نشریه علمی مهندسی فناوری اطلاعات مکانی

سال نهم، شماره نخست، بهار ۱۴۰۰

Vol.9, No.1, Spring 2021

۱۰۴ -۸۵

مقاله پژوهشی

DOR: 20.1001.1.20089635.1400.9.1.3.0

مکان‌یابی و تخصیص نیروگاه های بادی در شبکه فشار متوسط برق با لحاظ کردن فاکتورهای محیطی، اقتصادی و فنی

مینا صادقی[۱*]، محمد کریمی[۲]

۱- کارشناس ارشد سیستم‌های اطلاعات مکانی (GIS) - دانشکده مهندسی نقشه‌برداری - دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

۲- دانشیارگروه سیستم‌های اطلاعات مکانی - دانشکده مهندسی نقشه‌برداری - دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۸/۰۲/۰۷ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۰۹/۱۹

چکیده

افزایش تقاضای برق و به دنبال آن تهی شدن منابع سنتی تولید برق و همچنین تأثیرات مخرب استفاده از سوخت‌های فسیلی بر محیط‌زیست، موجب پدید آمدن ضرورت استفاده از انرژی‌های تجدید پذیر برای تولید برق شده است. ایران دارای پتانسیل بالا برای بهره‌برداری از انرژی بادی است. به منظور بهره‌برداری از این پتانسیل، نیاز به مکان‌یابی صحیح محل نصب نیروگاه‌های بادی است. هدف از انجام این تحقیق، ارائه یک روش جهت تعیین مکان‌های مناسب برای احداث نیروگاه بادی با استفاده از تحلیل‌های مکانی، انتخاب بهترین مکان‌ها با استفاده از الگوریتم ژنتیک و تخصیص آن‌ها در شبکه فشار متوسط برق است. در گام اول تحقیق، اهداف و فاکتورهای مؤثر شناسایی و با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی، وزن دهی شده و مجموعه نقشه‌های فاکتور در سیستم اطلاعات مکانی ترکیب و مناطق مناسب برای احداث مزرعه بادی تعیین شدند. در گام دوم، به منظور کاهش گزینه‌های مستعد، با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک و تعریف اهداف کاهش تلفات خط، افزایش تناسب محیطی و افزایش میزان بار قابل تأمین توسط پست برق مربوطه، فرآیند تخصیص در شبکه فشار متوسط برق انجام گرفت. این تحقیق در استان قزوین پیاده‌سازی شد و پس از انجام فرآیند مکان‌یابی، ۳۰ گزینه تعیین و سپس فرآیند تخصیص در ۱۳ سناریو انجام شد. در هر یک از سناریوهای فوق، مکان احداث مجموعه نیروگاه‌های بادی مورد نیاز در شبکه فشار متوسط برق تعیین و تخصیص آن به بهترین پست‌های برق تعریف شد. خروجی‌ها نشان می‌دهند که مناطق شمال غربی استان قزوین دارای پتانسیل برای ساخت مزرعه بادی است.

کلید واژه‌ها : نیروگاه بادی، روش وزن‌دهی، سیستم اطلاعات مکانی، مکان‌یابی، ژنتیک.

* نویسنده مکاتبه کننده: تهران، خیابان ولیعصر، بالاتر از میدان ونک، تقاطع میرداماد، دانشکده مهندسی نقشه برداری دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی.

تلفن: ۰۹۱۲۴۹۸۸۷۹۷

Email: m.sdgh93@gmail.com

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-12]

[DOR: 20.1001.1.20089635.1400.9.1.3.0]

[DOI: 10.52547/jgit.9.1.85]

۱- مقدمه

اقتصاد جهانی امروزه بیشتر بر پایه سوخت‌های فسیلی از جمله زغال‌سنگ، نفت و گاز طبیعی است اما ادامه مصرف با نرخ مصرف کنونی سبب به پایان رسیدن این منابع در چند دهه آینده می‌شود. از طرفی دیگر این سوخت‌ها اثرات منفی بر روی کره زمین از جمله گازهای گلخانه‌ای و آلاینده‌های محیطی دارد، از این رو استفاده از انرژی‌های تجدید پذیر تبدیل به چالشی برای اکثر کشورهای دنیا شده است [۱]. در این راستا، استفاده از سیستم‌های تولیدات پراکنده به دلیل کارایی بالاتر، انعطاف‌پذیری و تولید برق پاک، تبدیل به راه‌حلی برای تولید برق در آینده شده است [۲].

تولیدات پراکنده (*DG*[۱])، واحدهای کوچکی هستند که از منابع انرژی تجدید پذیر مانند انرژی بادی یا خورشیدی استفاده می‌کنند. با نصب این واحدها در مکان بهینه، میزان تلفات در شبکه انتقال و یا توزیع برق به طور چشمگیری کاسته خواهد شد [۳]. بر این اساس، این تحقیق به دنبال بررسی میزان تناسب محیطی مکان‌های مختلف بر اساس خصوصیات جغرافیایی منطقه و سپس تعیین مکان بهینه نصب نیروگاه بادی و تخصیص این مناطق در شبکه برق با در نظر گرفتن اهداف مکانی و اهدافی که از نظر الکتریکی مطرح هستند.

به منظور جستجوی بهترین مکان جهت احداث نیروگاه تولیدات پراکنده از معیارها و توابع هدف مختلفی استفاده می‌شود [۴]. اگرچه برخی از معیارها با یکدیگر متضاد هستند، اما همگی باید به طور هم‌زمان در انتها بهینه شوند. از این رو، روش‌های بهینه‌سازی برای این هدف مناسب هستند [۵]. از جمله اهداف در نظر گرفته شده تا به حال در مکان‌یابی نیروگاه‌های تولیدات پراکنده با استفاده از الگوریتم ژنتیک و از دیدگاه الکتریکی می‌توان به بهبود ولتاژ نقطه انتهایی دم [۶]، کاهش تلفات سیستم [۷, ۸, ۹, ۱۰ و ۱۱]، بهبود ولتاژ [۷, ۸ و ۱۱]، بهبود اطمینان سیستم [۷]، بهبود پایداری ولتاژ [۱۰] و کاهش هزینه تلفات [۱۲] اشاره کرد. در تمامی مطالعات یاد شده، شبکه برق استاندارد مورد نظر قرار گرفته شده است و همچنین تناسب محیطی و معیارهای مکانی لحاظ نشده است.

سیستم اطلاعات مکانی، به دلیل توانایی بالا در تعامل با معیارها به عنوان یک ابزار قوی در برنامه‌ریزی‌های مکانی و مدیریتی شناخته شده است [۱۳]. سیستم‌های تصمیم‌گیری چند معیاره از روش‌های معمول در مسائل مربوط به برنامه‌ریزی انرژی هستند. در اکثر اوقات، تنها مناطقی که دارای پتانسیل انرژی بادی بالا هستند مناطق مناسبی نخواهند بود [۱۴]. این روش‌ها به منظور انتخاب بهترین گزینه در حضور چندین معیار و هدف مورد استفاده قرار می‌گیرند [۱۵]. مکان‌یابی محیطی نیروگاه‌های تولیدات پراکنده با استفاده از سیستم اطلاعات مکانی (*GIS*[۲]) و در حضور معیارهای مختلفی انجام می‌گیرد. به طور مثال، گرسوسکی و همکاران از سیستم پشتیبان تصمیم‌گیری مکانی (*SDSS*[۳]) گروهی برای مکان‌یابی مزرعه بادی در حضور ۷ معیار سرعت باد، فاصله از محل زندگی پرندگان، کاربری زمین، فاصله از راه‌های اصلی، فاصله از خطوط انتقال، جنس خاک و تراکم جمعیت در شمال غرب اوهایو استفاده کردند [۱۶]. نور اللهی و همکاران از *GIS* و روش‌های پشتیبان تصمیم‌گیری چند معیاره برای مکان‌یابی مزرعه بادی در استان مرکزی استفاده کردند. متدولوژی استفاده شده شامل دو بخش تعیین محدودیت ها و تعیین مناطق مناسب است [۱۷]. ویلاکرسس و همکاران از *GIS* و سیستم تصمیم‌گیری چند معیاره (*MCDM*[۴]) برای مکان‌یابی توربین بادی در

[۱] *Distributed Generation*

[۲] *Geographic Information System*

[۳] *Spatial Decision Support System*

[۴] *Multi-Criteria Decision Making*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-12]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1400.9.1.3.0]
[DOI: 10.52547/jgit.9.1.85]

اکوادور قاره‌ای استفاده کردند. معیارهای در نظر گرفته‌شده سرعت باد، غلظت هوا، شیب، فاصله از پست برق، فاصله از شبکه راه، فاصله از مناطق شهری، فاصله از خطوط حمل‌ونقل و فاصله از بنادر فضای سبز و کاربری اراضی هستند. هانطور که در این تحقیق دیده می‌شود فاصله از پست برق به عنوان یک معیار وارد شده است [۱۸]. لاتینوپلوس و همکاران از *GIS* و روش ترکیب خطی وزن‌دار (*WLC*[۱]) در یافتن مکان مناسب برای توسعه پروژه مزرعه بادی در یونان استفاده کردند. متودولوژی استفاده شده شامل دو بخش تعیین محدودیت ها و تعیین معیارها است. در انتها مکان های انتخاب شده با شاخص تناسب (*SI*[۲]) ارزیابی شدند [۱۳]. هوفر و همکاران از مدل سلسله مراتبی مکانی برای مکان‌یابی مزرعه بادی در آخن استفاده کردند. در گام اول ۷ پارامترسرعت باد کمتر از ۶ متر بر ثانیه، فاصله از مناطق شهری، فاصله از زیر ساخت های شهری، محیط های طبیعی، شیب کمتر از ۳۰٪ و کاربری زمین به عنوان محدودیت و سپس ۹ معیار پتانسیل نیروی باد، فاصله از محیط های طبیعی، فاصله از مناطق شهری، فاصله از شبکه برق، فاصله از شبکه راه، فاصله از مناطق دیدنی، چشم انداز، کاربری زمین و شیب زمین برای تعین مناطق دارای پتانسیل احداث نیروگاه بادی در نظر گرفته شد [۱۹]. در بررسی مطالعات فوق دریافتیم که معیارهای محیطی در نظر گرفته شده کاملاً سازگار با محیط زیست هستند. اما، تأکید این تحقیقات بر روی تعیین تناسب محیطی در مقیاس‌های کوچک و پهنه‌بندی منطقه مورد مطالعه و در نتیجه تولید گزینه‌های بسیار است. از سوی دیگر، با توجه به نیاز مصرف‌کنندگان، هزینه سرمایه‌گذاری و توجیه اقتصادی احداث نیروگاه بادی، نیازمند کاهش گزینه‌ها در مقیاس بزرگ هستیم. همچنین، در این مطالعات اهدافی که از نظر الکتریک مطرح هستند مانند تلفات خط اتصالی نیروگاه به پست برق در نظر گرفته نشده است.

در این تحقیق، مکان‌یابی واحدهای تولیدات پراکنده بادی با در نظر گرفتن معیارها و فاکتورهای مکانی و تخصیص این واحدها در شبکه برق با استفاده از الگوریتم ژنتیک به طور هم‌زمان انجام شده است. در گام اول، با استفاده از سیستم اطلاعات مکانی تناسب محیطی منطقه بررسی و گزینه‌های مستعد جهت احداث نیروگاه بادی تعیین می‌شود.در گام بعدی، با استفاده از الگوریتم ژنتیک و در حضور اهداف کاهش تلفات خط، افزایش تناسب و افزایش میزان بار قابل تأمین توسط پست برق ، گزینه‌های اولیه محدود و بهترین مکان جهت احداث نیروگاه بادی و پست برق تعیین می‌شود. در این تحقیق، تخصیص در ۱۳ سناریو انجام شده است و در هر سناریو، تخصیص یک واحد نیروگاه بادی افزوده می‌شود تا مدیران بر اساس نیاز و با توجه به شرایط اقتصادی، تصمیم سازی کنند.

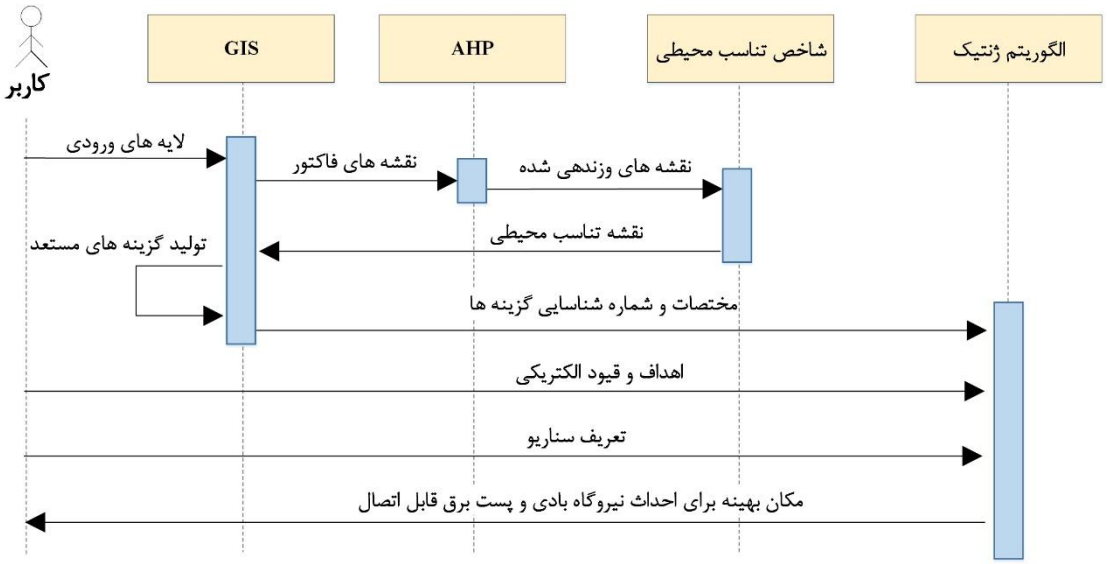
۲- روش تحقیق

مراحل مکان‌یابی و تخصیص تولیدات پراکنده بادی که در این تحقیق استفاده شده است، به طور خلاصه در شکل (۱) آورده شده است. روش اجرا شامل دو بخش کلی است: بخش اول شامل بررسی معیارهای مؤثر بر مکان‌یابی، تولید و تلفیق نقشه‌های فاکتور در محیط *GIS* و تعیین نقاط مستعد جهت نصب نیروگاه‌های تولیدات پراکنده و بخش دوم شامل تخصیص این واحدها در شبکه برق با استفاده از روش ژنتیک با در نظر گرفتن اهداف کاهش تلفات خط اتصالی نیروگاه به پست برق، افزایش تناسب محیطی گزینه موردنظر و افزایش میزان بار قابل تأمین توسط پست برق است. تخصیص در ۱۳ مرحله انجام می‌شود. در هر مرحله یک گزینه به گزینه‌های قبلی اضافه می‌شود تا در مرحله ۱۳ تخصیص که ۱۳ گزینه انجام می‌شود، بتوان نیروگاه اولیه را از شبکه حذف کرد.

[۱] *Weighted Linear Combination*

[۲] *Suitability Index*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-12]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1400.9.1.3.0]
[DOI: 10.52547/jgit.9.1.85]



شکل ۱: فلوچارت روش تحقیق

۲-۱- مکان‌یابی اولیه

به‌منظور انتخاب مکان مناسب برای نصب نیروگاه‌های بادی، شناخت و تعیین معیارها از اهمیت بالایی برخوردار است. به منظور نمایش کمّی میزان اهمیت هر معیار، باید به آن معیار وزن نسبت داده شود و در نهایت معیارها با توجه به وزن نسبت داده شده، در یک نقشه ترکیب می‌شوند.

۲-۱-۱- معیارها و قیود

"یک معیار بخش قابل اندازه‌گیری یک قضاوت است که باعث می‌شود متغیرها در یک فرآیند تصمیم‌گیری شناسایی و محدود شوند [۲۰]." در این تحقیق معیارهای ارزیابی، بر اساس خروجی موردنظر و از طریق گفتگو با افراد متخصص و مطالعه تحقیقات انجام شده انتخاب شده‌اند. به طور کلی، معیارهای مکان‌یابی نیروگاه بادی به ۲ دسته محیطی شامل فاکتورهای سرعت باد و کاربری اراضی و اقتصادی شامل فاکتورهای فاصله از مناطق مسکونی، فاصله از شبکه انتقال برق و فاصله از شبکه راه تقسیم‌بندی می‌شوند. با این وجود، عوامل طبیعی و مصنوعی بر روی عملکرد و سازه نیروگاه‌ها تأثیرگذار خواهند بود. این تأثیرات عموماً شامل اثرگذاری بر حیات‌وحش، آلودگی صوت، آلودگی بصری و مسائل ایمنی هستند. این اثرات تحت عنوان معیارهای محدودکننده شناخته می‌شوند [۱۸]. این محدودیت‌ها در نهایت باعث ایجاد حریم‌ها و فاصله از مناطق دارای محدودیت می‌شوند [۲۱]. در این تحقیق، به دلیل عدم دسترسی به لایه های ذکر شده، قیود به صورت واقعی وارد نشده و تنها قیود فاصله کمتر از ۲۵۰ متر از خطوط برق، فاصله کمتر از ۵۰۰ متر از راه‌ها، فاصله کمتر از ۲۵۰ متر از فرودگاه، ارتفاع بیشتر از ۲۰۰۰ متر، شیب بیشتر از ۱۵٪ و فاصله کمتر از ۵۰۰ متر از مناطق مسکونی به شکل لایه های مکانی در نظر گرفته شده است.

۲-۱-۲- وزن دهی به معیارها

انتخاب بهترین مکان برای نصب نیروگاه‌های بادی، در حضور چندین هدف، معیار و زیر معیار انجام می‌شود. روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره، برای انتخاب بهترین گزینه در بین چندین متغیر کاربرد دارد. یکی از بهترین این روش‌ها، روش *AHP* است که به‌طور فراوان در زمینه مدیریت انرژی نصب نیروگاه‌های تجدید پذیر کاربرد دارد [۱۸].

روش *AHP* بر پایه سه اساس مقایسه، قضاوت و اولویت‌بندی تشکیل شده است و شامل سه گام اصلی

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-12]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1400.9.1.3.0]
[DOI: 10.52547/jgit.9.1.85]

است [۲۲]. گام اول، تعیین معیارها و زیر معیارهاست [۱۵ و ۲۳]. در گام دوم، معیارها و زیر معیارهای موجود، با یکدیگر مقایسه می‌شوند [۱۵] و در نهایت، در گام سوم ماتریس مقایسه دودویی ساخته و معیارها وزن‌دهی می‌شوند [۲۰, ۲۴, ۲۵, ۲۶ و ۲۷].

۲-۱-۳- ترکیب معیارها

به منظور تلفیق لایه‌های وزن‌دار و محدودیت‌ها، از دو روش تلفیق استفاده می‌شود. اولین روش، استفاده از شاخص تناسب محیطی (LSI) است. در این روش، لایه‌ها با توجه به وزن مختص به زیر معیارها، معیارها و فاکتورها تلفیق و در یک لایه نمایش داده می‌شوند [۲۲ و ۲۷]. برای محاسبه این شاخص از رابطه (۱) استفاده می‌شود. در رابطه (۱)، A وزن معیار محیطی، n تعداد فاکتورها، m تعداد زیر معیارهای موجود، A_jC_{wi} وزن فاکتورها و A_jSC_{wi} وزن زیر معیارهای موجود در معیار محیطی است. B وزن معیار اقتصادی، ، B_jC_{wi} وزن فاکتورها و B_jSC_{wi} وزن زیرمعیارهای موجود در معیار اقتصادی است.

$$LSI = \left[A*(\sum_{j=1}^{n}\sum_{i=1}^{m} A_jC_{wi} * A_jSC_{wi}) \right] + \left[B*(\sum_{j=1}^{n}\sum_{i=1}^{m} B_jC_{wi} * B_jSC_{wi}) \right] \quad \text{رابطه(۱)}$$

روش بعدی، استفاده از مدل بولین است. در این روش همه معیارها به دو عبارت منطقی "قابل‌قبول" با مقدار ۱ و "غیر قابل قبول" با مقدار ۰ تقلیل می‌یابند و سپس با عملگر AND ترکیب می‌شوند. برای معیارهایی که با عملگر AND ترکیب می‌شوند، منطقه مناسب باید شامل همه معیارهای در نظر گرفته‌شده در مجموعه تصمیمات باشد و حتی اگر یک معیار برآورده نشود آن منطقه حذف خواهد شد. نقشه خروجی به صورت یک نقشه باینری خواهد بود. [۱۵ و ۲۸].

۲-۲- تخصیص

در بخش‌های قبلی، معیارها و محدودیت‌ها تعیین شدند. وزن دهی به معیارها با استفاده از روش AHP و نحوه تلفیق لایه‌ها بحث شد. در این بخش در مورد روش اهداف موردنظر در تخصیص و الگوریتم ژنتیک بحث خواهد شد.

۲-۲-۱- اهداف

انتخاب گزینه بهینه برای نصب نیروگاه بادی و پست برق بهینه برای اتصال نیروگاه به آن در حضور اهداف بهینه‌سازی انجام می‌شود. در این بخش به بررسی این اهداف پرداخته می‌شود.

۲-۲-۱-۱- تلفات توان

امروزه، با توسعه فنی، استفاده از تولیدات پراکنده جایگزین نیروگاه‌های متمرکز شده است. مکان‌یابی بهینه واحدهای تولیدات بهینه باعث کاهش تلفات، بهبود پروفیل ولتاژ و افزایش اطمینان سیستم می‌شود [۶]. تلفات توان در خط برابر است با نسبت توان تلف شده به کل توان جاری شده در خط که ارتباط مستقیم با مقاومت خط دارد و با استفاده از رابطه (۲) محاسبه می‌شود. تولیدات پراکنده با افزایش جریان در خط باعث کاهش تلفات می‌شوند [۶ و ۱۱].

$$P_{loss} = \sum_{i=1}^{N_b} I_i^2 * R_i \quad \text{رابطه(۲)}$$

در رابطه (۲)، i شماره شاخه، N_b تعداد کلی شاخه‌هاست، I_i جریان درون iامین شاخه، R_i مقاومت iامین شاخه و P_{loss} تلفات واقعی توان سیستم توزیع است.

همان‌طور که می‌دانیم، مقاومت هر خط وابستگی مستقیم به طول خط دارد و هرچه طول خط بیشتر باشد، تلفات توان بیشتر خواهد بود. از همین رو، به منظور کاهش تلفات توان خط، باید فاصله نیروگاه تا پست برق کمترین مقدار باشد. این هدف در رابطه (۳) شرح داده شده است. در رابطه (۳)، r_{DG} فاصله بین نیروگاه تا پست برق و k تعداد نیروگاه‌ها است.

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-12]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1400.9.1.3.0]
[DOI: 10.52547/jgit.9.1.85]

رابطه(۳)
$$f_1 = \left[\frac{\sum_{i=1}^{k} r_{DG} - k * \min(r_{DG})}{\max(r_{DG}) - \min(r_{DG})} * \frac{1}{k} \right]$$

۲-۲-۱-۲- تناسب محیطی

این هدف مربوط به تناسب محیطی گزینه است. در مکان یابی محیطی، ابتدا نقشه های فاکتور با استفاده از شاخص تناسب محیطی با یکدیگر تلفیق و نقشه تناسب محیطی تولید شد. سپس در این نقشه، منطقه مورد مطالعه به ۴ کلاس کلی تقسیم شد (نقشه امتیاز بندی شده) و گزینه‌ها در مناطق با پتانسیل بالا انتخاب شدند. اما در اصل، هر گزینه در پیکسلی قرار دارد که در نقشه تناسب محیطی دارای درجه خاکستری متفاوتی از بقیه گزینه‌ها است. مقصود از این هدف، افزایش مجموع مقادیر پیکسلی گزینه‌ها در نقشه تناسب محیطی است. این مقادیر از محیط *GIS* استخراج می‌شوند. این هدف در رابطه (۴) شرح داده شده است. در رابطه (۴)، gv_i مقدار پیکسلی گزینه iام در نقشه تناسب محیطی و k تعداد نیروگاه‌ها است.

رابطه(۴)
$$f_2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^{k} gv_i - k * \min(gv)}{\max(gv) - \min(gv)} * \frac{1}{k} \right]$$

۲-۲-۱-۳- بار قابل تأمین

هر پست برق، قادر به تأمین مقدار مشخصی بار است تا بتواند پاسخگوی حداکثر قدرت مصرفی وسایل برقی مشترک که به طور همزمان در نقطه تحویل به کار می افتند یا انتظار می رود به کار بیفتند، باشد. واحد سنجش، کیلووات است [۳۳] . این هدف در جهت انتخاب پست برقی است که قادر به تأمین بیشترین مقدار بار باشد. این هدف در رابطه (۵) شرح داده شده است. در رابطه (۵)، $load_i$ میزان بار قابل تأمین توسط پست برق iام k تعداد نیروگاه‌ها است.

رابطه(۵)
$$f_3 = \left[\frac{\sum_{i=1}^{k} load_i - k * \min(load)}{\max(load) - \min(load)} * \frac{1}{k} \right]$$

۲-۲-۲- الگوریتم ژنتیک

الگوریتم‌های ژنتیک از خانواده‌ی مدل‌های محاسباتی هستند که بر مفهوم انتخاب طبیعی و ژنتیک تأکید دارند. این الگوریتم از تکامل طبیعی مانند ارثبری، جهش، انتخاب و آمیزش الگوبرداری می‌کند [۲۹]. بر اساس قانون انتخاب طبیعی، در طول چندین نسل، تنها اعضایی که بهتر با محیط منطبق می‌شوند زنده می‌مانند و ژن خود را به نسل بعدی منتقل می‌کنند. بر همین اساس، الگوریتم‌های ژنتیک بر روی یک مجموعه (جمعیت) از جواب‌های محتمل یک مسئله ژنتیک کار می‌کنند، معیارهای انتخاب و بازتولید را روی آن‌ها پیاده می‌کنند در نتیجه جواب‌های جدید با اطلاعاتی نزدیک به والدینشان تولید خواهند شد [۱۲].

پیاده‌سازی الگوریتم ژنتیک در چندین گام صورت می‌گیرد. در گام اول، ساختار کروموزوم با توجه به تعریف مسئله تعیین می‌شود. هر کروموزوم یک جواب احتمالی مسئله است و از چندین واحد به نام "ژن" تشکیل شده است [۵]. در گام دوم، تابع بهینگی متناسب با مسئله تعریف می‌شود تا هر کروموزوم بر اساس آن سنجیده شود. تابع بهینگی تعریف شده در این تحقیق، که در رابطه (۶) نمایش داده شده است، دارای سه بخش است. بخش اول مربوط به کاهش تلفات در خط اتصالی نیروگاه به پست برق که با کاهش فاصله بین نیروگاه و پست برق تعریف می‌شود، بخش دوم مربوط به افزایش تناسب محیطی گزینه که با افزایش مقدار پیکسلی گزینه در نقشه تناسب محیطی انجام می‌شود و بخش سوم مربوط به حداکثر سازی بار قابل تأمین توسط پست برق است.

رابطه(۶)
$$F = w_1 * f_1 + w_2 * f_2 - w_3 * f_3$$

در رابطه (۶)، f_1 کمینه‌سازی تلفات خط، f_2 افزایش تناسب محیطی گزینه و f_3 افزایش بار قابل تأمین توسط پست برق است. هر بخش از تابع بهینگی ذکر شده، در بازه (۱و۰) نرمالایز و وزن دهی می‌شود. مجموع این وزن‌ها، مطابق با رابطه(۷)، برابر ۱ است.

رابطه(۷)
$$w_1 + w_2 + w_3 = 1$$

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-12]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1400.9.1.3.0]
[DOI: 10.52547/jgit.9.1.85]

تأمین این اهداف در کنار قید بار انجام می‌شود. این قید به این شکل تعریف می‌شود که میزان بار قابل تأمین توسط پستی که نیروگاه به آن متصل می‌شود نباید از توان نیروگاه بیشتر باشد. این قید در رابطه (۸) نمایش داده شده است.

$$load_{substation} \le P_{DG} \quad \text{رابطه(۸)}$$

در رابطه (۸)، $load_{substation}$ میزان باری که توسط پست باید تأمین شود و P_{DG} توان نیروگاه است.

گام بعدی، تولید نسل با استفاده از پارامترهای اولیه مانند تعداد جمعیت در یک نسل است. نسل ابتدایی شامل تعدادی کروموزوم است که به صورت تصادفی تولید شده‌اند. برای هر کروموزوم مقدار تابع بهینگی محاسبه و کروموزوم دارای کمترین عدد بهینگی به عنوان بهترین نسل شناخته می‌شود [۸, ۱۰ و ۳۰]. با استفاده از عملگرهای زیر نسل‌های آینده تولید می‌شوند:

- نخبه‌گرایی: این عملگر باعث می‌شود کروموزوم‌هایی که دارای بهترین عدد بهینگی هستند بدون تغییر به نسل بعدی منتقل شوند [۳۰].
- انتخاب: دو والد به‌وسیله تابع انتخاب، برای تولید فرزندان انتخاب می‌شوند. روش‌های انتخاب شامل روش چرخ گردان، رتبه‌بندی و مسابقه‌ای است [۳۱].
- تقاطع: برای تولید فرزندان، دو والد انتخاب شده تقاطع می‌یابند [۱۰].
- جهش: با احتمال تعریف شده برای جهش، فرزندان در هر کروموزوم جهش می‌یابند [۱۰].

در انتها فرزندان به نسل بعدی منتقل می‌شوند. به همین ترتیب، نسل‌های آینده تولید می‌شوند تا شرط توقف برآورده شود. شروط توقف می‌توانند رسیدن به جواب موردنظر، تعداد تکرارها و یا عدم پیشرفت باشند [۶]. پس از توقف، کروموزومی که دارای بهترین عدد بهینگی است به عنوان جواب نهایی نمایش داده می‌شود.

۳- پیاده‌سازی

اولین مرحله در پیاده‌سازی، جمع‌آوری داده‌های موردنظر است. داده‌های مورد نیاز در این تحقیق با توجه به معیارهای گفته شده در بخش جمع‌آوری شدند. پس از جمع‌آوری، داده‌ها وارد محیط *GIS* شدند و برای تهیه نقشه‌های مورد نیاز با استفاده از ابزارهای *GIS* تصحیح شدند. تصحیحات انجام شده شامل تعریف سیستم تصویر، تغییر سیستم تصویر، اصلاح هندسی، برش و ترکیب است.

۳-۱- منطقه مورد مطالعه

استان قزوین در طول جغرافیایی ۳۵° ۳۷' تا ۳۶° ۴۵' شمال و عرض جغرافیایی ۴۸° ۴۵' تا ۵۰° ۵۰' شرق در کشور ایران واقع شده است. سرعت باد متوسط در این منطقه ۴ متر/ثانیه است. علت انتخاب این استان، وجود پتانسیل بالا برای بهره‌برداری از انرژی بادی به دلیل نزدیکی این استان به نیروگاه بادی منجیل و وجود باد با سرعت مناسب در این منطقه است.

شکل ۲: منطقه مورد مطالعه [۳۲]

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-12]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1400.9.1.3.0]
[DOI: 10.52547/jgit.9.1.85]

۳-۲- تولید نقشه‌های فاکتور

برای تولید نقشه‌های فاکتور، ابتدا معیارهای مؤثر با مطالعه تحقیقات انجام شده و نظر کارشناسان تعیین می‌شوند. سپس داده‌های مورد نظر (جدول (۱)) تهیه و وارد محیط *GIS* می‌شوند و پس از انجام تصحیحات مورد نیاز، نقشه‌های فاکتور تولید می‌شوند.

جدول ۱: لایه‌های استفاده شده در تهیه نقشه‌های فاکتور

لایه	مقیاس	لایه	مقیاس	لایه	مقیاس
محدوده جغرافیایی استان	۱:۲۵۰۰۰	راه‌ها	۱:۱۰۰۰۰	مناطق مسکونی	۱:۱۰۰۰۰
نقشه ارتفاعی	۱:۲۵۰۰۰	خطوط برق	۱:۱۰۰۰۰	مناطق زراعی	۱:۱۰۰۰۰
شیب	۱:۲۵۰۰۰	مناطق حفاظت‌شده	۱:۱۰۰۰۰	بوته‌زار	۱:۱۰۰۰۰
شبکه و پست‌های برق	۱:۲۵۰۰۰	باغات	۱:۱۰۰۰۰	جنگل	۱:۱۰۰۰۰
داده‌های ایستگاه‌های سینوپتیک	---	پارک‌ها	۱:۱۰۰۰۰		

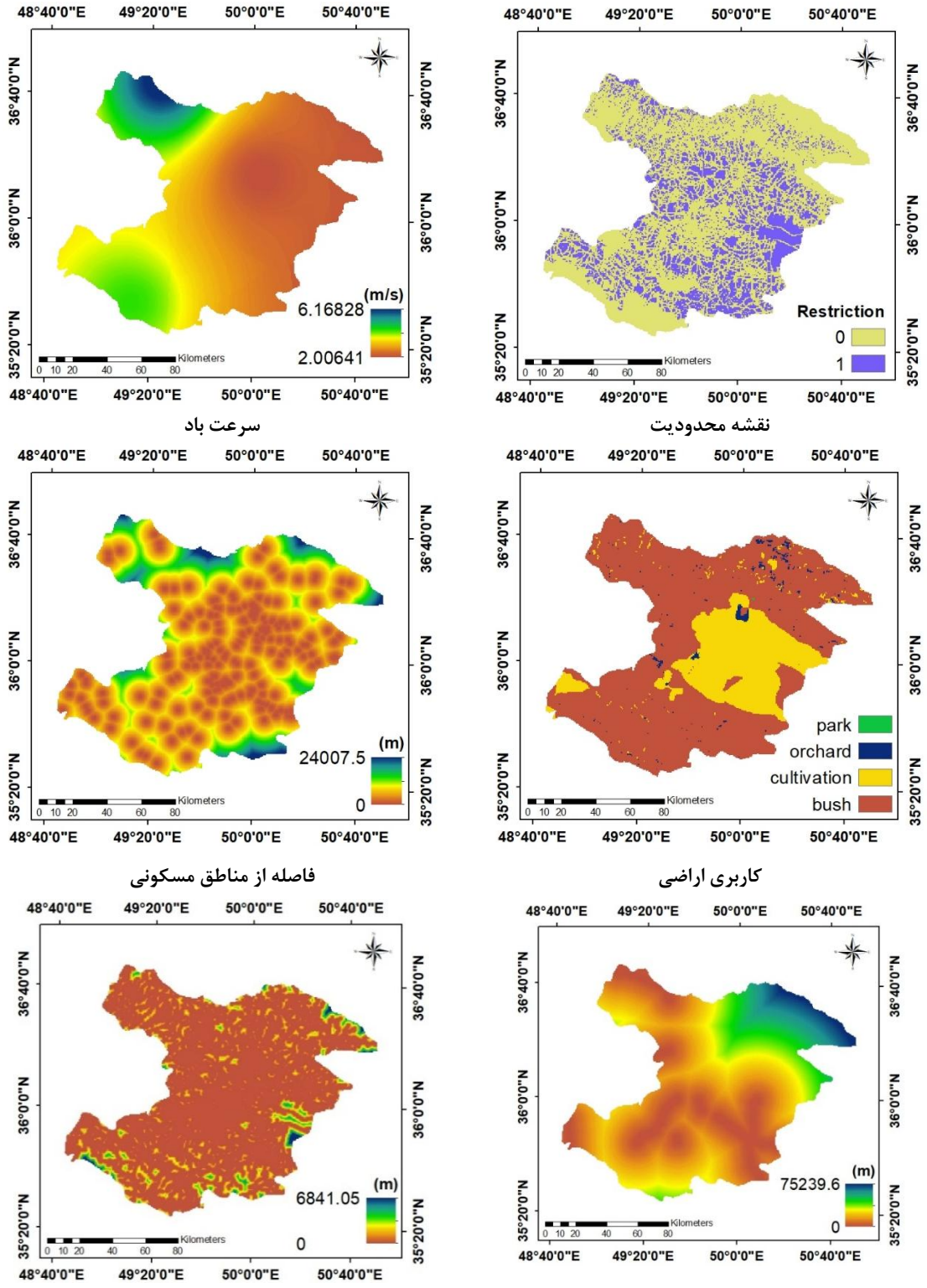
گام اول تولید نقشه محدودیت است. برای این هدف، تمامی لایه‌های قیود به صورت باینری (مناطق دارای محدودیت مقدار ۰ و باقی مناطق مقدار ۱) تولید و با یکدیگر با کمک مدل بولین و عملگر *AND* ترکیب می‌شوند. این نقشه در نهایت از نقشه نهایی تناسب محیطی حذف خواهد شد. گام بعدی تولید نقشه‌های فاکتور است. برای احداث توربین بادی ۲ معیار اصلی محیطی و اقتصادی و ۵ فاکتور سرعت باد [۱۳, ۱۶, ۱۷, ۱۸ و ۱۹]، کاربری اراضی [۱۶ و ۲۷]، فاصله از مناطق مسکونی [۱۸, ۱۹ و ۲۷]، فاصله از خطوط برق [۱۶, ۱۷, ۱۸, ۱۹ و ۲۷] و فاصله از راه‌های اصلی [۱۳, ۱۶, ۱۷, ۱۸, ۱۹ و ۲۷] انتخاب شدند که در ذیل شرح داده شده است:

- سرعت باد: نیروگاه بادی باید در مکانی احداث شود که سرعت باد کافی داشته باشد. سرعت باد از داده های ایستگاه های هواشناسی اخذ شده است. واحد این داده متر/ثانیه است و برای کل منطقه درون یابی شده است. مناطق شمال غربی استان دارای پتانسیل بالا هستند.
- نقشه کاربری اراضی: نیروگاه بادی باید در مکانی احداث شود که کمترین آسیب را به طبیعت و محیط اطراف وارد کند. از این رو، کل منطقه به ۴ دسته کلی بایر و بوته‌زار، زراعی، چمن‌زار و باغ و درختکاری در نظر گرفته شده است.
- فاصله از مناطق مسکونی: به دلیل ایجاد آلودگی بصری و آسیب های احتمالی به محیط شهری، نیروگاه بادی باید در فاصله دور از محیط شهری احداث شود. فاصله اقلیدسی از مناطق مسکونی در نظر گرفته شده است. هرچه فاصله بیشتر باشد، تناسب محیطی بالاتر است.
- فاصله از خطوط برق: به دلیل ضرورت اتصال نیروگاه بادی به شبکه برق و از سوی دیگر کاهش هزینه‌های سرمایه گذاری، نیروگاه بادی باید در نزدیکی شبکه برق احداث شود. فاصله اقلیدسی از خطوط برق در نظر گرفته شده است. هرچه فاصله کمتر باشد، تناسب محیطی بالاتر است.
- فاصله از راه‌های اصلی: از جنبه اقتصادی و هزینه‌های مربوط به حمل‌ونقل ، نیروگاه باید در فاصله کم از راه‌های اصلی احداث شود. فاصله اقلیدسی از راه‌های اصلی در نظر گرفته شده است.

نقشه‌های محدودیت و فاکتور مکان‌یابی نیروگاه بادی در شکل(۳) نمایش داده شده است.

گام بعدی وزن دهی به معیارها و فاکتورهاست. برای این منظور از روش *AHP* استفاده شده‌است. وزن‌های اختصاص‌یافته به معیارهای مزرعه بادی جدول (۲) نمایش داده شده است.

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-12]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1400.9.1.3.0]
[DOI: 10.52547/jgit.9.1.85]



سرعت باد | نقشه محدودیت

فاصله از مناطق مسکونی | کاربری اراضی

فاصله از راه‌های اصلی | فاصله از خطوط برق

شکل ۳: نقشه‌های فاکتور

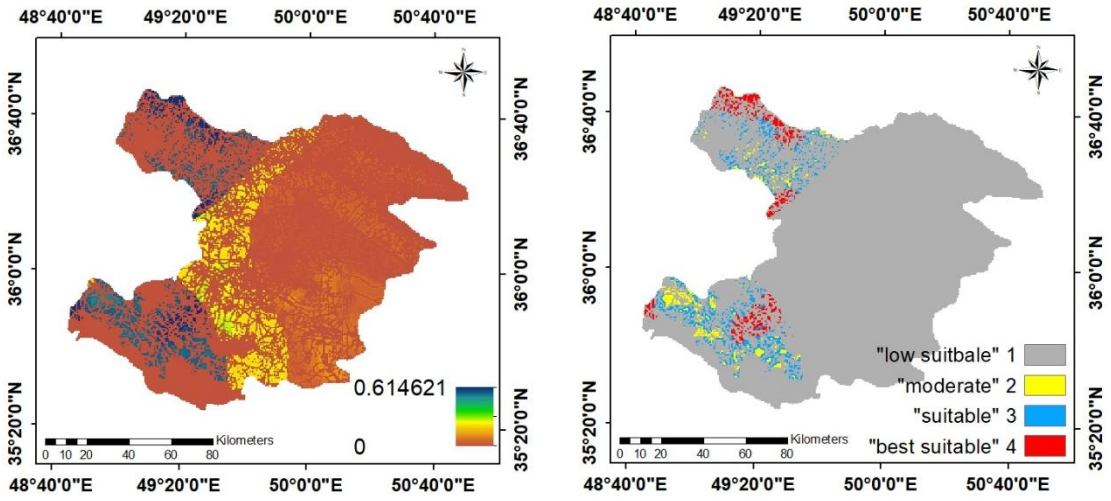
[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-12]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1400.9.1.3.0]
[DOI: 10.52547/jgit.9.1.85]

جدول ۲: وزن معیارها، فاکتورها و زیر معیارها

معیار	وزن	فاکتور	وزن	زیر معیار	وزن
محیطی	۰٫۸۳۳۳	سرعت باد (متر/ثانیه)	۰٫۸۷۵۰	۲>	۰٫۰۵۲۴
				۲-۲٫۷۵	۰٫۰۵۲۴
				۲٫۷۵-۳٫۵	۰٫۲۵۰۸
				۳٫۵<	۰٫۶۴۳۴
		کاربری اراضی	۰٫۱۲۵۰	بایر و بوته‌زار	۰٫۵۲۱۰
				زراعی	۰٫۳۰۶۴
				چمن‌زار	۰٫۱۲۶۲
				باغ و درختکاری	۰٫۰۴۶۵
اقتصادی	۰٫۱۶۶۷	فاصله از شبکه برق (متر)	۰٫۶۴۰۵	۳۵۰۰>	۰٫۵۲۱۰
				۳۵۰۰-۷۰۰۰	۰٫۳۰۶۴
				۷۰۰۰-۱۰۰۰۰	۰٫۱۲۶۲
				۱۰۰۰۰<	۰٫۰۴۶۵
		فاصله از شبکه راه (متر)	۰٫۲۰۵۹	۳۵۰۰>	۰٫۶۱۵۸
				۳۵۰۰-۶۵۰۰	۰٫۲۱۳۲
				۶۵۰۰-۱۰۰۰۰	۰٫۱۳۲۸
				۱۰۰۰۰<	۰٫۰۳۸۲
		فاصله از مناطق مسکونی (متر)	۰٫۱۵۳۷	۲۰۰۰>	۰٫۰۴۸۷
				۲۰۰۰-۳۵۰۰	۰٫۱۶۳۱
				۳۵۰۰-۵۰۰۰	۰٫۲۴۹۴
				۵۰۰۰<	۰٫۵۳۸۸

برای تولید نقشه نهایی، معیارها و فاکتورها باید با وزن‌های نسبت داده شده به آن‌ها ترکیب شوند. برای این منظور، نقشه‌های فاکتور با شاخص تناسب محیطی تلفیق خواهند شد. پس از تولید نقشه تناسب محیطی، نقشه محدودیت با مدل بولین از این نقشه حذف می‌شود. پس از ترکیب لایه‌ها و تولید نقشه نهایی، برای یافتن ۵٪ از بهترین مناطق، نقشه‌ها به روش بازه‌های مساوی به ۲۰ کلاس تقسیم‌بندی می‌شوند، کلاس ۲۰ امتیاز ۴ یا "*best suitable*"، کلاس ۱۹ امتیاز ۳ یا "*suitable*"، کلاس ۱۸ امتیاز ۲ یا "*moderate*" و کلاس‌های ۱-۱۷ امتیاز ۱ یا "*low suitable*" را می‌گیرند. نقشه امتیازبندی شده در شکل (۴) آورده شده است.

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-12]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1400.9.1.3.0]
[DOI: 10.52547/jgit.9.1.85]

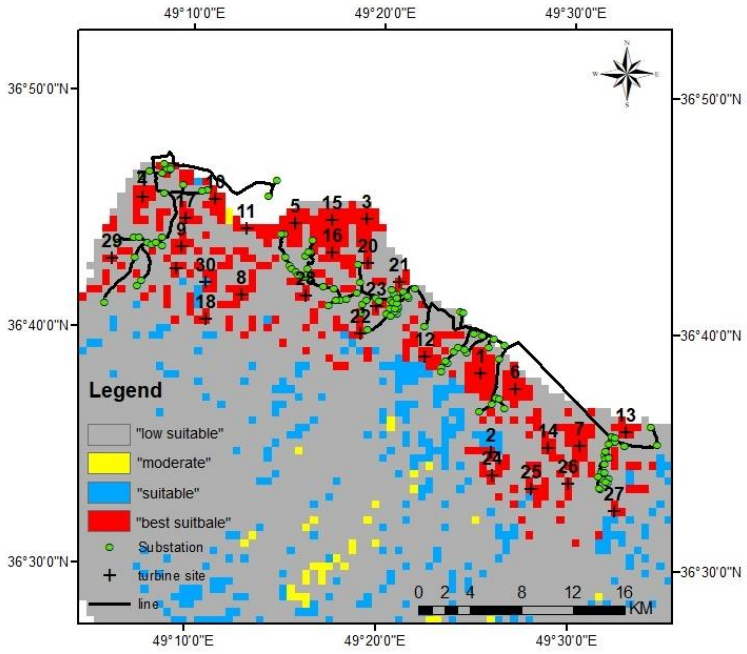


نقشه تناسب محیطی　　نقشه امتیازبندی شده

شکل ۴: نقشه‌های نهایی

۳-۳- انتخاب گزینه مستعد

پس از تولید نقشه‌های نهایی، ۳۰ گزینه مناسب برای نصب نیروگاه بادی با ظرفیت ثابت ۷ مگاوات انتخاب می‌شوند. مساحت موردنیاز برای نصب نیروگاه با این ظرفیت حدود ۱۵ هکتار است. از آنجا که سایز هر پیکسل در نقشه نهایی ۶۰۰*۶۰۰ متر است، هر پیکسل امکان انتخاب شدن برای مکان نیروگاه را دارا است. گزینه‌ها در مناطقی که دارای امتیاز ۴ هستند انتخاب می‌شوند اما در نقشه تناسب محیطی، هریک از این گزینه‌ها دارای مقادیر متفاوتی خواهند بود. این مقادیر از نقشه تناسب محیطی استخراج و به همراه مختصات مکانی گزینه‌ها در جدول توصیفی وارد شدند. توزیع مکانی گزینه‌ها و پست‌های برق، برای نیروگاه بادی در شکل (۵) نمایش داده شده است.



شکل ۵: توزیع مکانی گزینه‌ها و پست‌های برق

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-12]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1400.9.1.3.0]
[DOI: 10.52547/jgit.9.1.85]

۳-۴- تخصیص

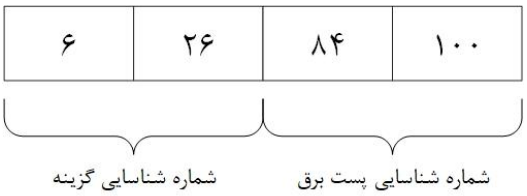
در این تحقیق، برای تخصیص هر گزینه انتخاب شده در بخش پیشین به شبکه برق منطقه، از الگوریتم ژنتیک استفاده شده است. هدف از استفاده از الگوریتم ژنتیک، تعیین مکان بهینه برای نصب نیروگاه‌های تولیدات پراکنده و اتصال آن به پست برقی است که تابع بهینگی تعریف شده را برآورده کند. اهدافی که در تخصیص انتخاب شده‌اند شامل کاهش تلفات توان خط، افزایش تناسب محیطی گزینه و افزایش بار قابل تأمین توسط پست برق است. تخصیص در ۱۳ مرحله انجام می‌شود، در مرحله اول یک واحد نیروگاه ۷ مگاواتی، در مرحله دوم دو واحد تا مرحله ۱۳ که ۱۳ واحد ۷ مگاواتی تخصیص می‌یابد تا با مجموع ۹۱ مگاوات، نیروگاه ۹۰ مگاواتی اصلی سیستم برق فشار متوسط ۲۰ کیلوولتی را از شبکه حذف کند. دلیل انتخاب الگوریتم ژنتیک برای تخصیص، توانایی این روش در یافتن بهینه مطلق و امکان جستجو در فضای جستجوی گسسته است [۴].

ساختار کروموزوم تعریف شده در این تحقیق، شامل دو بخش است. در بخش اول عدد شناسایی گزینه و بخش دوم، عدد شناسایی پست برقی است که گزینه به آن متصل می‌شود.کدینگ استفاده شده در این تحقیق شامل اعداد صحیح است که نشان‌دهنده عدد شناسایی گزینه و پست برق است. هر کروموزوم یک بردار است که تعداد ژن‌های آن برابر است با دو برابر تعداد واحدهایی که در مرحله تخصیص می‌یابند. ساختار کروموزوم تعریف شده در شکل (۶) نمایش داده شده است.

تابع بهینگی استفاده شده در این تحقیق در بخش ۲-۲-۲ بحث شده است. وزن‌های مفروض برای هر بخش از تابع بهینگی، w_1=۰/۴ و $w_2=w_3$=۰/۳ است. علت انتخاب وزن بالاتر برای بخش اول تابع بهینگی، تأکید بر روی کاهش فاصله نیروگاه تا پست برق است زیرا کاهش فاصله تأثیر به سزایی در کاهش تلفات و همچنین کاهش هزینه‌های سرمایه‌گذاری دارد.

به منظور پیاده‌سازی الگوریتم ژنتیک در بهینه‌ترین حالت، از روش صحیح و خطا استفاده شده است. استفاده از پارامترهای مختلف برای پیاده‌سازی الگوریتم ژنتیک به منظور تخصیص گزینه‌های انتخابی برای نیروگاه بادی در جدول (۳) آورده شده است.

با توجه به جدول(۳)، بهینه‌ترین تعداد پارامترها برای پیاده‌سازی الگوریتم ژنتیک در نظر گرفته شده است. این پارامترها، در جدول (۴) آورده شده است. با تعریف این پارامترها، نسل‌های آینده تولید می‌شوند.



شکل ۶: ساختار کروموزوم تعریفی

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-12]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1400.9.1.3.0]
[DOI: 10.52547/jgit.9.1.85]

جدول ۳: کالیبراسیون پارامترهای الگوریتم ژنتیک

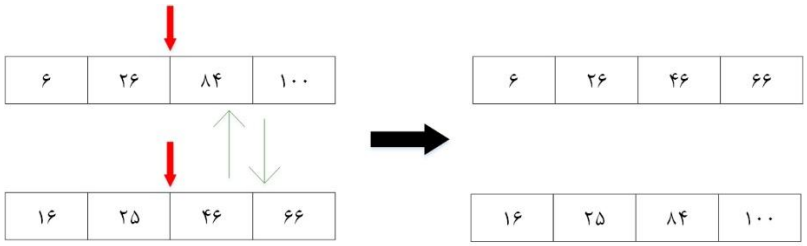
ردیف	تعداد نسل	تعداد جمعیت	نرخ نخبه‌گرایی	نرخ جهش		زمان پیاده‌سازی (ثانیه)	عدد بهینگی
				کروموزوم	ژن		
۱	۱۰۰	۱۰۰۰	٪۱	٪۲۰	٪۲۰	۲۲٫۰۰۹۵۳۴	**-۰٫۴۹۶**
۲	۱۰۰	۱۰۰۰	٪۱	٪۳۰	٪۱۰	۲۶٫۹۶۹۰۱۵	**-۰٫۴۶۸**
۳	۲۰۰	۵۰۰۰	٪۱	٪۳۰	٪۱۰	۲۶۵٫۸۳۴۳۲۱	**-۰٫۵۲۵**
۴	۲۰۰	۵۰۰۰	٪۲	٪۱۰	٪۵	۲۰۲٫۷۴۹۳۷۶	**-۰٫۵۳۵**
۵	۳۰۰	۵۰۰۰	٪۳	٪۲۰	٪۱۰	۳۸۲٫۱۰۰۲۰۲	**-۰٫۵۴۹**
۶	۳۰۰	۵۰۰۰	٪۵	٪۱۰	٪۲۰	۳۶۶٫۲۶۶۸۹۴	**-۰٫۵۴۳**
۷	۵۰۰	۱۰۰۰	٪۵	٪۲۰	٪۵	۷۸٫۹۸۸۸۴۷	**-۰٫۵۴۴**
۸	۵۰۰	۵۰۰۰	٪۱	٪۳۰	٪۵	۵۴۱٫۲۴۵۲۷۶	**-۰٫۵۴۵**
۹	۵۰۰	۱۰۰۰	٪۳	٪۲۰	٪۵	۹۷٫۵۹۹۷۳۱	**-۰٫۵۴۶**
۱۰	۵۰۰	۳۰۰۰	٪۵	٪۲۰	٪۱۰	۲۹۰٫۲۷۶۸۲۹	**-۰٫۵۵ (بهترین حالت)**

جدول ۴: پارامترهای استفاده شده در الگوریتم ژنتیک

تعداد جمعیت	۳۰۰۰	**تابع انتخاب**	چرخ گردان
تعداد نسل	۵۰۰	**نوع تقاطع**	تک نقطه‌ای
نرخ نخبه‌گرایی	٪۵	**احتمال جهش**	٪۲۰ در کروموزوم
			٪۱۰ در ژن

هر نسل ساخته شده، دارای سه بخش است: بخش اول، درصدی از کروموزوم‌های نخبه نسل قبل است. بخش دوم، شامل کروموزوم‌هایی است که از تقاطع والدین در نسل قبل به وجود آمده‌اند. روش انتخاب در این الگوریتم، روش چرخ گردان انتخاب شده است ولی از آنجا که میزان بهینگی کروموزوم‌ها در این تحقیق، مقادیری منفی را اختیار می‌کند، عدد بهینگی هر کروموزوم در عدد ۱- ضرب شده است. در این صورت کمترین مقدار بهینگی در حالت قبلی تبدیل به بیشترین مقدار بهینگی در حالت جدید می‌شود و در چرخ گردان احتمال بالاتری برای انتخاب خواهد داشت. روش کلی تقاطع در شکل (۷) نشان داده شده است.

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-12]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1400.9.1.3.0]
[DOI: 10.52547/jgit.9.1.85]



شکل ۷: تقاطع دو کروموزوم

در انتها، بخش سوم، ۵٪ از جمعیت نسل را تشکیل می‌دهد و شامل کروموزوم‌هایی است که به صورت تصادفی تولیدشده‌اند. پیشنهاد تولید کروموزوم‌های تصادفی از الگوریتم زنبور آورده شده است. از آنجا که در این تحقیق ۳۰ گزینه مستعد برای احداث نیروگاه بادی انتخاب شده است و ۲۴۳ پست برق در محدوده مورد مطالعه وجود دارد، فضای جستجوی بزرگی به وجود می‌آید که استفاده از کروموزوم‌های تصادفی باعث همگرایی سریع‌تر الگوریتم می‌شود. پس از تولید کامل نسل، در کروموزوم با احتمال ۲۰٪ و در ژن با احتمال ۱۰٪ جهش صورت می‌گیرد. در جهش، به هر کروموزوم عدد تصادفی در بازه (۰,۱) نسبت داده می‌شود. اگر این عدد از عدد احتمال در نظر گرفته شده برای جهش در کروموزوم کمتر باشد، در آن کروموزوم جهش اتفاق می‌افتد. سپس در آن کروموزوم، به ازای هر ژن یک عدد تصادفی در بازه (۰,۱) انتخاب می‌شود. اگر این عدد از عدد احتمال در نظر گرفته شده برای جهش در ژن کمتر بود، آن ژن با توجه به بخش قرار گرفته، تبدیل به عددی در بازه مختص به خود می‌شود. همچنین، قبل از جایگزینی عدد انتخابی، وجود یا عدم وجود آن عدد در بخش خود کنترل شده تا عدد تکراری به وجود نیاید. مختصات مکانی گزینه‌ها که در نرم‌افزار *GIS* تولید شده بودند، به عنوان ورودی وارد الگوریتم ژنتیک می‌شوند.

۴- بررسی نتایج

در این تحقیق مکان‌یابی و تخصیص نیروگاه‌های تولیدات پراکنده در شبکه برق با استفاده از تحلیل‌های *GIS* و روش فرا ابتکاری انجام شد. منطقه مورد مطالعه استان قزوین، به دلیل وجود پتانسیل بالا برای بهره‌برداری از انرژی بادی انتخاب شد. در مرحله اول مکان‌یابی، معیارها، فاکتورها و قیود مؤثر بررسی و تعیین شدند. به منظور مکان‌یابی نیروگاه بادی دو معیار محیطی و اقتصادی و پنج فاکتور سرعت باد، کاربری اراضی، فاصله از مناطق مسکونی، فاصله از خطوط برق و فاصله از راه‌های اصلی انتخاب شدند. پس از تعیین معیارها، نقشه‌های فاکتور در محیط *GIS* و با استفاده از تحلیل‌های مکانی تولید و سپس با استفاده از روش *AHP* وزن دهی شدند. در انتها این نقشه‌های با شاخص *LSI* با یکدیگر تلفیق و نقشه تناسب محیطی تولید شد. مطابق با نقشه‌های سرعت باد، مناطق شمال غربی و غرب استان به دلیل وجود سرعت باد کافی و توپوگرافی مناسب، برای احداث مزرعه بادی مناسب هستند. همان‌طور که در نقشه تناسب محیطی مشاهده می‌شود، مساحت حدود ۱۴۴۸۴٫۶ کیلومترمربع دارای امتیاز ۱، مساحت حدود ۲۴۱٫۲ کیلومترمربع دارای امتیاز ۲، مساحت حدود ۵۶۳٫۰۴کیلومترمربع دارای امتیاز ۳ و مساحت حدود ۲۹۸٫۴۴ کیلومترمربع دارای امتیاز ۴ برای احداث نیروگاه بادی است که بیشتر در شمال غربی و جنوب غربی استان واقع شده است. در مرحله دوم، ۳۰ گزینه مستعد برای نصب نیروگاه بادی تعیین و با استفاده از الگوریتم ژنتیک در شبکه برق تخصیص داده شدند. خروجی الگوریتم ژنتیک که در جدول (۵) آورده شده است، نشان‌دهنده بهترین گزینه‌ها و پست‌های اتصالی است. همچنین توزیع مکانی گزینه و پست‌های انتخابی برای احداث نیروگاه بادی در تمامی سناریوها در شکل(۸) نمایش داده شده است.

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-12]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1400.9.1.3.0]
[DOI: 10.52547/jgit.9.1.85]

جدول ۵: خروجی نهایی تخصیص نیروگاه بادی با استفاده از الگوریتم ژنتیک

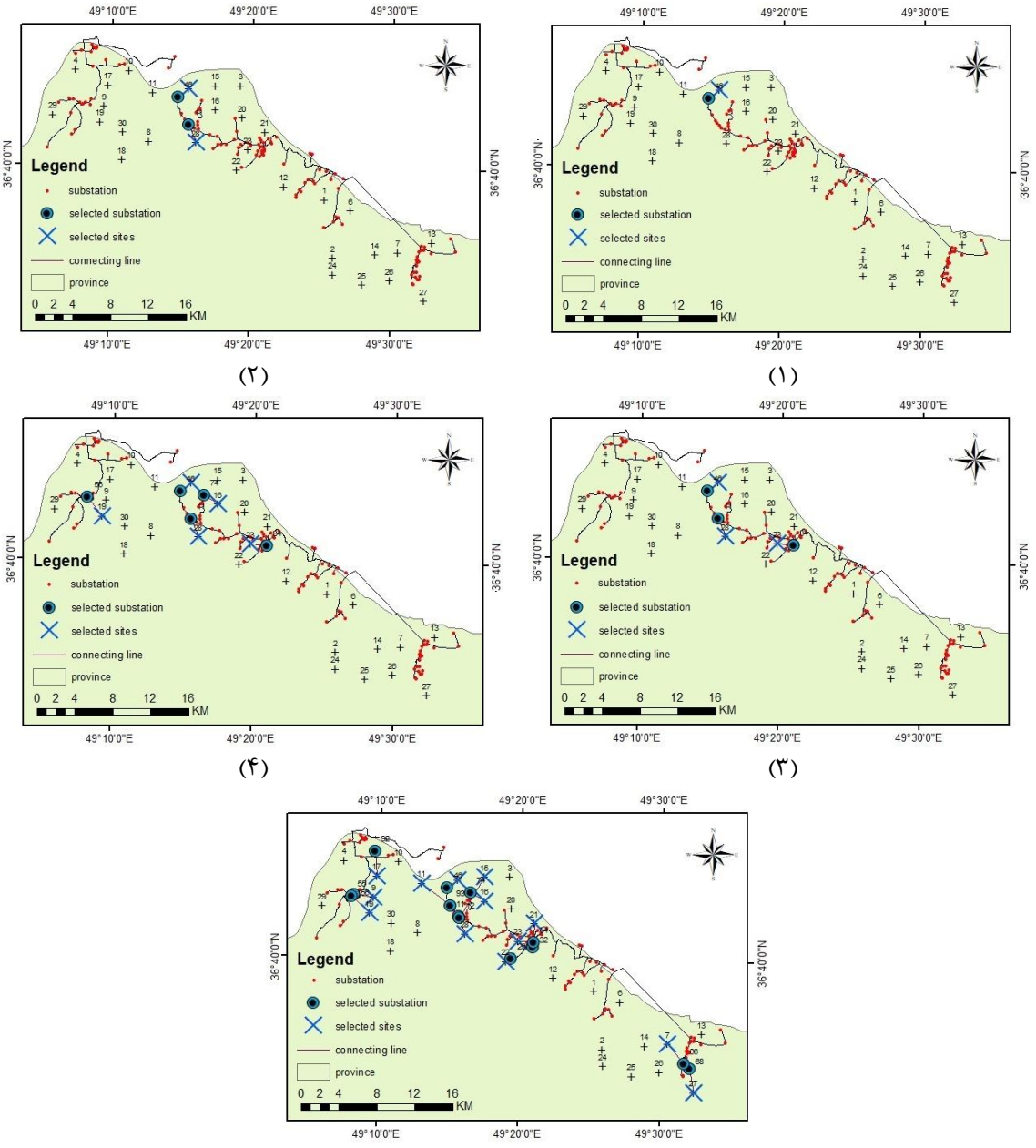
شماره مرحله	شماره گزینه	شماره پست برق	شماره مرحله	شماره گزینه	شماره پست برق
۱	۵	۴۶	۱۳	۱۱	۹۳
۲	۵	۴۶		۹	۵۶
	۲۸	۱۱		۱۷	۹۲
۳	۵	۴۶		۱۹	۵۵
	۲۸	۱۱		۷	۶۶
	۲۳	۳۴		۱۶	۷۴
⋮	⋮	⋮		۱۵	۱۲
۵	۲۸	۱۱		۲۳	۳۴
	۱۶	۷۴		۲۸	۱۱
	۲۳	۳۴		۲۷	۶۸
	۱۹	۵۶		۲۲	۲۶
	۵	۴۶		۲۱	۳۲
⋮	⋮	⋮		۵	۴۶

مقادیر تابع بهینگی در جدول (۶) آورده شده است. با بررسی این مقادیر متوجه می‌شویم که مجموع دو تابع f_2 و f_3 از مقادیر اختصاص‌یافته به f_1 بیشتر هستند. این دو تابع برای برآورده ساختن اهداف موردنظر، باید بیشینه شوند اما چون تابع هدف کلی در این تحقیق کمینه‌سازی می‌شود، این دو تابع با علامت منفی در تابع هدف نمایان می‌شوند. به همین دلیل، خروجی تابع هدف مقداری منفی خواهد بود. برای کاهش تأثیرات این دو تابع می‌توان وزن نسبت داده شده به آن‌ها در تابع هدف را کاهش داد. از آنجا که گزینه‌ها در مناطق با پتانسیل بالا انتخاب شده‌اند، خروجی تابع f_2 مقادیر نزدیک به ۱ (ماکزیمم) را اتخاذ کرده است. علت مقادیر بالای تابع f_3 نیز در مقادیر بهینگی، وجود تعداد بالای پست‌های برقی است که تأمین‌کننده بیشترین مقدار بار هستند.

جدول ۶: مقادیر عدد بهینگی در آخرین مورد تخصیص

مرحله	f_1	f_2	f_3
۱	۰٫۰۱۹۹	۱	۱
۲	۰٫۰۲۷۴	۱	۱
۳	۰٫۰۲۷۲	۰٫۹۹۳۲	۱
⋮	⋮	⋮	⋮
۵	۰٫۰۳۱۵	۰/۹۹۱۴	۱
⋮	⋮	⋮	⋮
۱۳	۰٫۰۴۳۲	۰٫۹۸۵۹	۰٫۹۰۰۵

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-12]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1400.9.1.3.0]
[DOI: 10.52547/jgit.9.1.85]



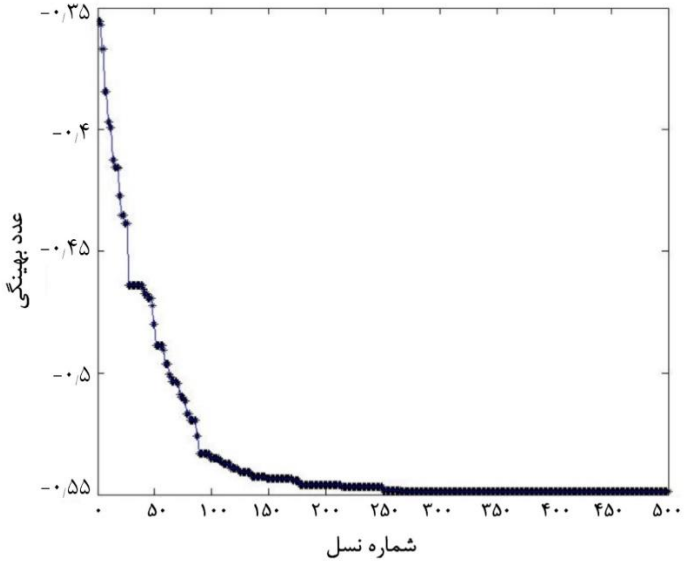
شکل۸: نمایش مکانی خروجی تخصیص نیروگاه بادی با استفاده از الگوریتم ژنتیک در حالت (۱)۱ نیروگاه بادی، (۲) ۲ نیروگاه بادی (۳) ۳ نیروگاه بادی (۴) ۵ نیروگاه بادی (۵) ۱۳ نیروگاه بادی

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-12]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1400.9.1.3.0]
[DOI: 10.52547/jgit.9.1.85]

۵- نتیجه‌گیری

سیستم اطلاعات مکانی به دلیل توانایی بالا در تعامل با معیارها به عنوان یک ابزار قوی در برنامه‌ریزی‌های مکانی و مدیریتی شناخته شده است [۱۳]. در این تحقیق از تحلیل‌های مکانی *GIS* و روش *AHP*، که یکی از روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره است، برای تولید و تلفیق نقشه‌های فاکتور استفاده شد. همان‌طور که در نقشه تناسب محیطی مشاهده می‌شود، حدود ۲٪ از منطقه که بیشتر از قسمت‌های شمال غربی استان واقع هستند، دارای امتیاز بالا برای احداث نیروگاه بادی هستند. سپس ۳۰ گزینه به عنوان بهترین گزینه برای احداث نیروگاه و اتصال آن به شبکه برق انتخاب و با استفاده از الگوریتم ژنتیک در حضور اهداف کاهش تلفات در خطوط اتصال نیروگاه به پست برق، افزایش تناسب محیطی گزینه و افزایش بار قابل تأمین توسط پست برق، در شبکه برق تخصیص داده شدند. تخصیص این گزینه‌ها در ۱۳ سناریو انجام شد؛ در سناریوی اول، تخصیص ۱ واحد، سناریوی دوم، تخصیص ۲ واحد تا سناریوی سیزده که تخصیص ۱۳ واحد نیروگاه در شبکه برق صورت گرفت. در بیشتر مطالعات انجام شده، از عملگر نخبه‌گرایی و تولید کروموزوم تصادفی در الگوریتم ژنتیک استفاده نشده است. الگوریتم پیاده‌سازی شده در این تحقیق، دارای احتمال جهش در کروموزوم و ژن و همچنین تولید کروموزوم تصادفی در هر نسل است که باعث همگرایی سریع‌تر الگوریتم به جواب می‌شود. همچنین با بررسی نمودار عملکرد الگوریتم پیاده‌سازی شده که در شکل(۹) نمایش داده شده است، متوجه می‌شویم که با پیشروی نسل‌ها، عدد بهینگی به سمت جواب بهینه پیش می‌رود و سپس از یک نسل به بعد، به یک مقدار خاص همگرا می‌شود که نشان‌دهنده عملکرد صحیح الگوریتم است.

واضح است که این تحقیق دارای مشکلاتی است و رفع این مشکلات در مطالعات آینده پیشنهاد می‌شود که از آن جمله می‌توان به استفاده از توابع دیگر فاصله، در نظر گرفتن کاربری اراضی در حد فاصل نیروگاه تا پست برق، استفاده از روش‌های دیگر وزن‌دهی، متغیر در نظر گرفتن ظرفیت نیروگاه‌ها و استفاده از پارامترهای دیگر در ژنتیک اشاره نمود.



شکل ۹: نمایش همگرایی تابع بهینگی در آخرین مورد تخصیص نیروگاه بادی

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-12]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1400.9.1.3.0]
[DOI: 10.52547/jgit.9.1.85]

مراجع

[1] A. Asakereh, M. Soleymani, and M. J. Sheikhdavoodi, "A GIS-based Fuzzy-AHP method for the evaluation of solar farms locations: Case study in Khuzestan province, Iran," Solar Energy, vol. 155, pp. 342-353, 2017.

[2] P. Dondi, D. Bayoumi, C. Haederli, D. Julian, and M. Suter, "Network integration of distributed power generation," Journal of power sources, vol. 106, no. 1-2, pp. 1-9, 2002.

[3] R. Prenc, D. Škrlec, and V. Komen, "Distributed generation allocation based on average daily load and power production curves," International journal of electrical power & energy systems, vol. 53, pp. 612-622, 2013.

[4] Z. Abdmouleh, A. Gastli, L. Ben-Brahim, M. Haouari, and N. A. Al-Emadi, "Review of optimization techniques applied for the integration of distributed generation from renewable energy sources," Renewable Energy, vol. 113, pp. 266-280, 2017.

[5] A. Konak, D. W. Coit, and A. E. Smith, "Multi-objective optimization using genetic algorithms: A tutorial," Reliability Engineering & System Safety, vol. 91, no. 9, pp. 992-1007, 2006.

[6] H. M. Prasanna, M. L. Kumar, and T. Ananthapadmanabha, "Genetic algorithm based optimal allocation of a distributed generator in a radial distribution feeder," in Circuit, Power and Computing Technologies (ICCPCT), 2014 International Conference on, 2014: IEEE, pp. 184-190.

[7] C. L. Borges and D. M. Falcao, "Optimal distributed generation allocation for reliability, losses, and voltage improvement," International Journal of Electrical Power & Energy Systems, vol. 28, no. 6, pp. 413-420, 2006.

[8] Y. Alinejad-Beromi, M. Sedighizadeh, M. Bayat, and M. Khodayar, "Using genetic alghoritm for distributed generation allocation to reduce losses and improve voltage profile," in Universities Power Engineering Conference, 2007. UPEC 2007. 42nd International, 2007: IEEE, pp. 954-959.

[9] H. E. Talaat and E. Al-Ammar, "Optimal allocation and sizing of Distributed Generation in distribution networks using Genetic Algorithms," in Electrical Power Quality and Utilisation (EPQU), 2011 11th International Conference on, 2011: IEEE, pp. 1-6.

[10] M. H. Moradi and M. Abedini, "A combination of genetic algorithm and particle swarm optimization for optimal DG location and sizing in distribution systems," International Journal of Electrical Power & Energy Systems, vol. 34, no. 1, pp. 66-74, 2012.

[11] S. Busam, S. Hota, G. N. Kumar, and R. S. K. Naidu, "Multiobjective optimization of radial distribution system with multiple distributed generation units using genetic algorithm," in 2015 International Conference on Electrical, Electronics, Signals, Communication and Optimization (EESCO), 2015.

[12] G. Celli and F. Pilo, "Optimal distributed generation allocation in MV distribution networks," in Power Industry Computer Applications, 2001. PICA 2001. Innovative Computing for Power-Electric Energy Meets the Market. 22nd IEEE Power Engineering Society International Conference on, 2001: IEEE, pp. 81-86.

[13] D. Latinopoulos and K. Kechagia, "A GIS-based multi-criteria evaluation for wind farm site selection. A regional scale application in Greece," Renewable Energy, vol. 78, pp. 550-560, 2015.

[14] M. A. Anwarzai and K. Nagasaka, "Utility-scale implementable potential of wind and solar energies for Afghanistan using GIS multi-criteria decision analysis,"

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-12]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1400.9.1.3.0]
[DOI: 10.52547/jgit.9.1.85]

Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016.

[15] M. Zoghi, A. H. Ehsani, M. Sadat, M. javad Amiri, and S. Karimi, "Optimization solar site selection by fuzzy logic model and weighted linear combination method in arid and semi-arid region: A case study Isfahan-IRAN," Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015.

[16] P. V. Gorsevski, S. C. Cathcart, G. Mirzaei, M. M. Jamali, X. Ye, and E. Gomezdelcampo, "A group-based spatial decision support system for wind farm site selection in Northwest Ohio," Energy Policy, vol. 55, pp. 374-385, 2013.

[17] Y. Noorollahi, H. Yousefi, and M. Mohammadi, "Multi-criteria decision support system for wind farm site selection using GIS," Sustainable Energy Technologies and Assessments, vol. 13, pp. 38-50, 2016.

[18] G. Villacreses, G. Gaona, J. Martínez-Gómez, and D. J. Jijón, "Wind farms suitability location using geographical information system (GIS), based on multi-criteria decision making (MCDM) methods: The case of continental Ecuador," Renewable Energy, vol. 109, pp. 275-286, 2017.

[19] T. Höfer, Y. Sunak, H. Siddique, and R. Madlener, "Wind farm siting using a spatial Analytic Hierarchy Process approach: A case study of the Städteregion Aachen," Applied energy, vol. 163, pp. 222-243, 2016.

[20] M. Tahri, M. Hakdaoui, and M. Maanan, "The evaluation of solar farm locations applying Geographic Information System and Multi-Criteria Decision-Making methods: Case study in southern Morocco," Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 51, pp. 1354-1362, 2015.

[21] A. N. Arnette and C. W. Zobel, "Spatial analysis of renewable energy potential in the greater southern Appalachian mountains," Renewable Energy, vol. 36, no. 11, pp. 2785-2798, 2011.

[22] Ş. Şener, E. Şener, B. Nas, and R. Karagüzel, "Combining AHP with GIS for landfill site selection: a case study in the Lake Beyşehir catchment area (Konya, Turkey)," Waste management, vol. 30, no. 11, pp. 2037-2046, 2010.

[23] S. Boroushaki and J. Malczewski, "Implementing an extension of the analytical hierarchy process using ordered weighted averaging operators with fuzzy quantifiers in ArcGIS," Computers & Geosciences, vol. 34, no. 4, pp. 399-410, 2008.

[24] T. Saaty, "The analytic hierarchy process: a 1993 overview," Central European Journal of Operation Research and Economics, vol. 2, no. 2, pp. 119-137, 1993.

[25] J. M. Sánchez-Lozano, J. Teruel-Solano, P. L. Soto-Elvira, and M. S. García-Cascales, "Geographical Information Systems (GIS) and Multi-Criteria Decision Making (MCDM) methods for the evaluation of solar farms locations: Case study in south-eastern Spain," Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 24, pp. 544-556, 2013.

[26] T. L. Saaty., The Analytic Hierarchy Process, Planning, Piority Setting, Resource Allocation. New york: McGraw-Hill, 1980.

[27] M. Uyan, "GIS-based solar farms site selection using analytic hierarchy process (AHP) in Karapinar region, Konya/Turkey," Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 28, pp. 11-17, 2013.

[28] H. Yousefi, A. Kasaeian, P. Ranjbaran, and M. H. Katouli, "A Review of the Criteria for Locating of Solar Power Plants in Iran," (in eng), Geospatial Engineering Journal, Research vol. 8, no. 2, pp. 25-38, 2017. [Online]. Available: http://gej.issge.ir/article-1-212-fa.html.

[29] P. Prakash and D. K. Khatod, "Optimal sizing and siting techniques for distributed

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-12]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1400.9.1.3.0]
[DOI: 10.52547/jgit.9.1.85]

generation in distribution systems: A review," Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 57, pp. 111-130, 2016.

[30] Y. Alinejad-Beromi, M. Sedighizadeh, M. Bayat, and M. Khodayar, "Using genetic alghoritm for distributed generation allocation to reduce losses and improve voltage profile," in 2007 42nd International Universities Power Engineering Conference, 2007: IEEE, pp. 954-959.

[31] N. M. Razali and J. Geraghty, "Genetic algorithm performance with different selection strategies in solving TSP," in Proceedings of the world congress on engineering, 2011, vol. 2, pp. 1134-1139.

[32]K. Mohammadi, A. Mostafaeipour, Y. Dinpashoh, and N. Pouya, "Electricity generation and energy cost estimation of large-scale wind turbines in Jarandagh, Iran," Journal of Energy, vol. 2014, 2014.

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-12]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1400.9.1.3.0]
[DOI: 10.52547/jgit.9.1.85]

K. N. TOOSI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY
FACULTY OF GEODESY AND GEOMATICS ENGINEERING

Journal of Geospatial Information Technology
Vol.9 No.1, Spring 2021

Research Paper

Wind Farms Site Selection and Allocation In Power Distribution Network Using Environmental, Economic and Technical Factors

Mina Sadeghi [1]*, Mohammad Karimi [2]

1- Ms.c graduate of GIS in Department of Geodesy and Geomatics Engineering, K.N. Toosi University of Technology
2- Associate professor in Department of Geodesy and Geomatics Engineering, K.N. Toosi University of Technology

Abstract

Increasing demand for electricity and consequently running out of fossil fuel resources and negative impact of fossil fuels on the environment has led to the need for finding renewable energy sources. Iran has high potentiality in exploiting wind energy because of its topology and various climatic conditions. For this purpose, optimal places for installing these facilities should be determined. The purpose of this research is to evaluate land suitability for constructing wind farms using Geographic information system (GIS) and Multi-criteria decision-making method (MCDM) and to find optimal sites for wind farm development using Genetic Algorithm and to add it to the medium voltage power network. In the first step, we determine the effective environmental factors, criteria and constraints. The factors that we considered in this research sort into two categories: environmental and economic. Then, the criteria and factors were weighted using the AHP method, the factor maps were made and then combined in GIS environment using land suitability index, and finally thirty suitable sites were selected for installing the facilities. In the next step, these candidates were allocated to power system using genetic algorithm in 13 cases with the goal of minimizing power loss, maximizing the suitability of the candidates and maximizing the load supply. For instance, in each case, the allocation of one more Dg will be added in order to eliminate the power plant totally. Based on the suitability maps, northwestern and western parts of the region are suitable for wind farm development. The allocation of the candidate sites will be done using genetic algorithm. The output of the algorithm will be the DG ID and the substation ID to which the Dg will be connected.

Key words: *Wind turbin, AHP, GIS, Site selection, Genetic algorithm.*

Correspondence Address *: GIS Group, Department of Geodesy and Geomatics Engineering, K.N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran.*
Tel*: +98 9124988797*
Email*: m.sdgh93@gmail.com*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-12]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1400.9.1.3.0]
[DOI: 10.52547/jgit.9.1.85]