطوط انتقال نیرو	۲۵۰	۱۰۰۰۰

جدول ۲. حداقل سرعت باد و حداکثر ارتفاع و شیب مجاز

حداقل سرعت باد مطابق با استاندارد IEC	
6 m/s	حداکثر شیب مجاز
۱۰٪	حداکثر ارتفاع مجاز
۲۰۰۰ متر	

پس از تهیه تمام لایه‌های اطلاعاتی و تعیین عوامل مؤثر در مکان‌یابی احداث نیروگاه بادی و نقش آن‌ها در مکان‌یابی و با انجام مدل‌سازی و تجزیه و تحلیل داده‌های فضایی به کمک GIS به تهیه نقشه عوامل مؤثر در مکان‌یابی مزارع بادی بر اساس فرآیند تحلیل شبکه‌ای ANP پرداخته شد. برای وزن‌دهی به معیارهای مکان‌یابی پرسشنامه‌ای تهیه شد که این پرسشنامه بر اساس جدول مقیاس‌های ۱-۹، ساعتی<sup>۱</sup> صاحب‌نظر این عرصه است که باید به هر سؤال امتیازی بین اعداد ۱ تا ۹ داده شود. پرسشنامه توسط متخصص و کارشناس حوزه انرژی‌های نو و تجدیدپذیر پاسخ داده شد و وزن مقایسات زوجی مرحله قبل با استفاده از نرم‌افزار super decision به دست آمد که به شرح جدول ۳ است. در گام بعد وزن‌های به دست آمده از دو مدل یادشده در محیط GIS در هریک از لایه‌ها ضرب شد و همراه با آن تلفیق لایه‌ها با استفاده از روی هم‌اندازی موزون صورت گرفت [۱۸]. از قابلیت‌های سیستم اطلاعات جغرافیایی برای تلفیق و هم‌پوشانی لایه‌ها استفاده شد؛ در نهایت نقشه مکان‌های مناسب برای احداث نیروگاه بادی که در شکل ۲، قابل مشاهده است، به دست می‌آید. ضریب ناسازگاری<sup>۲</sup> مقایسات زوجی معادل ۰/۰۱ محاسبه شده است.

1. Satty  
2.



شکل ۲. نقشه نهایی مناطق مناسب برای احداث نیروگاه بادی بر اساس معیارهای موردنظر

جدول ۳. وزن مقایسات زوجی معیارهای مکان‌یابی توربین بادی

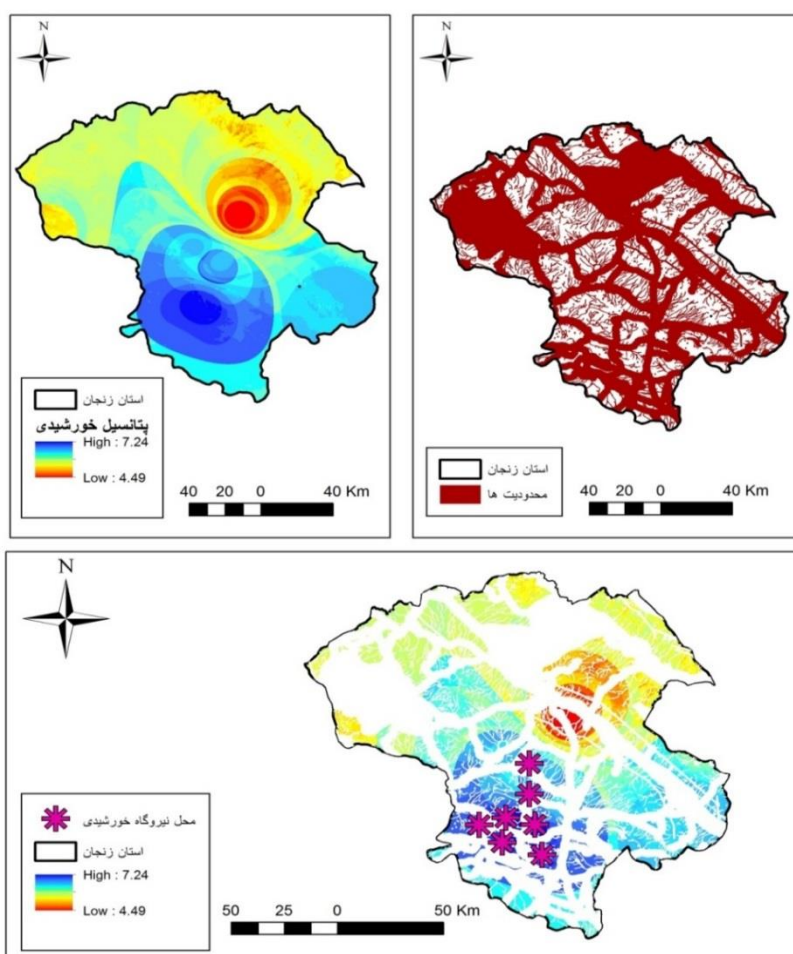
وزن نهایی	سرعت باد	درصد شیب منطقه	ارتفاع از سطح دریا	
۰/۳۸	۰/۲	۰/۳۳	۰	ارتفاع از سطح دریا
۰/۱۱	۰/۸	۰	۰/۱۷	درصد شیب منطقه
۰/۵۱	۰	۰/۶۷	۰/۸۳	سرعت باد

معیارهای مؤثر در جایابی بهینه نیروگاه‌های خورشیدی: مهم‌ترین معیارهای تعیین پهنه‌های مناسب برای استقرار نیروگاه‌های بادی عبارت‌اند از: دما، شدت تابش، ساعات آفتابی و ابرناکی [۲۳، ۲۸، ۲۹]. وزن مقایسات زوجی معیارهای مکان‌یابی نیروگاه خورشیدی با استفاده از روش ANP و مشابه روش به‌کاربرده شده برای نیروگاه بادی به‌دست می‌آید که در جدول ۴، آورده شده است. ضریب ناسازگاری مقایسات زوجی معادل ۰/۰۷ محاسبه شده است.

جدول ۴. وزن مقایسات زوجی معیارهای مکان‌یابی نیروگاه خورشیدی

ابرناسی	دما	ساعات آفتابی	شدت تابش	وزن نهایی
۰	۰/۵۸	۰/۲۵	۰/۵۲	۰/۲
۰/۵۹	۰	۰/۵۹	۰/۳۶	۰/۵۶
۰/۱۶	۰/۱۴	۰	۰/۱۲	۰/۱۳
۰/۲۵	۰/۳۳	۰/۱۶	۰	۰/۱۱

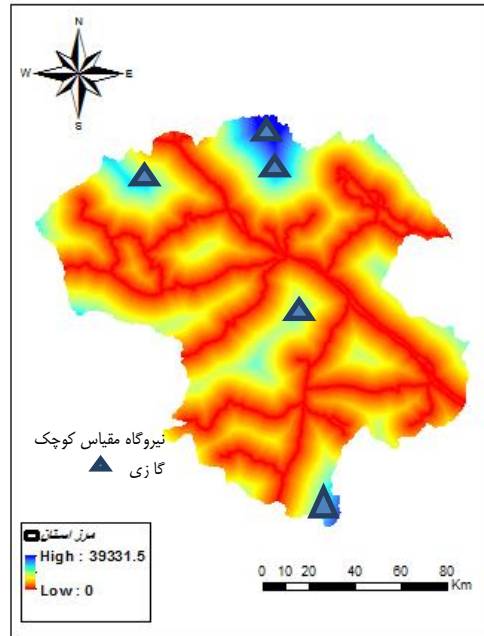
نتیجه حاصل‌شده نقشه مناطق دارای ظرفیت استان است که در آن، مناطق به پهنه‌هایی با ظرفیت‌های متفاوت برای بهره‌برداری از انرژی خورشید و احداث نیروگاه‌های خورشیدی تفکیک شده‌اند. نقشه‌ی مربوطه در شکل ۳، آورده شده است.



شکل ۳. نقشه‌ی نهایی مناطق مناسب برای احداث نیروگاه خورشیدی بر اساس معیارهای موردنظر



**عوامل مؤثر در جاییابی بهینه نیروگاه‌های کوچک‌مقیاس گازی:** در مکان‌یابی نیروگاه‌های کوچک‌مقیاس گازی، معیار مهمی که باید در نظر گرفته شود، نزدیکی به خطوط انتقال گاز است. سایر عوامل از جمله معیارهای زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی، لرزه‌خیزی و محیط‌زیست و غیره که بر مکان‌یابی مؤثر است، به‌عنوان لایه محدودیت در نظر گرفته می‌شود [۲۵]. از این رو نقشه خروجی نقاط بالقوه برای احداث نیروگاه‌های کوچک‌مقیاس گازی در شکل ۴، آورده شده است.



شکل ۴. نقشه‌ی نهایی مناطق مناسب برای احداث نیروگاه کوچک‌مقیاس گازی بر اساس معیارهای موردنظر

##### ۵. نتیجه‌گیری و پیشنهادها

**داده‌های عددی.** در این بخش به تعیین ورودی‌های مسئله طراحی زنجیره تأمین شبکه توزیع برق با در نظر گرفتن نیروگاه‌های خورشیدی و بادی و کوچک‌مقیاس گازی پرداخته شده است. در ابتدا با توجه به اینکه مدل ارائه‌شده در فصل قبل، مدلی با سه نوع نیروگاه تأمین‌کننده انرژی است، باید تعداد نیروگاه‌ها و نوع آن‌ها را مشخص کرد. سه نوع نیروگاه تولید انرژی برق با ظرفیت مشخص در این مدل در نظر گرفته شده است که ۷ نیروگاه خورشیدی و ۱۰ نیروگاه بادی و ۵ نیروگاه کوچک‌مقیاس گازی به‌عنوان نقاط بالقوه با استفاده از مکان‌یابی با استفاده از GIS و تکنیک ANP به‌دست آمده است. در تعریف شرکت‌های تولیدکننده انرژی با توجه به آمار جمع‌آوری‌شده در استان، ۱۰ شرکت در نظر گرفته شده است که دارای امکانات و تجهیزات احداث نیروگاه هستند و انرژی برق خورشیدی و بادی و کوچک‌مقیاس گازی را تولید می‌کنند.

در تعریف نقاط تأمین نیز ۴ نقطه وجود دارد که برق تولیدشده توسط شرکت‌های تولیدی را با قیمت مشخص شده خریداری کرده و به مصرف‌کننده منتقل می‌کنند. در نهایت تعداد نقاط مصرف‌کننده به ۶ دسته تقسیم شده است که عبارت‌اند از: مصرف‌کننده بخش خانگی؛ کشاورزی؛ عمومی؛ صنعتی؛ تجاری؛ روشنایی و معابر. آمار میزان مصرف‌کننده‌های هر بخش از شرکت نیروی برق استان زنجان جمع‌آوری شده است.

میزان تقاضای هر یک از مصرف‌کننده‌ها نیز یکی از پارامترهای مسئله است که میزان درصد افزایش مصرف سالانه برق در هر گروه مصرف‌کننده با توجه به آمار و اطلاعات شرکت برق جمع‌آوری و برای دوره پنج‌ساله محاسبه شده است و فرض شده که این میزان رشد مصرف انرژی در شبکه‌های توزیع و انتقال برآورده شود. مقادیر پارامترهای مدل ریاضی در جدول‌های ۵ تا ۱۱، آورده شده است.

جدول ۵. میزان تقاضای هر مصرف‌کننده

مصرف‌کننده	تقاضا (کیلووات‌ساعت)
مصارف خانگی	۲۰۶۷۹۲۰۴
مصارف عمومی	۸۶۵۸۷۸
مصارف تولید (آب و کشاورزی)	۳۱۵۷۹۰۸۰
مصارف صنعتی	۹۰۳۲۲۹۶۰
تجاری	۱۹۸۶۴۲۶
روشنایی معابر	۶۱۱۲۰۸

جدول ۶. تعرفه خرید برق تولیدی از نیروگاه‌های خورشیدی، بادی و کوچک‌مقیاس گازی

نوع نیروگاه	نرخ پایه خرید تضمینی برق (ریال بر کیلووات‌ساعت)
خورشیدی	۷۴۸۸
بادی	۶۲۰۰
کوچک‌مقیاس گازی	۱۲۰۰

جدول ۷. تعرفه فروش برق

مصرف‌کننده	قیمت پایه هر کیلووات‌ساعت (ریال)
مصارف خانگی	۱۲۲۴
مصارف عمومی	۲۱۳۷۴
مصارف تولید (آب و کشاورزی)	۱۹۵۹۳
مصارف صنعتی	۳۲۰۶۰
تجاری	۴۴۵۲۹
روشنایی معابر	۵۳۴۳۵

جدول ۸. هزینه‌های انتقال

هزینه	هر کیلووات ساعت (ریال)
هزینه انتقال برق از تولیدکننده به تأمین‌کننده	۷۴۸
هزینه انتقال برق از تأمین‌کننده به مصرف‌کننده	۶۲۰

یکی دیگر از پارامترهای مدل، ظرفیت نیروگاه است که در این مدل سه سطح ظرفیت برای نیروگاه بادی و خورشیدی و دو سطح ظرفیت برای نیروگاه کوچک مقیاس گازی در نظر گرفته شده است. یادآوری این نکته لازم است که مساحت موردنیاز برای احداث یک نیروگاه یک‌مگاواتی ۱/۵ هکتار است.

جدول ۹. ظرفیت نیروگاه‌ها

پارامتر	کیلووات
cap(i)	۱۰۰۰,۲۰۰۰,۵۰۰۰
cap(j)	۱۰۰۰,۲۰۰۰,۵۰۰۰
cap(l)	۱۰۰۰,۲۰۰۰

پارامترهای دیگر مسئله نرخ کربن<sup>۱</sup> و ضریب شدت آلاینده‌گی دی‌اکسید کربن است که در جدول ۱۰، مشاهده می‌شود [۱۷، ۱۴].

جدول ۱۰. پارامترهای مدل

پارامتر	مقدار
نرخ کربن	۳۶۸ (g /kwh)
ضریب شدت آلاینده‌گی	۶۲۳ (g /kwh)

شرکت‌های تأمین‌کننده نیز هر کدام ظرفیت مشخصی برای احداث نیروگاه دارند که در جدول ۱۱، نشان داده شده است.

جدول ۱۱. ظرفیت شرکت‌های تولیدکننده

نوع نیروگاه	ظرفیت شرکت بر حسب مگاوات-ساعت در سال	شرکت دارای پروانه احداث نیروگاه
خورشیدی	۴۳۸۰	۱
خورشیدی	۲۱۹۰۰۰	۲
خورشیدی	۱۳۱۴۰۰	۳
خورشیدی	۲۱۹۰۰۰	۴

خورشیدی	۸۷۶۰	۵
خورشیدی	۲۶۲۸۰	۶
بادی	۴۳۸۰۰	۷
بادی	۱۰۹۵۰۰	۸
کوچک‌مقیاس‌گازی	۴۳۸۰۰	۹
کوچک‌مقیاس‌گازی	۱۰۹۵۰۰	۱۰

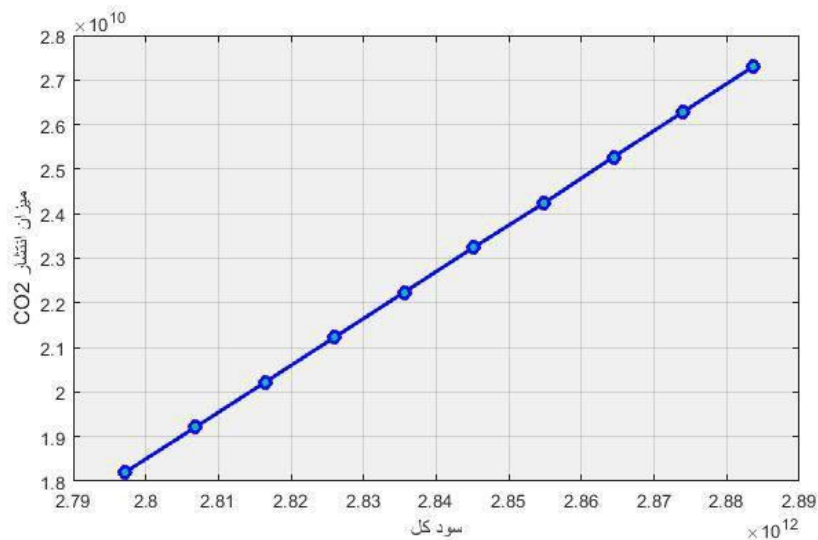
پس از مکان‌یابی نیروگاه‌ها و به‌دست‌آوردن نقاط نامزد برای احداث و همچنین با بهره‌گیری از آمار ارائه‌شده توسط «سازمان انرژی‌های نو و تجدیدپذیر»، «وزارت نیرو» و «شرکت برق منطقه‌ای زنجان» و داده‌های جمع‌آوری‌شده از این سازمان‌ها، پارامترهای به‌کاررفته در مدل به‌دست آورده شده و سپس مدل ریاضی دوهدفه ارائه‌شده در بخش ۳ با روش محدودیت افسیلون و با استفاده از نرم‌افزار گمز حل شده است. ابتدا مدل به‌صورت تک‌هدفه با تابع هدف انتشار آلاینده حل می‌شود. بهترین و بدترین مقادیر به‌ترتیب  $1/8 e+10$  و  $2/72 e+10$  است. مقادیر متغیرهای تصمیم با استفاده از نرم‌افزار گمز محاسبه شده و در جدول ۱۲، آورده شده است. با در نظر گرفتن ۱۰ مقدار برای افسیلون و حل مدل به‌ازای این مقادیر نتایج جدول ۱۳، حاصل می‌شود. نتایج حاصل از روش محدودیت افسیلون به شکل نمودار پارتو در شکل ۵، نشان داده‌شده است، همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود با افزایش تابع هدف اول (سود)، تابع هدف دوم (انتشار آلاینده) نیز افزایش می‌یابد.

جدول ۱۲. مقادیر متغیرهای تصمیم

مقادیر متغیر	متغیر تصمیم
$x_{8,6}^3, x_{7,6}^3 = 1$	$x_{i,g}^m$
$x_{10,10}^3 = 1$	$x_{i,g}^{m'}$
$x_{1,10}^1, x_{2,10}^1, x_{3,10}^1, x_{4,10}^1, x_{5,10}^1 = 1$	$x_{i,g}^{m''}$
$p_6^7 = 5/84179E+7$	$p_g^i$
$p_{10}^{10} = 2/92.89E+7$	$p_g^j$
$p_{10}^1 = 2/92.89E+7$	$p_g^i$
$p_{6 \rightarrow 7}^1 = 5/84179E+7$	$p_{g \rightarrow s}^i$
$p_{10 \rightarrow 10}^1 = 5/84179E+7$	$p_{g \rightarrow s}^j$
$p_{10 \rightarrow 1}^1 = 2/92.89E+7$	$p_{g \rightarrow s}^i$
$p_{1 \rightarrow 1} = 2/0.6792E+7, p_{1 \rightarrow 2} = 865878, p_{1 \rightarrow 3} = 2/1579 E+7, p_{1 \rightarrow 4} = 9/0.32296E+7, p_{1 \rightarrow 5} = 1986426, p_{1 \rightarrow 6} = 6112.8$	$p_{s \rightarrow k}$

جدول ۱۳. نتایج مدل دوهدفه شبکه زنجیره تأمین برقی

تابع هدف انتشار آلاینده	تابع هدف سود کل	ε
۱/۸۱۹۷e+۱۰	۲/۷۹۷۱e+۱۲	۱۸۱۹۷۲۱۰۰۰۰
۱/۹۲۰۸e+۱۰	۲/۸۰۶۷۹e+۱۲	۱۹۲۰۸۱۶۰۰۰۰
۲/۰۲۱۹e+۱۰	۲/۸۱۶۴e+۱۲	۲۰۲۱۹۱۱۰۰۰۰
۲/۱۲۳۰e+۱۰	۲/۸۲۶۰e+۱۲	۲۱۲۳۰۰۶۰۰۰۰
۲/۲۲۴۱e+۱۰	۲/۸۳۵۶e+۱۲	۲۲۲۴۱۰۱۰۰۰۰
۲/۳۲۵۲e+۱۰	۲/۸۴۵۲e+۱۲	۲۳۲۵۱۹۶۰۰۰۰
۲/۴۲۶۳e+۱۰	۲/۸۵۴۸e+۱۲	۲۴۲۶۲۹۰۰۰۰
۲/۵۲۷۴e+۱۰	۲/۸۶۴۴e+۱۲	۲۵۲۷۳۸۶۰۰۰۰
۲/۶۲۸۵e+۱۰	۲/۸۷۴۰e+۱۲	۲۶۲۸۴۸۱۰۰۰۰
۲/۷۲۹۶e+۱۰	۲/۸۸۳۶e+۱۲	۲۷۲۹۵۷۶۰۰۰۰



شکل ۵. نمودار پارتو

با فرض اینکه نقطه متناظر با  $\epsilon = 23251960000$  نقطه مرجح برای تصمیم‌گیران است، نتایج بررسی می‌شوند. در این نقطه مقدار کل سود برابر  $2/8452e+10^{12}$  میلیون ریال و مقدار کل انتشار آلاینده  $2/3252e+10^{10}$  گرم است. طبق نتایج نهایی شهرستان‌های خدابنده، ایجرود و ماهنشان برای احداث نیروگاه بادی، خدابنده و ایجرود برای احداث نیروگاه خورشیدی و بخش‌هایی از شهرستان زنجان برای احداث نیروگاه کوچک‌مقیاس گازی مناسب هستند که ۷ نقطه بالقوه برای نیروگاه خورشیدی و ۱۰ نقطه برای نیروگاه بادی و ۵ نقطه بالقوه برای احداث نیروگاه کوچک‌مقیاس گازی به‌دست آمد که با حل مدل دوهدفه دو نیروگاه بادی، دو نیروگاه خورشیدی و دو نیروگاه کوچک‌مقیاس گازی باید از میان نقاط بالقوه احداث شوند. در شکل ۶،

مشخص شده است که در هر مکان چه نوع نیروگاه و با چه ظرفیتی باید احداث شود تا دو هدف حداکثر کردن سود و حداکثر انتشار آلاینده تحقق یابد که این نقاط، نتایج نهایی مکان‌یابی نیروگاه‌های خورشیدی، بادی و کوچک‌مقیاس گازی با GIS و حل مدل دوهدفه زنجیره تأمین شبکه توزیع برق بوده و خروجی نهایی مدل GIS است (مقادیر سطوح ظرفیت مشخص شده در شکل ۶ در جدول ۹، ارائه شده است).



**تحلیل حساسیت مدل.** در این بخش تغییرات مدل با افزایش مقدار سه پارامتر قیمت فروش، تقاضا و هزینه‌های انتقال تحلیل شده است که نتایج این بررسی در شکل‌های ۷، ۸ و ۹، مشاهده می‌شود. برای بررسی اثر پارامترهای هزینه‌ای و قیمت خرید بر سود کل، پارامترهای مربوط به هر دسته از هزینه‌ها و قیمت‌ها با کاهش ۱۰ درصدی و افزایش ۱۰،۲۰ و ۳۰ درصدی محاسبه شده و مدل به‌ازای هر یک حل شد. با توجه به شکل‌های ۷ و ۸، افزایش در پارامترهای هر دسته از قیمت‌ها و هزینه‌های انتقال موجب کاهش در سود کل می‌شود که امری طبیعی بوده و نشان‌دهنده عملکرد درست مدل است. با توجه به نتایج تحلیل حساسیت و نمودار شکل ۹، افزایش تقاضا باعث افزایش سود می‌شود. نتایج تحلیل حساسیت در جدول‌های ۱۴ تا ۱۸ آورده شده است.

جدول ۱۴. نتایج تحلیل حساسیت تغییرات قیمت برق تولیدشده توسط نیروگاه خورشیدی

سود کل (ریال)	درصد تغییرات قیمت برق خورشیدی
۲۹۳۰۰۰۰۰۰۰۰	٪-۱۰
۲۹۵۲۳۰۰۰۰۰۰	٪-۲۰
۲۹۹۶۱۰۰۰۰۰۰۰	٪-۳۰
۳۰۳۹۰۰۰۰۰۰۰۰	٪-۴۰
۲۸۷۱۹۰۰۰۰۰۰۰	۱۰٪
۲۸۱۸۰۰۰۰۰۰۰۰	۲۰٪
۲۷۸۰۰۰۰۰۰۰۰۰	۳۰٪
۲۷۵۲۴۰۰۰۰۰۰۰	۴۰٪

جدول ۱۵. نتایج تحلیل حساسیت قیمت برق تولیدشده توسط نیروگاه بادی

سود کل (ریال)	درصد تغییرات قیمت برق بادی
۲۹۴۰۹۰۰۰۰۰۰۰	٪-۱۰
۲۸۹۵۹۰۰۰۰۰۰۰	٪-۲۰
۲۹۳۹۶۰۰۰۰۰۰۰	٪-۳۰
۲۹۸۳۴۰۰۰۰۰۰۰	٪-۴۰
۲۸۴۷۴۰۰۰۰۰۰۰	۱۰٪
۲۷۴۸۲۰۰۰۰۰۰۰	۲۰٪
۲۷۱۰۰۰۰۰۰۰۰۰	۳۰٪
۲۶۷۷۱۰۰۰۰۰۰۰	۴۰٪

جدول ۱۶. نتایج تحلیل حساسیت قیمت برق تولیدشده توسط نیروگاه کوچک مقیاس گازی

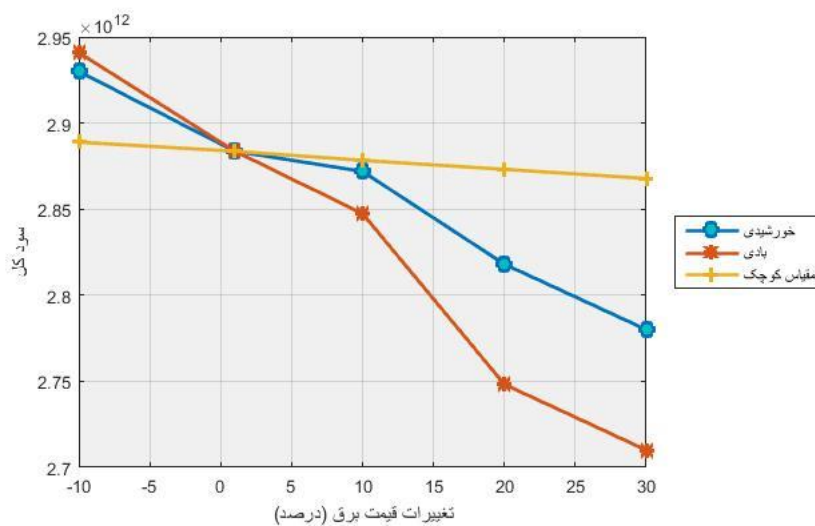
سود کل (ریال)	درصد تغییرات قیمت برق کوچک مقیاس گازی
۲۸۸۸۹۰۰۰۰۰۰۰	٪-۱۰
۲۸۹۴۱۰۰۰۰۰۰۰	٪-۲۰
۲۸۹۹۴۰۰۰۰۰۰۰	٪-۳۰
۲۹۰۴۶۰۰۰۰۰۰۰	٪-۴۰
۲۸۷۸۳۰۰۰۰۰۰۰	۱۰٪
۲۸۷۳۱۰۰۰۰۰۰۰	۲۰٪
۲۸۶۷۸۰۰۰۰۰۰۰	۳۰٪
۲۸۲۲۶۰۰۰۰۰۰۰	۴۰٪

جدول ۱۷. نتایج تحلیل حساسیت تغییرات قیمت فروش برق

سود کل (ریال)	درصد تغییرات قیمت فروش برق
۳۲۵۵۳۰۰۰۰۰۰۰	۱۰٪
۳۶۴۰۵۰۰۰۰۰۰۰	۲۰٪
۴۰۰۸۵۰۰۰۰۰۰۰	۳۰٪

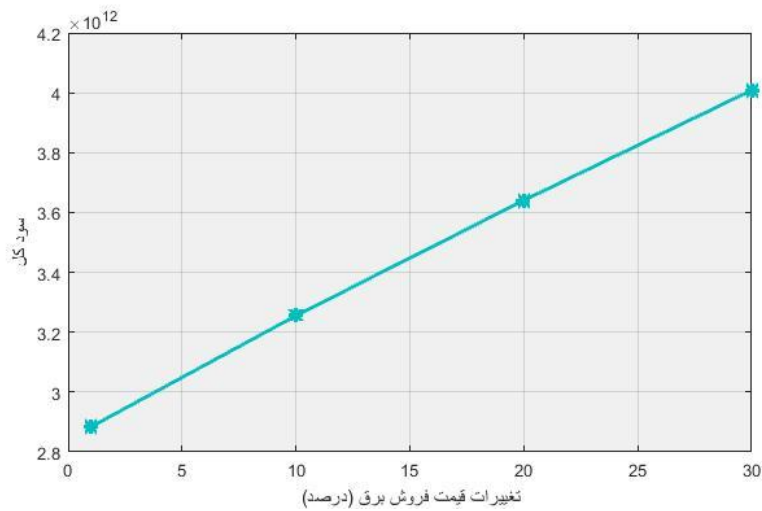
جدول ۱۸. نتایج تحلیل حساسیت تغییرات تقاضا

سود کل (ریال)	درصد تغییرات تقاضا
۳۱۶۷۱۰۰۰۰۰۰۰	۱۰٪
۳۴۲۹۵۰۰۰۰۰۰۰	۲۰٪
۳۶۹۱۹۰۰۰۰۰۰۰	۳۰٪

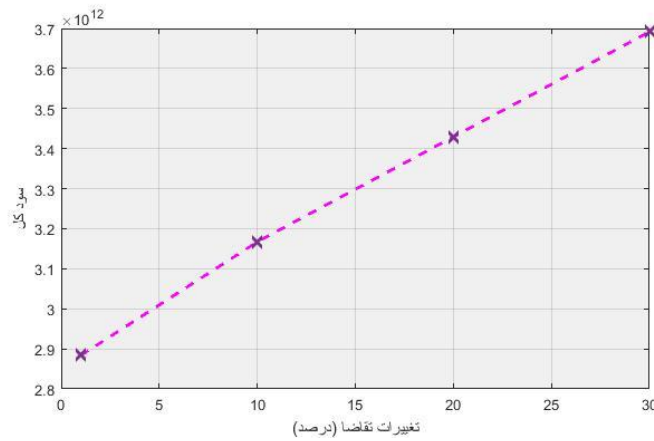


شکل ۷. تأثیر تغییر در پارامترهای قیمت خرید برق بر سود کل





شکل ۸. نمودار میزان تغییرات سود به‌ازای تغییرات در قیمت فروش برق



شکل ۹. نمودار میزان تغییرات سود به‌ازای تغییرات در تقاضا

## ۵. نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در این پژوهش به مکان‌یابی مناطق بالقوه برای احداث نیروگاه‌های خورشیدی و تولید پراکنده در استان زنجان پرداخته شده است. به‌منظور مکان‌یابی نیروگاه‌ها در استان زنجان از آمار ماهانه و سالانه پارامترهای اقلیمی از ایستگاه‌های سینوپتیک و کلیماتولوژی منطقه و ایستگاه‌های مجاور به تعداد ۷ ایستگاه در دوره آماری ۲۰ ساله استفاده شده است؛ همچنین مدل دوهدفه اقتصادی - زیست‌محیطی زنجیره تأمین شبکه توزیع برق با در نظر گرفتن نقاط مکان‌یابی شده به‌عنوان نقاط

تولیدکننده توان و با هدف حداکثرکردن سود تأمین‌کننده و حداقل کردن انتشار آلاینده حل شده است. طبق نتایج، مناطقی از شهرهای خدابنده، ایجرود و ماهنشان برای احداث نیروگاه بادی و مناطقی از خدابنده و ایجرود برای احداث نیروگاه خورشیدی و خدابنده، زنجان و ماهنشان برای احداث نیروگاه مقیاس کوچک گازی مناسب هستند. که با در نظر گرفتن نقاط به دست آمده از مکان‌یابی به عنوان محل احداث نیروگاه‌ها در مدل زنجیره تأمین شبکه توزیع برق و حل مدل دوهدفه مناطقی که از نظر اقتصادی - زیست‌محیطی برای احداث نیروگاه مناسب است به دست آمده است.

- برای توسعه این پژوهش در پژوهش‌های آتی موارد زیر پیشنهاد می‌شود: ۱. در نظر گرفتن ملاحظات اجتماعی در کنار توابع هدف اقتصادی و زیست‌محیطی و ارائه مدل زنجیره تأمین پایدار؛ ۲. وارد کردن عدم قطعیت در پارامترهایی چون میزان تقاضا و قیمت خرید تضمینی برق خورشیدی و بادی؛ ۳. در نظر گرفتن مباحث واردات تجهیزات احداث نیروگاه و یا به عبارتی مفاهیم مربوط به لجستیک؛ ۴. بیان مباحث فصلی بودن تقاضا و تغییر تقاضا برای انرژی الکتریکی در فصول مختلف و مباحث مربوط به انتقال برق مازاد به استان‌های دیگر در دوره‌های زمانی مختلف؛ ۵. متغیر در نظر گرفتن ظرفیت مراکز تولیدی و تصمیم‌گیری در خصوص سطوح ظرفیت برای هر یک از مراکز تولیدی و توزیعی.

## منابع

1. Al Garni, H. Z., & Awasthi, A. (2017). Solar PV power plant site selection using a GIS-AHP based approach with application in Saudi Arabia. *Applied Energy*, 206, 1225-1240.
2. Al Garni, H. Z., & Awasthi, A. (2020). A Monte Carlo approach applied to sensitivity analysis of criteria impacts on solar PV site selection. In *Handbook of Probabilistic Models* (pp. 489-504). Butterworth-Heinemann.
3. Ali, S., Taweekun, J., Techato, K., Waewsak, J., & Gyawali, S. (2019). GIS based site suitability assessment for wind and solar farms in Songkhla. *Thailand. Renewable Energy*, 132, 1360-1372.
4. Aly, A., Jensen, S. S., & Pedersen, A. B. (2017). Solar power potential of Tanzania: Identifying CSP and PV hot spots through a GIS multicriteria decision making analysis. *Renewable Energy*, 113, 159-175.
5. Asakereh, A., Soleymani, M., & Sheikhdavoodi, M. J. (2017). A GIS-based Fuzzy-AHP method for the evaluation of solar farms locations: Case study in Khuzestan province, Iran. *Solar Energy*, 155, 342-353.
6. Borges, C. L. T., & Martins, V. F. (2012). Multistage expansion planning for active distribution networks under demand and distributed generation uncertainties. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 36(1), 107-116.
7. Chen, M. J., Hsu, Y. F., & Wu, Y. C. (2014). Modified penalty function method for optimal social welfare of electric power supply chain with transmission constraints. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 57, 90-96.
8. Devine-Wright, P. (2005). Beyond NIMBYism: towards an integrated framework for understanding public perceptions of wind energy. *Wind Energy: An International Journal for Progress and Applications in Wind Power Conversion Technology*, 8(2), 125-139 *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 11(3), 171-190.
9. Díaz-Cuevas, P., Camarillo-Naranjo, J. M., & Pérez-Alcántara, J. P. (2018). Relational spatial database and multi-criteria decision methods for selecting optimum locations for photovoltaic power plants in the province of Seville (southern Spain). *Clean Technologies and Environmental Policy*, 20(8), 1889-1902.
10. Díaz-Cuevas, P. (2018). GIS-Based Methodology for Evaluating the Wind-Energy Potential of Territories: A Case Study from Andalusia (Spain). *Energies*, 11(10), 2789.
11. Fazeli, F., & Seidi, M. (2018). in Different Levels and Solving by  $\epsilon$ -Constraint Approach. *Journal of Industrial Management Perspective*, 8(3), 167-194 (In Persian).
12. Ganguly, S., Sahoo, N. C., & Das, D. (2013). Multi-objective planning of electrical distribution systems using dynamic programming. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 46, 65-78.
13. Gorji, M., Khoshnod, S., Omrani, H., & Hashemi, M. (2017). Site selection suitable areas for solar power plants under the influence of climatic factors using FAHP method (Case study: Fars province). *Journal of RS and GIS for Natural Resources*, 8(1), 66-85 (In Persian).
14. Hamida, I. B., Salah, S. B., Msahli, F., & Mimouni, M. F. (2018). Optimal network reconfiguration and renewable DG integration considering time sequence variation in load and DGs. *Renewable Energy*, 121, 66-80.

15. Jalali, M., Zare, K., & Hagh, M. T. (2014). A multi-stage MINLP-based model for sub-transmission system expansion planning considering the placement of DG units. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 63, 8-16.
16. Janke, J. R. (2010). Multicriteria GIS modeling of wind and solar farms in Colorado. *Renewable Energy*, 35(10), 2228-2234.
17. Mascha, M., Harden, J. W., & Trebby, J. (2009). Trading in CO2 Credits: Tax Issues to Consider.
18. Mohaghar, A., Ariaee, S. (2017). Locating using Geographical Information System and Weighted Maximal Covering Model. *Journal of Industrial Management Perspective*, 7(2), 9-32 (In Persian).
19. Mortazavi, S., & Seif Barghy, M. (2018). Two-Objective Modeling of Location-Allocation Problem in a Green Supply Chain Considering Transportation System and CO2 Emission. *Journal of Industrial Management Perspective*, 8(1), 163-185 (In Persian).
20. Nagurney, A., Liu, Z., & Woolley, T. (2006). Optimal endogenous carbon taxes for electric power supply chains with power plants. *Mathematical and computer modelling*, 44(9-10), 899-916.
21. Nasehi, S., Noori, G., & Faryadi, Sh. (2017). Locate solar power plant with fuzzy logic and AHP (Case study Hormozgan Province). *The Journal of new technologies in energy systems*, 3(1), 1-9 (In Persian).
22. Nazari, M. S., & Haghifam, M. R. (2009). Multiobjective electric distribution system expansion planning using hybrid energy hub concept. *Electric Power Systems Research*, 79(6), 899-911.
23. Rahimi, M., Pazand, F., & Abdollahi, A. (2017). Feasibility Study of Establishing Solar Power Plants Using AHP Model and Fuzzy Logic in Sistan and Baluchistan Province. *Geography and Development Iranian Journal*, 15(49), 23-36 (In Persian).
24. Ranaei, M., Mobarraqi dinan, N., & Keshtkar, M. (2016). Location of wind power plant in Qazvin province using geographic information system and AHP method and its integration with fuzzy logic, Second International Congress on Earth, Space and Clean Energy (In Persian).
25. Safari, F., noraisefat, I. (2017). Gas power plant site selection using fuzzy model and Boolean Logic in GIS. *Human & Environment* (In Persian).
26. Safarian Zengir, V., & Zeynali, B. (2018). Potentiometric environmental, renewable wind energy, Ardabil Province for the establishment of wind turbine 2.5 MW Samen (AV 928) using software ArcGIS. *Journal of Human and Environment*, 16(3), 21-36 (In Persian).
27. Sahebi, H., Mahjoub, N., & Teymouri, A. (2019). Mathematical Modelling of Second and Third Generations of Biomass Networks Considering Water-Energy Nexus. *Quarterly Journal of Energy Policy and Planning Research*, 5(15), 7-39. (In Persian)
28. Taghvaei, M., Saboohi, E. (2017). Expansion and location of solar power plants in Isfahan. *Journal of Research and Urban Planning*, 8(28), 61-82 (In Persian).
29. Taleai, M., Safarpour, M., & Javadi, G. (2019). Potential Evaluation for Establishment of Solar Power Plants Using Multi-Criteria Decision Making Methods: OWA and TOPSIS (case study: Qazvin-Iran). *The Journal of Spatial Planning*; 22(4), 1-27 (In Persian).

30. Uyan, M. (2017). Optimal site selection for solar power plants using multi-criteria evaluation: a case study from the Ayranci region in Karaman, Turkey. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 19(9), 2231-2244.
31. Wu, K., Nagurney, A., Liu, Z., & Stranlund, J. K. (2006). Modeling generator power plant portfolios and pollution taxes in electric power supply chain networks: A transportation network equilibrium transformation.
32. Yasin, Z. M., & Rahman, T. K. A. (2006, November). Influence of distributed generation on distribution network performance during network reconfiguration for service restoration. In *Power and Energy Conference, 2006. PECon'06. IEEE International* (pp. 566-570). IEEE.