

تاریخ دریافت: ۱۲ فروردین ۱۴۰۲ تاریخ پذیرش: ۳۱ خرداد ۱۴۰۲ صفحات ۱۳۱ الی ۱۷۴

بهینه سازی چندهدفه مکان یابی تخصیص احداث نیروگاه های خورشیدی

برای تامین تقاضای برق

حمیدرضا سرچاهی

دانشجوی ارشد مدیریت صنعتی دانشگاه فردوسی مشهد، hamidreza.sarchahi۱۹۹۶@gmail.com

روح اله باقری*

استادیار گروه مدیریت دانشگاه فردوسی مشهد، rbagheri@um.ac.ir

علیرضا پویا

استاد گروه مدیریت دانشگاه فردوسی مشهد، alirezapooya@um.ac.ir

چکیده: بکارگیری منابع انرژی تجدیدپذیر و به خصوص احداث نیروگاههای خورشیدی می تواند راهکاری برای پایان دادن به دو بحران خاموشی ناشی از کمبود برق و مازوت سوزی در نیروگاهها باشد. هدف این پژوهش بهینه سازی چندهدفه مکان یابی تخصیص احداث نیروگاه های خورشیدی برای تامین تقاضای برق است. در توابع هدف مسئله هزینه های اقتصادی، محدودیت در خطوط انتقال و انتشار گازهای گلخانه ای کمینه شده و همچنین مناطق تحت پوشش بیشینه شده است. برای حل مسئله بهینه سازی چندهدفه از روش ال پی متریک در نرم افزار گمز استفاده شده است. اعتبارسنجی مدل ریاضی مورد ارزیابی قرار گرفته و با ارائه مثال عددی پیچیده بودن مسئله کارایی الگوریتم ژنتیک چندهدفه در ابعاد کوچک و بزرگ بررسی شده است. در نهایت احداث نیروگاه خورشیدی در منطقه کاشان، آران و بیدگل مورد مطالعه قرار گرفته است. مدل نهایی این روش می تواند برای یاری رساندن به مدیران و تصمیم گیران شرکت های سرمایه گذاری و تولید کننده برق در احداث نیروگاه های خورشیدی استفاده گردد.

واژگان کلیدی: الگوریتم ژنتیک، بهینه سازی چندهدفه، مکان یابی تخصیص، نیروگاه خورشیدی

۱. مقدمه

مصرف برق در جهان به دلیل رشد جمعیت و همچنین افزایش تولید ناخالص داخلی و پیشرفت‌های صنعتی در حال افزایش فزاینده است. برای تامین این تقاضا از نیروگاه‌های پایه سوخت فسیلی (ذغال سنگ، نفت و گاز طبیعی) استفاده می‌شود و جبران افزایش تقاضا به وسیله سوخت‌های فسیلی باعث افزایش آلودگی و انتشار گازهای گلخانه‌ای می‌شود. لذا با توجه به نیاز روزافزون به منابع انرژی و کم شدن منابع انرژی فسیلی، ضرورت سالم نگه داشتن محیط زیست، کاهش آلودگی هوا، تامین نشدن انرژی الکتریکی و قطع برق مشترکان، عواقب جبران ناپذیری را در پی دارد. قطعی برق در بخش صنعت توقف تولید و کاهش GDP، در بخش مسکونی کاهش رفاه اجتماعی، در بخش تجاری تعطیلی کسب و کارها و افزایش بیکاری را در پی دارد و همچنین این عواقب در بخش خدمات حساس مانند بیمارستان‌ها ممکن است جبران ناپذیر باشد از این رو افزایش قابلیت اطمینان شبکه امری حیاتی است. [۱]

طبق گزارش اتاق بازرگانی تهران [۲]، تامین تقاضای برق از نیروگاه‌های مبتنی بر سوخت‌های فسیلی و غفلت از اصلاح ساختار اقتصادی برق و عدم سرمایه‌گذاری جدید منجر به تکرار خاموشی‌ها و عدم اطمینان بالا در تابستان و آلودگی هوا با مازوت سوزی و افزایش گازهای گلخانه‌ای در زمستان شده است. دولت در سال‌های اخیر به سمت نیروگاه‌سازی متمایل بوده ولی به دلیل عدم استقبال سرمایه‌گذاران از اهداف عقب مانده است. کاهش توان تولید برق از نیروگاه‌های برق - آبی به دلیل تغییرات اقلیمی دست دولت را برای مقابله با خاموشی بسته است و همچنین کشور ایران به واسطه ناتوانی در تامین گاز نیروگاه‌ها مجبور است در زمستان از سوخت مازوت استفاده کند و همین عامل نیز زمینه افزایش آلاینده‌گی در کلان‌شهرها را به وجود خواهد آورد. حال در شرایطی که امکان راه‌اندازی سریع نیروگاه وجود ندارد و سرمایه‌گذاری در بخش نیروگاه‌سازی بالا نیست، حرکت به سمت توسعه تولید برق تجدیدپذیر و به خصوص احداث نیروگاه‌های خورشیدی می‌تواند یکی از راهکارهای

مهم دنیای پیشرفته صنعتی باشد تا به صورت پایدار مشکل خاموشی و مازوت سوزی را حل کند. با توجه به کاهش هزینه تولید برق از پنل‌های خورشیدی که به لطف توسعه تکنولوژی در سال‌های اخیر محقق شده است و توسعه نیروگاه‌های برق با کمک پنل‌های خورشیدی مدرن دور از دسترس نیست.

بنابراین در این پژوهش تامین تقاضای برق از سوخت‌های فسیلی که منجر به دو بحران خاموشی و مازوت سوزی شده است، راهکار استفاده از منابع تجدیدپذیر به خصوص احداث نیروگاه‌های خورشیدی ارائه شد و براساس مطالب بیان شده، به دنبال طراحی مدل بهینه سازی چندهدفه مکان‌یابی تخصیص احداث نیروگاه‌های خورشیدی هستیم که چهار هدف اقتصادی، زیست محیطی، قابلیت اطمینان و اجتماعی را دنبال می‌کند و در نهایت به دنبال اثبات صحت این مدل بهینه مکان‌یابی هستیم. در این پژوهش از نتایج مدل سازی مکان‌یابی بهینه براساس اهداف تعیین شده می‌توان برای یاری رساندن به مدیران و تصمیم‌گیران شرکت‌های سرمایه‌گذاری و تولیدکننده برق در احداث نیروگاه‌های خورشیدی استفاده نمود. برای رسیدن به این هدف باید به پاسخگویی به این سوال اساسی پرداخت که چگونه می‌توان مکان‌یابی بهینه و مناسبی را برای احداث نیروگاه خورشیدی در کشور انجام داد؟ طراحی مدل بهینه مکان‌یابی تخصیص محل احداث نیروگاه‌های خورشیدی برای تامین تقاضای برق چگونه است؟

۲. پیشینه ی پژوهش

جدول ۱ نتایج مرور پیشینه پژوهش را در رابطه با بهینه سازی چند هدفه در تامین تقاضای برق نشان می‌دهد. مرور پیشینه پژوهش در زمینه بهینه سازی چندهدفه در تامین تقاضای برق نشان از این است که مطالعه‌های کمی در صنعت برق در این زمینه انجام شده است. در بین مطالعات انجام شده، کیو و لو [۳] اولین کسانی بودند که به مسئله طراحی زنجیره تامین برق به عنوان یک مسئله بهینه سازی چندهدفه و چند دوره‌ای تحت عدم قطعیت تامین سوخت و تقاضای برق حل کرده و به حداکثر

سازی سود و به حداقل رسانی تفاوت بین حجم تقاضا و حجم برق تحویل داده شده توجه کردند. وانس و همکاران [۴] از نظریه گراف برای ایجاد یک نمایش گرافیکی از زنجیره تامین استفاده کردند که در آن از انرژی‌های تجدیدپذیر و همچنین نیروگاه‌های سوخت فسیلی در تولید برق استفاده می‌شود. هدف از مدل آن‌ها کاهش هزینه کل و دنبال کردن اهداف کاهش تاثیرات زیست محیطی و آلاینده‌گی بود. عثمانی و ژانگ [۵] یک شبکه زنجیره تامین برق طراحی کرده و مسئله زنجیره تامین را به صورت یک مسئله دومرحله‌ای تصادفی ترکیبی تعریف کردند که از انرژی تجدیدپذیر باد و زیست توده به عنوان منابع انرژی تجدیدپذیر استفاده شد. ماهیت تناوبی انرژی باد و افت و خیز در قیمت برق به عنوان منابع عدم قطعیت در نظر گرفتند. ژین لیانگ تان و همکاران [۶] یک مدل بهینه‌سازی چند هدفه غیرخطی ارائه کردند. هدف از این کار تعیین مقدار بهینه تولید برق و همچنین نسبت اختلاط ایده آل، مقدار و قیمت هر نوع سوخت است تا حداکثر سود حاشیه‌های نیروگاه‌های زیست توده را به حداکثر برساند و بیشترین حفاظت ممکن را ارائه دهند. جبارزاده و همکاران [۷] یک روش بهینه‌سازی قوی و چندهدفه را برای طراحی یک زنجیره تامین سبز و انعطاف پذیر به کار گرفتند و سه هدف اقتصادی، زیست محیطی و تاب آوری را برای شبکه‌های برق هوشمند مدنظر قرار دادند و نتیجه گرفتند که هدف زیست محیطی در تضاد با هدف اقتصادی است. خلیل پور تیلیمی و همکاران [۸] یک مسئله بهینه‌سازی دوهدفه برای تامین تقاضای برق با استفاده از منابع تجدیدپذیر مانند صفحه‌های فتوولتائیک و توربین‌های بادی در نظر گرفتند. تابع هدف‌های مسئله حداقل کردن هزینه و حداکثر کردن قابلیت اطمینان می‌باشد. برای حل از الگوریتم فراابتکاری استفاده کردند و مجموعه پارتو بهینه‌ای بدست آمد که بسته به نظر تصمیم‌گیرنده هر کدام از مجموعه جواب‌های مجموعه پارتو می‌تواند به عنوان جواب بهینه در نظر گرفته شود. باقری و همکاران [۹] یک مدل ریاضی برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط دوهدفه که اهداف اقتصادی و زیست محیطی را دنبال می‌کنند به طوری که بتوان تاثیر استفاده از منابع تجدیدپذیر را بر روی میزان سود حاصل شده از فروش انرژی، میزان انتشار گازهای آلاینده و مصرف سوخت مورد

استفاده نیروگاه‌ها را بررسی نمود. در نهایت به این نتیجه رسیدند که در هر دو رویکرد اقتصادی و یا زیست محیطی نیروگاه‌های با ظرفیت زیاد سهم بیشتری در تامین تقاضای شبکه دارند. یوچانگ تسو و همکاران [۱۰] یک رویکرد برنامه نویسی تصادفی فازی چند منظوره برای به حداقل رساندن هزینه‌های اقتصادی، زیست محیطی و اجتماعی شبکه تحت سناریوهای پارامترهای نامشخص ارائه کردند و به این نتیجه رسیدند که پاسخ تقاضا با قیمت گذاری پویا، هزینه‌های زیست محیطی و اجتماعی را تا ۳ درصد کاهش می‌دهد. حسینی مطلق و همکاران [۱۱] در طراحی مدل بهینه‌سازی چندهدفه خود به ترتیب اهداف اقتصادی، تاب آوری و مسئولیت اجتماعی شرکتی را در نظر گرفتند و راهبردی نوآورانه برای یک زنجیره تامین پایدار - انعطاف پذیر معرفی کردند و به این نتیجه رسیدند که در نظر گرفتن مسئولیت اجتماعی و انعطاف پذیری می‌تواند هزینه را تا ۵۰ درصد افزایش دهد. قربانخانی و همکاران [۱] یک روش کارآمد برای برنامه ریزی توسعه زنجیره تامین برق با نفوذ تولیدات تجدیدپذیر ارائه کردند. این مدل در کنار فاکتورهای قیمتی، معیار امنیتی، قابلیت اطمینان عرضه انرژی به عنوان هدف اجتماعی و بحث کاهش آلاینده‌های زیست محیطی را در نظر گرفته است و نتایج ارائه شده نشان داد که انواع عدم قطعیت‌ها باعث افزایش هزینه سرمایه گذاری می‌شود و از طرفی با افزایش میزان بار مجاز قابل قطع، این هزینه کاهش پیدا می‌کند.

جدول ۱. نتایج بررسی پیشینه پژوهش

| نام نویسندگان | روش مدل سازی | نوع روش حل | اهداف |
|-----------------------|--------------|------------|--------------------|
| کیو و لو (۲۰۱۱) | غیرخطی | قطعی | اقتصادی/زیست محیطی |
| وانس و همکاران (۲۰۱۳) | غیرخطی | قطعی | اقتصادی/زیست محیطی |
| عثمانی و ژانگ (۲۰۱۴) | خطی | تصادفی | اقتصادی |

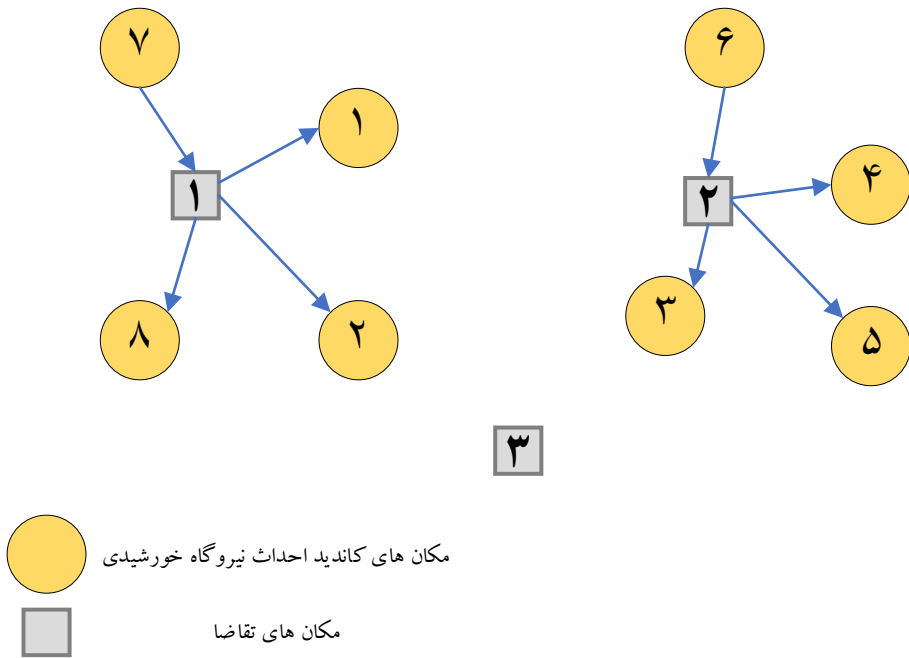
| | | | |
|---|--------|--------|-------------------------------------|
| اقتصادی / قابلیت اطمینان | قطعی | غیرخطی | ژین لیانگ تان و همکاران (۲۰۱۷) |
| اقتصادی / اجتماعی / زیست محیطی | قطعی | خطی | جبارزاده و همکاران (۲۰۱۷) |
| اقتصادی / قابلیت اطمینان | تصادفی | غیرخطی | خلیل پور تیلیمی و همکاران (۲۰۱۸) |
| اقتصادی / زیست محیطی | تصادفی | خطی | باقری و همکاران (۲۰۱۹) |
| اقتصادی / اجتماعی / زیست محیطی | تصادفی | خطی | یوچانگ تسو و همکاران (۲۰۱۹) |
| اقتصادی / اجتماعی / زیست محیطی | قطعی | خطی | حسینی مطلق و همکاران (۲۰۲۰) |
| اقتصادی / اجتماعی / زیست محیطی / امنیتی | تصادفی | خطی | قربانخانی و همکاران (۲۰۲۱) |

در این تحقیق در مقایسه با تحقیقات گذشته، با توجه به بیان مسئله چهار هدف اقتصادی، زیست محیطی، قابلیت اطمینان و اجتماعی را دنبال می‌کند. روش مدل سازی ریاضی مسئله خطی می‌باشد و نوع روش حل قطعی می‌باشد. وجه اشتراک بین این تحقیق و تحقیقات پیشین در طراحی مدل بهینه سازی چندهدفه است و در این تحقیقات بسته به نوع مسئله در اهداف، محدودیت‌ها، روش مدل سازی و نوع روش حل متفاوت می‌باشند. در این تحقیق برای مکان یابی محل احداث نیروگاه‌های خورشیدی، مسئله از نوع مکان یابی تخصیص می‌باشد.

در این مسئله چهار تابع هدف وجود دارد. در تابع هدف مسئله هزینه‌های سیستم، مقدار اختلال در خطوط و مقدار گازهای گلخانه‌ای کمینه شده و همچنین مقدار مناطق تحت پوشش بیشینه می‌شود. بنابراین در تابع هدف این مسئله، هم کمینه‌سازی و هم بیشینه‌سازی وجود خواهد داشت. همچنین برای احداث این نیروگاه‌ها محدودیت بودجه در نظر گرفته شده و هر نیروگاه توان تولید مشخصی خواهد داشت. یکی از نکات مهمی که وجود دارد این موضوع است که احتمال اختلال در شبکه وجود داشته و این اختلال به فاصله بین نیروگاه و مناطق جمعیتی و ضریب اختلال بستگی خواهد داشت. همچنین تعداد نیروگاه‌های خورشیدی مجاز نیز مشخص و حداکثر فاصله نیروگاه از مکان تقاضا دارای محدودیت خواهد بود.

۳. روش شناسی پژوهش

در این پژوهش، تعدادی مناطق کاندید وجود دارد که در این مکان‌ها امکان احداث نیروگاه‌های خورشیدی وجود دارد. همچنین مکان‌های تقاضایی در این مسئله وجود دارد که این مکان‌های تقاضا به مکان‌های کاندید نیروگاه خورشیدی تخصیص داده می‌شود. بنابراین ابتدا مشخص می‌گردد که هریک از این مکان‌ها کاندید احداث شده و سپس هرکدام از مناطق جمعیتی به نیروگاه‌های خورشیدی تخصیص داده می‌شود. در این پژوهش به دلیل اینکه هدف طراحی مدل بهینه است و با بیش از یک هدف مواجه هستیم، از مدل تصمیم‌گیری چندهدفه (MODM) استفاده می‌کنیم، بنابراین همه این اهداف به صورت همزمان بهینه می‌شوند.



شکل ۱. نمایش شماتیک مسئله

مجموعه ها

J : مکان های کاندید برای احداث نیروگاه های خورشیدی

i : مناطق و مکان های تقاضا

پارامترها

e_i : مقدار تقاضای هر منطقه تقاضای i

n : حداکثر تعداد کل نیروگاه های J

f : مقدار تقاضای پوشش داده نشده مجاز

cap_j : ظرفیت تولید هر نیروگاه j

D_{ij} : فاصله مجاز نیروگاه j تا مرکز تقاضا i

bud : حداکثر بودجه مجاز

dx_{ij} : حداکثر فاصله مکان i از نیروگاه j

z_j : هزینه مسافت نیروگاه j

$cost_{ij}^y$: هزینه گسترش خطوط انتقال بین مکان‌های i و نیروگاه j

$cost_j^l$: هزینه ثابت احداث نیروگاه j

q_j : مقدار انتشار گازهای گلخانه‌ای منتشر شده در اثر احداث نیروگاه j

α_{ij} : احتمال اختلال در هر کیلومتر خطوط انتقال بین مکان i و نیروگاه j

M : عدد بزرگ دلخواه

متغیرهای تصمیم‌گیری

D_j : مقدار تقاضای نیروگاه خورشیدی j

A_j : مقدار صفر و یک، اگر نیروگاه خورشیدی j احداث شده باشد برابر یک، در غیراینصورت

صفر.

X_{ij} : مقدار صفر و یک، اگر مکان تقاضای i به نیروگاه خورشیدی j تخصیص شده باشد برابر

یک، در غیراینصورت صفر.

توابع هدف

$$۱. \min_{z_1} = \sum_j A_j \times cost_j^l + \sum_i \sum_j X_{ij} \times cost_{ij}^y$$

قسمت اول تابع هدف اول، هزینه احداث نیروگاه و قسمت دوم تابع هدف نیز شامل هزینه گسترش

خطوط می‌باشد.

$$۲. \max_{z_2} = \sum_i \sum_j X_{ij} \times e_i$$

در تابع هدف دوم، مقدار مناطق تحت پوشش بیشینه می‌گردد.

$$۳. \min_{z_3} = \sum_i \sum_j X_{ij} \times d_{ij} \times \alpha_{ij}$$

در تابع هدف سوم، مقدار اختلال در خطوط کمینه می‌گردد.

$$۴. \quad \min_{z_f} = \sum_j A_j \times q_j$$

در تابع هدف چهارم، مقدار گازهای گلخانه‌ای کمینه می‌گردد.

محدودیت‌ها

| | | |
|---|--------------------------------------|----------------|
| ۱ | $\sum_j X_{ij} \leq 1$ | $\forall i$ |
| ۲ | $D_j = \sum_i X_{ij} \times e_i$ | $\forall j$ |
| ۳ | $A_j \times M \geq D_j$ | $\forall j$ |
| ۴ | $\sum_j A_j \leq n$ | |
| ۵ | $\sum_i e_i (1 - \sum_j X_{ij}) < f$ | |
| ۶ | $D_j \leq cap_j$ | $\forall j$ |
| ۷ | $dx_{ij} \times X_{ij} \leq Dij$ | $\forall i, j$ |
| ۸ | $D_j \times cost_j^d \leq bud$ | $\forall j$ |

محدودیت اول: هر مرکز تقاضا حداکثر به یک نیروگاه تخصیص داده می‌شود.

محدودیت دوم: مقدار تقاضای هر نیروگاه خورشیدی را تعیین می‌نماید.

محدودیت سوم: اگر نیروگاهی احداث نشود، هیچ منطقه تقاضایی به آن تخصیص نمی‌شود.

محدودیت چهارم: محدودیت حداکثر تعداد نیروگاه‌های احداث شده مجاز را بررسی می‌نماید.

محدودیت پنجم: محدودیت حداکثر مقدار بار مجاز تامین نشده را بررسی می‌کند.

محدودیت ششم: اطمینان می‌دهد مقدار تولید نیروگاه از ظرفیت آن بیشتر نیست.

محدودیت هفتم: حداکثر فاصله مجاز برای انتقال بار را بررسی می‌کند.

محدودیت هشتم: اطمینان می‌دهد که حداکثر ظرفیت بودجه رعایت شده باشد.

تابع هدف کلی

در این پژوهش برای حل مسئله چند هدفه در نرم افزار گمز از تکنیک معیار جامع استفاده می‌شود. تکنیک معیار جامع، از متدولوژی مطرح در تصمیم‌گیری با معیارهای چندگانه هستند. در روش معیار جامع، بسته به مورد، مجموع انحرافات نسبی اهداف از مقدار بهینه شان را حداقل می‌کند. از آنجائیکه مدل مذکور چند هدفه است، برای حل مدل چند هدفه مذکور، از روش ال پی متریک استفاده شده است به این صورت که هر بار هر کدام از توابع هدف بهینه شده و در نهایت مقدار بهینه توابع هدف با در نظر گرفتن محدودیت‌های مسئله به وسیله روش L-P متریک محاسبه می‌شود. در روش روش L-P متریک نظرات شخصی اعمال نشده و نیازی به وزن دهی توابع هدف نیست و مقادیر توابع هدف نسبت به بهترین مقدار تابع هدف بهینه خواهد شد.

$$\min f(x) = \frac{z_1 - z_1^*}{z_1^*} + \frac{z_2^* - z_2}{z_2^*} + \frac{z_3 - z_3^*}{z_3^*} + \frac{z_4 - z_4^*}{z_4^*}$$

ارائه الگوریتم ژنتیک چند هدفه

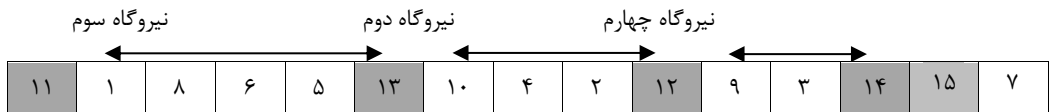
تولید جواب اولیه

در این پژوهش هر جواب اولیه شامل یک کروموزوم می باشد که این کروموزوم شامل $n+m$ خانه است که در آن n تعداد مناطق جمعیتی و m تعداد مکان های کاندید برای احداث نیروگاه های خورشیدی می باشد. در این کروموزوم یا نمایش جواب اولیه اعداد شماره ۱ تا n بیانگر مناطق جمعیتی و اعداد بزرگتر از آن نمایشگر شماره مکان کاندید احداث نیروگاه های خورشیدی است. در این قسمت اعدادی که عدد $n+i$ نمایشگر مکان کاندید احداث نیروگاه i ام است و اعدادی که قبل از آن قرار دارند نمایشگر مکان ها تقاضایی می باشد که به آن نیروگاه تخصیص داده می شود. در صورتی که هیچ کدام از این مناطق به آن نیروگاه تخصیص داده نشود به معنای این است که آن نیروگاه خورشیدی احداث نشده است.

نکته دیگر در نمایش جواب اولیه این موضوع است که تمام مکان های تقاضایی که بعد از آخرین مکان کاندید احداث نیروگاه خورشیدی قرار دارند به نیروگاه آخر تخصیص داده می شود. برای درک بهتر این مسئله یک مثال عددی ارائه شده که شامل ۱۰ منطقه جمعیتی و ۵ مکان کاندید برای احداث نیروگاه خورشیدی است. شکل شماره ۲ و جدول شماره ۲ مکان های تقاضای شماره های ۱، ۶، ۸، ۱۰ و ۵ به نیروگاه سوم و مکان های تقاضای ۲، ۴، ۱۰ به نیروگاه دوم و مکان تقاضای شماره ۹ و ۳ به نیروگاه چهارم تخصیص داده شده است. با توجه به اینکه قبل از عدد ۱۱ هیچ مکان تقاضایی قرار ندارد یعنی آن نیروگاه احداث نشده است. همچنین منطقه شماره ۷ به هیچ کدام از نقاط نیروگاه تخصیص داده نشده است.

جدول ۲. تخصیص مکان‌های تقاضا به نیروگاه‌های خورشیدی

| شماره نیروگاه | مکان تقاضا | شماره نیروگاه | مکان تقاضا |
|---------------|------------|---------------|------------|
| ۳ | ۶ | ۳ | ۱ |
| - | ۷ | ۲ | ۲ |
| ۳ | ۸ | ۴ | ۳ |
| ۴ | ۹ | ۲ | ۴ |
| ۲ | ۱۰ | ۳ | ۵ |



شکل ۲. نمایش جواب اولیه مثال فرضی

تولید جمعیت اولیه

اولین مرحله در الگوریتم ژنتیک چند هدفه، تولید جمعیت اولیه می‌باشد. مجموعه‌ای از جواب‌های شدنی به عنوان جمعیت اولیه ایجاد می‌گردد. در این پژوهش اعضای این مجموعه به صورت تصادفی انتخاب می‌شود. پس از تعیین سیستم کدینگ یا همان نمایش جواب اولیه و مشخص شدن روش تبدیل هر جواب به کروموزوم، یک جمعیت اولیه از کروموزوم‌ها تولید می‌شود.

تابع ارزیابی

به منظور ارزیابی و بررسی جواب، نیاز به یک تابع ارزیابی برای بررسی تابع هدف می‌باشد. هدف از نوشتن تابع ارزیابی به دست آوردن مقدار تابع هدف و بررسی رعایت محدودیت‌ها است. در این

مسئله، تابع ارزیابی مقدار هر چهار تابع هدف را محاسبه کرده و محدودیت‌های مسئله را بررسی می‌کند. این تابع هر رشته را با یک مقدار عددی ارزیابی می‌نماید که کیفیت آن را مشخص می‌کند. هر چه مقدار تابع هدف هر رشته در اهداف مینیمم سازی پایین‌تر و در توابع هدف ماکزیمم سازی بیشتر باشد، مقدار برازندگی جواب بهتر خواهد بود و احتمال مشارکت برای تولید نسل بعدی نیز افزایش می‌یابد. در صورتی که جواب مورد نظر محدودیت‌ها را نقض کند، مقدار نقض شده در هر محدودیت محاسبه و جمع مقادیر نقض شده با یک عدد ثابت جریمه در توابع هدف وارد شود که در توابع هدف ماکزیمم باید کسر شود و در توابع هدف مینیمم این جریمه باید اضافه شود. در این قسمت برای بررسی عدد ثابت ضرب شده یک مثال عددی ایجاد شده و به وسیله الگوریتم حل می‌شود. در نهایت مقادیر تابع هدف جبهه اول، محاسبه شده و میانگین آن‌ها در جدول شماره ۳ قرار می‌گیرد. نتایج نشان دهنده آن است که ضرب تابع هدف در عددهای بسیار بزرگ، با توجه به آن که جواب‌های بد را کاملاً حذف می‌کند، نامناسب است و ضرب در عدد ۲ مقادیر مناسبی برای این الگوریتم می‌باشد.

جدول ۳. بررسی بهترین مقدار ضریب جریمه برای رعایت نکردن محدودیت‌های مسئله

| ضریب | تابع هدف اول | تابع هدف دوم | تابع هدف سوم | تابع هدف چهارم |
|------|--------------|--------------|--------------|----------------|
| ۲ | ۵۲۴.۳ | ۲۸۵.۲ | ۱۲۴.۳ | ۸۷.۲ |
| ۵ | ۵۲۴.۴ | ۲۸۴.۹ | ۱۲۴.۳ | ۸۷.۲ |
| ۱۰ | ۵۲۵.۱ | ۲۸۴.۹ | ۱۲۴.۴ | ۸۷.۴ |
| ۲۵ | ۵۲۵.۳ | ۲۸۵ | ۱۲۴.۴ | ۸۷.۵ |
| ۵۰ | ۵۲۵.۲ | ۲۴۹.۹ | ۱۲۴.۵ | ۸۷.۶ |
| ۱۰۰ | ۵۲۵.۵ | ۲۴۹.۹ | ۱۲۴.۵ | ۸۷.۶ |
| ۲۵۰ | ۵۲۵.۴ | ۲۴۹.۸ | ۱۲۴.۶ | ۸۷.۶ |
| ۵۰۰ | ۵۲۵.۶ | ۲۴۹.۹ | ۱۲۴.۶ | ۸۷.۷ |
| ۱۰۰۰ | ۵۲۵.۵ | ۲۴۸.۸ | ۱۲۴.۷ | ۸۷.۷ |

تعیین رتبه بندی جواب‌ها

جواب‌های مورد بحث با توجه به آنکه چند جواب به طور یقین از آن جواب بهتر خواهد بود، درجه بندی می‌شوند. جواب‌هایی به طور یقین از جواب دیگر بهتر خواهد بود که تمامی مقادیر توابع هدف، از جواب مورد نظر بهتر باشد. به طور مثال جواب‌هایی که هیچ جوابی بهتر از آنها پیدا نشود در درجه اول و جواب‌هایی که تنها یک جواب بهتر از آنها وجود داشته باشد در درجه دوم قرار گرفته می‌شوند. بقیه درجه بندی‌ها نیز بر این اساس تقسیم بندی می‌شود. بنابراین جواب‌ها با توجه به کیفیت مقدار توابع هدف در درجه‌های مختلف تقسیم بندی می‌شود. در نهایت تمام جواب‌ها از لحاظ کیفیت درجه بندی و سپس رتبه بندی می‌گردند.

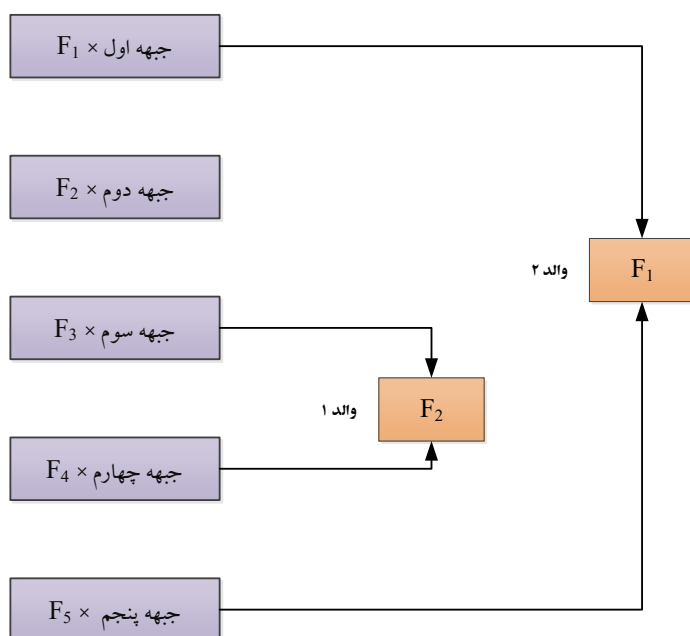
برای رتبه بندی از الگوریتم ذیل استفاده می‌شود:

- ابتدا دو عضو از جمعیت به تصادف انتخاب می‌شود.
- اگر رتبه دو عضو انتخاب شده مساوی نباشد، عضوی که رتبه کمتری دارد انتخاب می‌شود.
- اگر رتبه دو عضو انتخابی مساوی باشد، عضوی که دارای فاصله ازدحامی بیشتر است انتخاب می‌شود.

انتخاب والدین

بعد از آنکه برای هر کروموزوم از جمعیت، مقدار برازش محاسبه شد، الگوریتم دو کروموزوم را به صورت تصادفی انتخاب نموده و هر کدام که مقدار برازش بهتری داشت را به عنوان والد انتخاب می‌کند. والد دوم هم به همین صورت انتخاب خواهد شد. برای انتخاب جواب مناسب تر و مقدار برازش بهتر بین دو عضو انتخاب شده تصادفی، جوابی که رتبه بهتر و در جبهه پایین تری باشد انتخاب می‌شود.

شود. در صورتی که جبهه آن‌ها با یکدیگر برابر باشد، جوابی انتخاب خواهد شد که فاصله ازدحامی بیشتری داشته باشد.



شکل ۳. نحوه عملگر تورنومت برای انتخاب والدین

عنوان یک عملگر دیگر، در کنار عملگر تقاطع قرار می‌گیرد. به عبارت دیگر، این عملگر در کروموزوم‌های متفاوت تغییرات تصادفی برنامه‌ریزی نشده ایجاد می‌کند و ژن‌هایی را که در جمعیت اولیه وجود نداشته‌اند را وارد جمعیت می‌کند. به این صورت که عددی تصادفی تولید می‌شود، اگر این عدد کمتر از نرخ جهش باشد، جهش اتفاق خواهد افتاد. در این روش در مرحله اول یک عدد تصادفی بین صفر تا یک انتخاب می‌شود. در صورتیکه عدد تصادفی کمتر از نرخ جهش باشد دو نقطه به تصادف بر روی والد انتخاب می‌شود و عدد موجود در این نقاط با هم تعویض می‌شود.



شکل ۵. عمل جهش در فرزند

در این قسمت به منظور تعیین نرخ جهش یک مثال عددی ارائه و میانگین اعداد جواب‌های به‌دست آمده از جبهه اول محاسبه می‌شود. نتایج نشان دهنده این موضوع است که نرخ جهش ۰.۲ بهترین مقادیر نرخ جهش خواهد بود.

جدول ۴. بررسی بهترین نرخ جهش

| نرخ جهش | تابع هدف اول | تابع هدف دوم | تابع هدف سوم | تابع هدف چهارم |
|---------|--------------|--------------|--------------|----------------|
| ۰.۱ | ۵۲۴.۴ | ۲۸۵.۱ | ۱۲۴.۳ | ۸۷.۳ |
| ۰.۲ | ۵۲۴.۳ | ۲۸۵.۲ | ۱۲۴.۳ | ۸۷.۲ |
| ۰.۳ | ۵۲۴.۵ | ۲۸۵.۱ | ۱۲۴.۳ | ۸۷.۳ |
| ۰.۴ | ۵۲۴.۶ | ۲۸۵ | ۱۲۴.۴ | ۸۷.۳ |
| ۰.۵ | ۵۲۴.۸ | ۲۸۴.۹ | ۱۲۴.۵ | ۸۷.۴ |
| ۰.۶ | ۵۲۴.۸ | ۲۸۵ | ۱۲۴.۵ | ۸۷.۴ |
| ۰.۷ | ۵۲۴.۹ | ۲۸۴.۹ | ۱۲۴.۴ | ۸۷.۵ |
| ۰.۸ | ۵۲۴.۸ | ۲۸۵ | ۱۲۴.۴ | ۸۷.۴ |
| ۰.۹ | ۵۲۵ | ۲۸۴.۸ | ۱۲۴.۶ | ۸۷.۵ |

روش حل مسئله بهینه‌سازی چندهدفه

در این تحقیق برای حل مسئله چندهدفه در نرم افزار گمز از تکنیک معیار جامع یا همان ال پی متریک استفاده می شود. به این صورت که هر تابع هدف به تنهایی و بدون در نظر گرفتن توابع هدف دیگر کمینه یا بیشینه می شود و در نهایت مقدار بهینه توابع هدف با در نظر گرفتن تمامی محدودیت های مسئله در تابع هدف روش ال پی متریک قرار می گیرد.

برای حل این مسئله، الگوریتم جستجوی دقیق نیاز به زمان محاسباتی زیادی دارد و این زمان با بزرگ شدن ابعاد مسئله به صورت نمایی افزایش می یابد و در برخی موارد یافتن جواب بهینه عملاً امکان پذیر نمی باشد.

لذا الگوریتم های ژنتیک که در پی بدست آوردن جواب با کیفیت خوب در زمان معقول باشند، در حل این مسئله کاربرد پیدا کرده است. به همین منظور در این تحقیق یک الگوریتم ژنتیک چندهدفه برای حل مدل به کار گرفته می شود.

در این پژوهش به منظور بررسی مدل ریاضی ارائه شده، توسط نرم افزار گمز کارایی و صحت مدل ارائه شده با توجه به تمامی ویژگی ها و محدودیت های مسئله مورد بررسی قرار می گیرد. سپس با ارائه مثال عددی به بررسی پیچیده بودن مسئله، کارایی الگوریتم ژنتیک چندهدفه در ابعاد کوچک و بزرگ خواهیم پرداخت و صحت مدل ریاضی را بررسی خواهیم نمود. در نهایت می توان میانگین جواب های الگوریتم ژنتیک چندهدفه را با جواب حاصل از نرم افزار گمز، مقایسه نمود.

۴. یافته‌های پژوهش

بررسی مدل ریاضی ارائه شده

در این قسمت به منظور بررسی مدل ریاضی ارائه شده، توسط نرم افزار گمز کارایی و صحت مدل ارائه شده مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای این منظور یک مثال تصادفی توسط نرم افزار متلب ارائه شده و داده‌های مورد نظر وارد نرم افزار گمز شده و مسئله با توجه مدل ارائه شده حل خواهد شد. در صورتی که در جواب مسئله مورد نظر ویژگی‌ها، محدودیت‌ها و مقادیر تابع هدف به درستی محاسبه شده باشد می‌توان گفت که مدل ریاضی ارائه شده صحیح بوده و کارایی این مدل تأیید می‌شود. در مثال تصادفی ارائه شده پنج مکان کاندید برای احداث نیروگاه وجود داشته که باید به ده مکان تقاضا سرویس دهی کند. داده‌های ورودی مسئله مطابق با جداول شماره ۵ تا ۹ خواهد بود.

جدول ۵. داده‌های ورودی مسئله

| مقدار انتشار گازهای گلخانه‌ای در اثر احداث | هزینه ثابت نیروگاه | ظرفیت تولید نیروگاه | شماره نیروگاه مکان کاندید |
|--|--------------------|------------------------|------------------------------|
| ۷ | ۳۰ | ۲۰ | ۱ |
| ۴ | ۱۵ | ۲۵ | ۲ |
| ۵ | ۲۰ | ۲۰ | ۳ |
| ۸ | ۳۰ | ۲۵ | ۴ |
| ۶ | ۳۵ | ۱۵ | ۵ |

جدول ۶. داده‌های ورودی مسئله

| | | | | | | | | | | |
|----|---|---|---|---|---|---|---|---|---|------------------|
| ۱۰ | ۹ | ۸ | ۷ | ۶ | ۵ | ۴ | ۳ | ۲ | ۱ | شماره مکان تقاضا |
| ۵ | ۶ | ۶ | ۴ | ۸ | ۴ | ۳ | ۷ | ۴ | ۸ | مقدار تقاضا |

جدول ۷. داده‌های ورودی مسئله

| | |
|----|---|
| ۵ | مقدار تقاضای مجاز پوشش داده نشده |
| ۸۰ | حداکثر بودجه مجاز احداث |
| ۱۰ | حداکثر فاصله مجاز نیروگاه تا مرکز تقاضا |
| ۴۰ | حداکثر تعداد نیروگاه‌های احداث شده |

جدول ۸. فاصله بین مکان‌های تقاضا i از نیروگاه j

| | z۱ | z۲ | z۳ | z۴ | z۵ |
|-----|----|----|----|----|----|
| i۱ | ۷ | ۳ | ۱۵ | ۵ | ۶ |
| i۲ | ۹ | ۸ | ۵ | ۱۳ | ۱۴ |
| i۳ | ۳ | ۵ | ۲ | ۳ | ۵ |
| i۴ | ۶ | ۸ | ۵ | ۱۵ | ۱ |
| i۵ | ۲ | ۶ | ۹ | ۱۱ | ۲ |
| i۶ | ۴ | ۵ | ۵ | ۹ | ۶ |
| i۷ | ۱۱ | ۱۲ | ۶ | ۸ | ۹ |
| i۸ | ۱۳ | ۴ | ۷ | ۴ | ۸ |
| i۹ | ۵ | ۶ | ۶ | ۶ | ۱۲ |
| i۱۰ | ۲ | ۱ | ۴ | ۵ | ۱۳ |

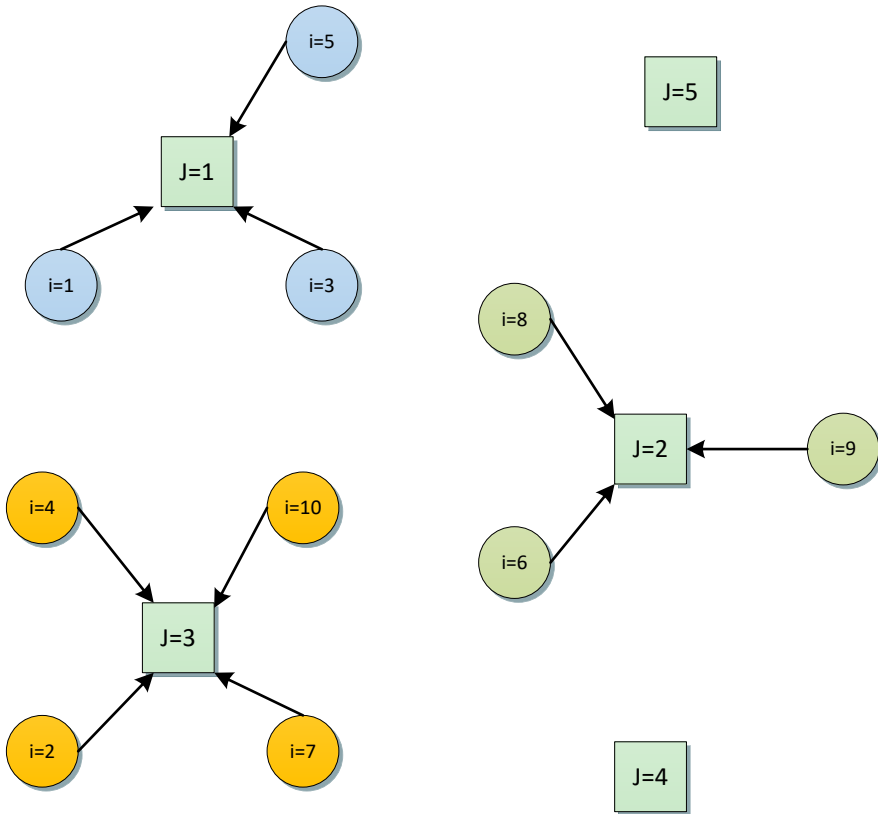
جدول ۹. هزینه انتقال بین مکان‌های تقاضا i از نیروگاه j

| | j ^۵ | j ^۴ | j ^۳ | j ^۲ | j ^۱ | |
|-----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|--|
| i ^۱ | ۹ | ۲ | ۲ | ۷ | ۲ | |
| i ^۲ | ۷ | ۵ | ۲ | ۸ | ۵ | |
| i ^۳ | ۶ | ۶ | ۴ | ۶ | ۱ | |
| i ^۴ | ۵ | ۷ | ۱ | ۵ | ۱۲ | |
| i ^۵ | ۵ | ۸ | ۵ | ۳ | ۳ | |
| i ^۶ | ۷ | ۹ | ۷ | ۱ | ۳ | |
| i ^۷ | ۸ | ۴ | ۳ | ۲ | ۹ | |
| i ^۸ | ۹ | ۵ | ۶ | ۳ | ۶ | |
| i ^۹ | ۸ | ۶ | ۸ | ۲ | ۵ | |
| i ^{۱۰} | ۵ | ۱۰ | ۳ | ۷ | ۸ | |

در این مرحله مسئله مورد نظر به وسیله نرم افزار گمز حل می‌شود که شکل شماتیک مسئله در شکل شماره ۶ و جدول شماره ۱۰ نمایش داده شده است. بر اساس آن نیروگاه چهارم و پنجم احداث نشده و تخصیص مکان‌های تقاضا به نیروگاه‌ها به شکل جدول شماره ۱۰ خواهد بود.

جدول ۱۰. جواب به دست آمده از نرم افزار گمز

| مکان‌های تخصیص داده شده به نیروگاه | | | | شماره نیروگاه |
|------------------------------------|---|---|----|---------------|
| | ۵ | ۱ | ۳ | ۱ |
| | ۶ | ۹ | ۸ | ۲ |
| ۴ | ۲ | ۷ | ۱۰ | ۳ |
| احداث نشده است | | | | ۴ |
| احداث نشده است | | | | ۵ |



مکان تقاضا

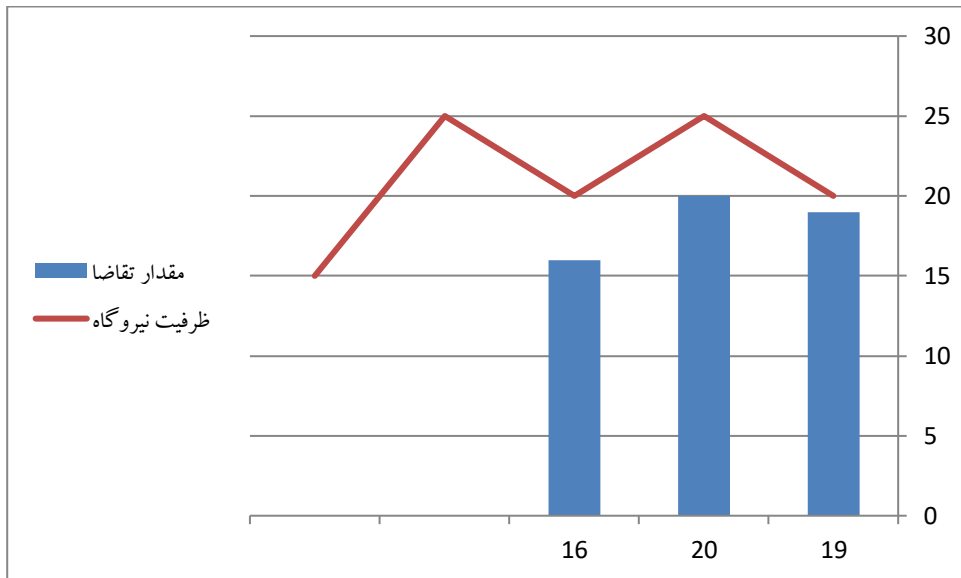
مکان کاندید احداث نیروگاه خورشیدی

شکل ۶. شکل شماتیک جواب مسئله

برای بررسی ویژگی‌ها و محدودیت‌های مسئله، اولین محدودیتی که بررسی می‌شود شامل محدودیت ظرفیت نیروگاه‌ها خواهد بود که مطابق با جدول شماره ۱۱ و نمودار شماره ۱ این محدودیت رعایت شده است.

جدول ۱۱. بررسی محدودیت ظرفیت نیروگاه

| ظرفیت نیروگاه | مقدار تقاضا | شماره نیروگاه |
|---------------|----------------|---------------|
| ۲۰ | ۱۹ | ۱ |
| ۲۵ | ۲۰ | ۲ |
| ۲۰ | ۱۶ | ۳ |
| ۲۵ | احداث نشده است | ۴ |
| ۱۵ | احداث نشده است | ۵ |



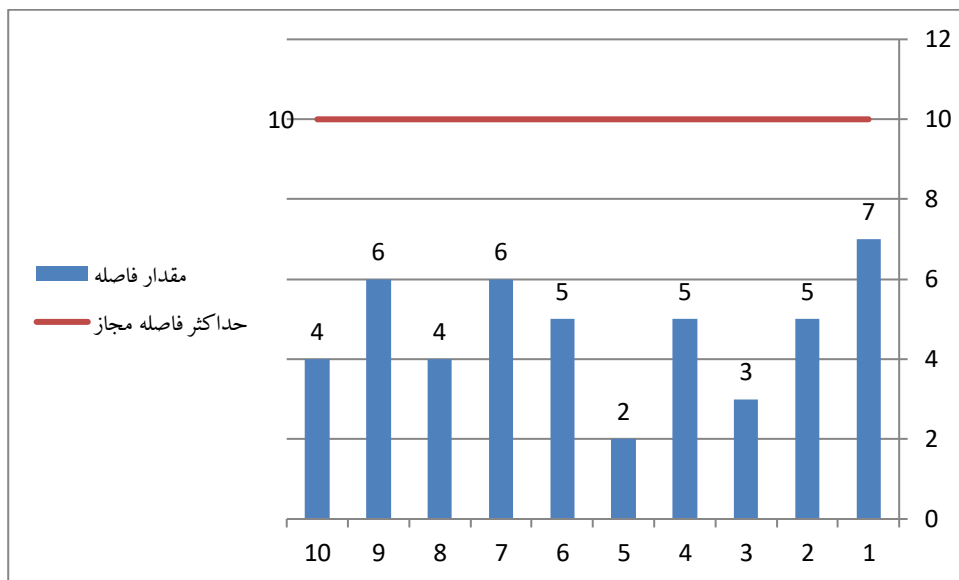
نمودار ۱. بررسی محدودیت ظرفیت نیروگاه

در قسمت بعد محدودیت حداکثر تعداد نیروگاه‌های مجاز احداث شده بررسی می‌شود. طبق جدول شماره ۱۲ تعداد نیروگاه‌های احداث شده برابر ۳ و تعداد نیروگاه‌های مجاز برابر ۴ است بنابراین این محدودیت نیز رعایت شده است.

جدول ۱۲. بررسی محدودیت تعداد نیروگاه‌های احداث شده

| وضعیت | شماره نیروگاه |
|----------------|---------------|
| احداث | ۱ |
| احداث | ۲ |
| احداث | ۳ |
| احداث نشده است | ۴ |
| احداث نشده است | ۵ |

محدودیت بعدی، بررسی محدودیت فاصله مکان تقاضا تا نیروگاه تخصیص داده شده به آن است که با توجه به نمودار شماره ۲ این محدودیت برای تمامی مکان‌های تقاضا رعایت شده است.



نمودار ۲. بررسی محدودیت فاصله مکان تقاضا تا نیروگاه تخصیص داده شده

در مرحله بعدی محدودیت حداکثر ظرفیت مقدار بودجه برای احداث نیروگاه مورد بررسی قرار می‌گیرد. در جدول شماره ۱۳ هزینه احداث نیروگاه‌های احداث شده جمع و مقدار آن ۶۵ واحد بوده است. با توجه به آن که مقدار بودجه در دسترس ۸۰ واحد است بنابراین این محدودیت نیز رعایت گردیده است.

جدول ۱۳. بررسی محدودیت حداکثر ظرفیت مقدار بودجه برای احداث نیروگاه

| شماره نیروگاه | هزینه احداث |
|---------------|-------------|
| ۱ | ۳۰ |
| ۲ | ۱۵ |
| ۳ | ۲۰ |
| ۴ | ۰ |
| ۵ | ۰ |
| مجموع | ۶۵ |

در قسمت بعدی مقدار توابع هدف مورد بررسی قرار داده می‌شود که در اینجا با توجه به جواب ارائه شده مقدار تابع هدف محاسبه گردیده است. این مقدار باید با مقدار به دست آمده توسط نرم افزار گمز برابر باشد. مقدار توابع هدف در جدول شماره ۱۴ تا ۱۹ نشان داده شده است.

جدول ۱۴. مقدار انتشار گازهای گلخانه‌ای

| شماره نیروگاه | مقدار انتشار گازهای گلخانه‌ای |
|---------------|-------------------------------|
| ۱ | ۷ |
| ۲ | ۴ |
| ۳ | ۵ |
| ۴ | ۰ |
| ۵ | ۰ |
| مجموع | ۱۶ |

جدول ۱۵. بررسی مقدار تابع هدف سوم

| مقدار اختلال | شماره مکان تقاضا |
|--------------|------------------|
| ۰/۴ | ۱ |
| ۰/۲ | ۲ |
| ۰/۱ | ۳ |
| ۰/۳ | ۴ |
| ۰/۲ | ۵ |
| ۰/۳ | ۶ |
| ۰/۴ | ۷ |
| ۰/۱ | ۸ |
| ۰/۱ | ۹ |
| ۰/۲ | ۱۰ |
| ۲/۳ | مجموع |

جدول ۱۶. بررسی مقدار تابع هدف دوم

| تقاضا پوشش داده شده | مقدار کل تقاضا | شماره مکان تقاضا |
|---------------------|----------------|------------------|
| ۸ | ۸ | ۱ |
| ۴ | ۴ | ۲ |
| ۷ | ۷ | ۳ |
| ۳ | ۳ | ۴ |
| ۴ | ۴ | ۵ |
| ۸ | ۸ | ۶ |
| ۴ | ۴ | ۷ |
| ۶ | ۶ | ۸ |
| ۶ | ۶ | ۹ |
| ۵ | ۵ | ۱۰ |
| ۵۵ | ۵۵ | مجموع |

جدول ۱۷. بررسی مقدار تابع هدف اول

| | |
|----|----------------------------|
| ۶۵ | هزینه انتقال به مکان تقاضا |
| ۲۱ | محاسبه هزینه احداث |
| ۸۶ | مجموع هزینه ها |

جدول ۱۸. محاسبه هزینه احداث

| شماره نیروگاه | هزینه احداث |
|---------------|-------------|
| نیروگاه ۱ | ۳۰ |
| نیروگاه ۲ | ۱۵ |
| نیروگاه ۳ | ۲۰ |
| نیروگاه ۴ | ۰ |
| نیروگاه ۵ | ۰ |
| مجموع | ۶۵ |

جدول ۱۹. محاسبه هزینه انتقال

| شماره مکان تقاضا | هزینه انتقال به مکان تقاضا |
|------------------|----------------------------|
| ۱ | ۲ |
| ۲ | ۲ |
| ۳ | ۱ |
| ۴ | ۱ |
| ۵ | ۳ |
| ۶ | ۱ |
| ۷ | ۳ |
| ۸ | ۳ |
| ۹ | ۲ |
| ۱۰ | ۳ |
| مجموع | ۲۱ |

جدول ۲۰. بررسی درستی محاسبه تابع هدف

| مقدار محاسبه شده | مقدار به دست آمده توسط گمز | تابع هدف |
|------------------|-------------------------------|----------------|
| ۸۶ | ۸۶ | تابع هدف اول |
| ۵۵ | ۵۵ | تابع هدف دوم |
| ۲/۳ | ۲/۳ | تابع هدف سوم |
| ۱۶ | ۱۶ | تابع هدف چهارم |

در این قسمت مقدار تابع هدف محاسبه شده با مقدار به دست آمده توسط نرم افزار گمز نشان داده شده است. همانطور که در جدول شماره ۲۰ مشاهده می‌شود این دو مقدار با یکدیگر برابر بوده و نشان دهنده درستی محاسبه تابع هدف توسط نرم افزار گمز است.

رعایت ویژگی‌ها و محدودیت‌های مسئله و درستی مقدار تابع هدف نشان دهنده کارایی و صحت مدل ریاضی ارائه شده است که به اثبات رسید.

بررسی پیچیده بودن مسئله

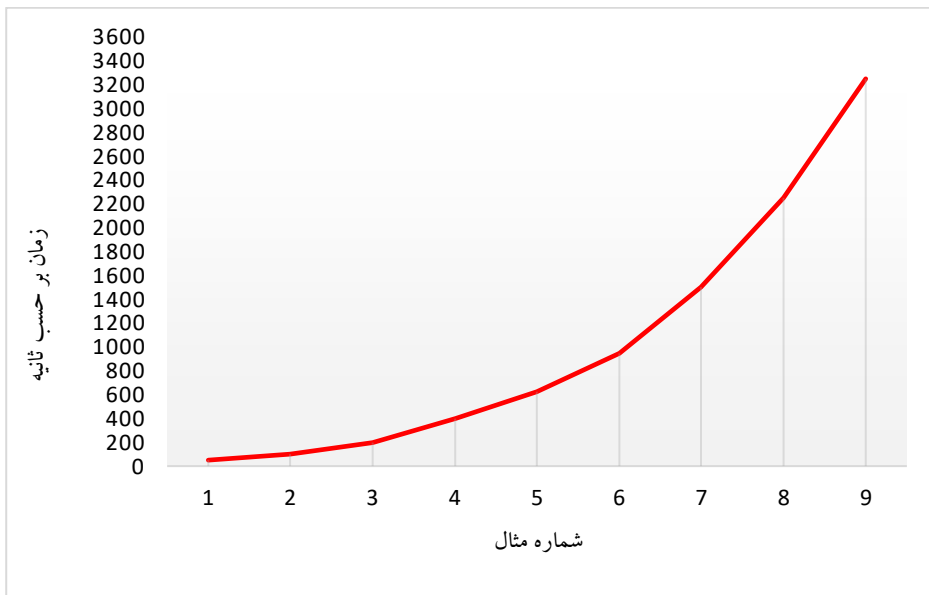
به منظور اثبات پیچیده بودن مسئله، مثال‌های مختلف و تصادفی در ابعاد مختلف مسئله ارائه شده که با بزرگ شدن ابعاد مسئله، زمان حل مسئله با نرم افزار گمز به صورت نمایی افزایش یافته و از مرحله خاصی، مسئله با نرم افزار گمز غیر قابل حل خواهد شد. این موضوع در جدول شماره ۲۱ و نمودار شماره ۳ به نمایش گذاشته شده است. با توجه به موارد فوق، می‌توان گفت مسئله مورد نظر پیچیده بوده و در ابعاد بزرگ دارای راه حل دقیق نمی‌باشد.

هم‌چنین در مقاله کونسریسوک و چیتسومبون (۲۰۱۳) به اثبات رسید که این نوع مسئله دارای پیچیدگی بوده و با توجه به این که پژوهش موردنظر دارای محدودیت‌های پیچیده‌تری است بنابراین مدل ارائه شده دارای پیچیدگی می‌باشد.

جدول ۲۱. ابعاد مثال‌های ارائه شده

| شماره مثال | تعداد مکان‌های تقاضا | تعداد مکان‌های کاندید برای نیروگاه |
|------------|----------------------|------------------------------------|
| ۱ | ۸ | ۳ |
| ۲ | ۱۰ | ۴ |
| ۳ | ۱۲ | ۵ |
| ۴ | ۱۴ | ۶ |
| ۵ | ۱۶ | ۷ |
| ۶ | ۱۸ | ۸ |
| ۷ | ۲۰ | ۹ |
| ۸ | ۲۲ | ۱۰ |
| ۹ | ۲۴ | ۱۱ |

^۱ Koonsrisuk & Chitsomboon



نمودار ۳. بررسی افزایش شدید زمان حل مسئله با نرم افزار گمز

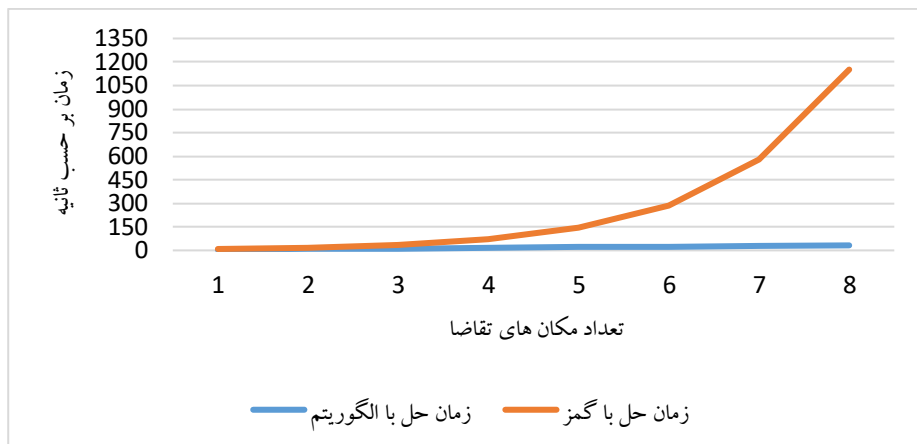
کارایی الگوریتم ژنتیک چندهدفه در ابعاد کوچک

در بخش قبلی اثبات شد که مسئله مطرح شده دارای پیچیدگی است و برای حل مسئله در ابعاد بزرگ نیاز به الگوریتم ژنتیک چندهدفه می‌باشد. در این مرحله کارایی الگوریتم در ابعاد کوچک بررسی می‌گردد. به منظور بررسی درستی، صحت و کارایی الگوریتم، پنج مثال عددی در ابعاد کوچک به صورت تصادفی تولید و به وسیله الگوریتم ژنتیک چندهدفه حل و جواب حاصل از نرم افزار گمز در جدول شماره ۲۲ ارائه و سپس مقایسه گردیده است. با توجه به اختلاف کم بین میانگین جواب‌های الگوریتم ژنتیک چندهدفه در مقایسه با جواب حاصل از نرم افزار گمز، ثابت می‌گردد که الگوریتم ژنتیک چندهدفه ارائه شده در ابعاد کوچک دارای کارایی مناسبی است. در جدول شماره ۲۲ مقدار این انحراف بررسی گردیده و بیشترین انحراف به مقدار ۲.۷۰ درصد است که مقدار قابل قبولی می‌باشد.

جدول ۲۲. بررسی کارایی الگوریتم ژنتیک چندهدفه در ابعاد کوچک

| تعداد مکان‌های تقاضا | تابع هدف اول | | | تابع هدف دوم | | | تابع هدف سوم | | | تابع هدف چهارم | | |
|----------------------|--------------|---------------|--------|--------------|---------------|--------|--------------|---------------|--------|----------------|---------------|--------|
| | جواب گمز | جواب الگوریتم | انحراف | جواب گمز | جواب الگوریتم | انحراف | جواب گمز | جواب الگوریتم | انحراف | جواب گمز | جواب الگوریتم | انحراف |
| ۸ | ۱۵ | ۱۴/۹۸ | ۰/۱۳٪ | ۱۱/۸ | ۱۱/۹ | ۰/۸۵٪ | ۵۴ | ۵۳/۹ | ۰/۱۹٪ | ۳۵ | ۳۴/۹ | ۰/۲۹٪ |
| ۱۰ | ۲۳ | ۲۲/۸ | ۰/۸۸٪ | ۱۳/۲۵ | ۱۳/۴ | ۱/۱۳٪ | ۶۵/۵ | ۶۵ | ۰/۷۷٪ | ۴۲ | ۴۱/۵ | ۱/۲۰٪ |
| ۱۵ | ۵۱/۵ | ۵۰/۹۸ | ۱/۰۲٪ | ۱۶/۴ | ۱۶/۷ | ۱/۸۳٪ | ۷۹ | ۷۸/۲ | ۱/۰۲٪ | ۶۷ | ۶۶ | ۱/۵۳٪ |
| ۲۰ | ۶۷/۳ | ۶۶/۵ | ۱/۲۰٪ | ۲۱/۹ | ۲۲/۱ | ۰/۹۱٪ | ۱۰۰/۵ | ۹۹ | ۱/۵۲٪ | ۸۱ | ۷۹ | ۲/۵۳٪ |
| ۲۵ | ۸۴/۲ | ۸۳ | ۱/۴۵٪ | ۲۷/۶ | ۲۸ | ۱/۴۵٪ | ۱۱۰ | ۱۰۸ | ۱/۸۵٪ | ۹۵ | ۹۲/۵ | ۲/۷۰٪ |

همان‌طور که در جدول شماره ۲۲ مشاهده می‌شود مقادیر تابع هدف برای هر دو روش تقریباً نزدیک به هم بوده و نشان‌دهنده کارایی مناسب الگوریتم می‌باشد. در مرحله بعد، مقایسه زمان حل مثال‌های مطرح شده با نرم‌افزار گمز و الگوریتم در نمودار شماره ۴ انجام شده است که نشان‌دهنده زمان حل بسیار پایین‌تر الگوریتم نسبت به جواب گمز می‌باشد.



نمودار ۴. مقایسه زمان حل با الگوریتم ژنتیک چندهدفه با جواب دقیق

کارایی الگوریتم ژنتیک چندهدفه در ابعاد بزرگ

به منظور بررسی عملکرد الگوریتم ژنتیک چندهدفه در ابعاد بزرگ، چند مثال با داده‌های تصادفی در ابعاد بزرگ مطرح شده است که به وسیله الگوریتم ژنتیک چندهدفه برای تعداد سی مرتبه انجام گردیده است (علت تکرار اجرای مسئله برای سی بار نرمال بودن جامعه می‌باشد). در این حالت بهترین جواب به دست آمده از حل مسئله با میانگین جواب‌ها مقایسه شده و در جدول شماره ۲۳ نمایش داده شده است. مقایسه انجام شده نشان می‌دهد که اختلاف بسیار کم است و در تابع هدف حداکثر ۲.۱۳ درصد می‌باشد که کارایی مناسب الگوریتم ژنتیک چندهدفه در ابعاد بزرگ مسئله را اثبات می‌نماید.

جدول ۲۳. بررسی کارایی الگوریتم ژنتیک چندهدفه در ابعاد بزرگ

| تعداد مکان‌های تقاضا | تابع هدف اول | | | تابع هدف دوم | | | تابع هدف سوم | | | تابع هدف چهارم | | |
|----------------------|----------------------|-----------------------|--------|----------------------|-----------------------|--------|----------------------|-----------------------|--------|----------------------|-----------------------|--------|
| | بهترین جواب الگوریتم | میانگین جواب الگوریتم | انحراف | بهترین جواب الگوریتم | میانگین جواب الگوریتم | انحراف | بهترین جواب الگوریتم | میانگین جواب الگوریتم | انحراف | بهترین جواب الگوریتم | میانگین جواب الگوریتم | انحراف |
| ۳۰ | ۱۱۵ | ۱۱۵/۵ | ۰/۴۳٪ | ۳۵۰ | ۳۴۹ | ۰/۲۹٪ | ۷۵۵ | ۷۵۸ | ۰/۴۰٪ | ۸۶۰ | ۸۶۵ | ۰/۵۸٪ |
| ۵۰ | ۱۲۵ | ۱۲۵/۹ | ۰/۷۲٪ | ۳۷۵ | ۳۷۲ | ۰/۸۱٪ | ۸۲۳ | ۸۳۰ | ۰/۸۵٪ | ۹۳۲ | ۹۴۰ | ۰/۸۶٪ |
| ۷۵ | ۲۵۰ | ۲۵۲/۵ | ۱/۰۰٪ | ۴۵۰ | ۴۴۵ | ۱/۱۲٪ | ۹۵۰ | ۹۶۰ | ۱/۰۵٪ | ۱۳۰۰ | ۱۳۱۵ | ۱/۱۵٪ |
| ۱۰۰ | ۳۱۰ | ۳۱۵ | ۱/۶۱٪ | ۵۷۵ | ۵۶۵ | ۱/۷۷٪ | ۱۱۰۰ | ۱۱۱۵ | ۱/۳۶٪ | ۱۴۱۲ | ۱۴۳۰ | ۱/۲۷٪ |
| ۱۲۵ | ۴۲۳ | ۴۳۲ | ۲/۱۳٪ | ۶۸۲ | ۶۶۸ | ۲/۱۰٪ | ۱۲۵۰ | ۱۲۷۰ | ۱/۶۰٪ | ۱۵۰۱ | ۱۵۳۰ | ۱/۹۳٪ |

ارائه الگوریتم شبیه‌سازی تبرید چند هدفه MOSA

به منظور بررسی عملکرد الگوریتم ژنتیک چندهدفه در ابعاد بزرگ، چند مثال با داده‌های تصادفی در ابعاد بزرگ مطرح شده است و به وسیله الگوریتم‌های NSGA II و الگوریتم شبیه‌سازی تبرید چند هدفه حل شده است. در این حالت میانگین جواب‌های پارتو اول به دست آمده از حل مسئله با

الگوریتم NSGA II با میانگین جواب‌های به دست آمده از الگوریتم MOSA مقایسه شده و در جدول شماره ۲۴ نمایش داده شده است. مقایسه انجام شده نشان می‌دهد که الگوریتم NSGA II در برخی موارد ۲.۵۷ درصد جواب بهتری را پیدا کرده است که نشان دهنده کارایی مناسب الگوریتم ژنتیک چندهدفه در ابعاد بزرگ می‌باشد.

جدول ۲۴. بررسی کارایی الگوریتم ژنتیک چندهدفه در ابعاد بزرگ

| تعداد مکان‌های تقاضا | تابع هدف اول | | | تابع هدف دوم | | | تابع هدف سوم | | | تابع هدف چهارم | | |
|----------------------|-------------------------------|-----------------------------|--------|-------------------------------|-----------------------------|--------|-------------------------------|-----------------------------|--------|-------------------------------|-----------------------------|--------|
| | میانگین جواب الگوریتم NSG AII | میانگین جواب الگوریتم MOS A | انحراف | میانگین جواب الگوریتم NSG AII | میانگین جواب الگوریتم MOS A | انحراف | میانگین جواب الگوریتم NSG AII | میانگین جواب الگوریتم MOS A | انحراف | میانگین جواب الگوریتم NSG AII | میانگین جواب الگوریتم MOS A | انحراف |
| ۳۰ | ۱۴۰ | ۵/۱۴۰ | ۰/۳۶٪ | ۳۸۷ | ۳۸۹ | ۰/۵۱٪ | ۸۰۰ | ۸۰۳ | ۰/۳٪ | ۹۲۵ | ۹۳۰ | ۰/۵٪ |
| ۵۰ | ۱۵۰ | ۹/۱۵۰ | ۰/۶۰٪ | ۴۱۲ | ۴۱۷ | ۱/۳۰٪ | ۸۶۸ | ۸۷۵ | ۰/۸٪ | ۹۹۷ | ۱۰۰۵ | ۰/۸٪ |
| ۷۵ | ۲۷۵ | ۵/۲۷۷ | ۰/۹۰٪ | ۴۸۷ | ۴۹۳ | ۱/۲۳٪ | ۹۹۵ | ۱۰۰۵ | ۱/۰٪ | ۱۳۶۵ | ۱۳۸۰ | ۱/۰٪ |
| ۱۰۰ | ۳۳۵ | ۳۴۰ | ۱/۴۷٪ | ۶۱۲ | ۶۲۰ | ۱/۳۹٪ | ۱۱۴۵ | ۱۱۶۰ | ۱/۲٪ | ۱۴۷۷ | ۱۴۹۵ | ۱/۲٪ |
| ۱۲۵ | ۴۴۸ | ۴۵۷ | ۱/۹۷٪ | ۷۱۹ | ۷۳۸ | ۲/۵۷٪ | ۱۲۹۵ | ۱۳۱۵ | ۱/۵٪ | ۱۵۶۶ | ۱۵۹۵ | ۱/۸٪ |

اجرای مدل برای منطقه کاشان، آران و بیدگل

در این قسمت یک مطالعه موردی در خصوص احداث نیروگاه خورشیدی در منطقه کاشان، آران و بیدگل مورد بررسی قرار گرفته است. این منطقه شامل دوازده منطقه تقاضا می‌باشد که شامل کاشان شمال، جنوب، شرق، غرب و مرکز، مشکات، آران، بیدگل، راوند، اردهال، قمصر و برزک است.

جمعیت هر منطقه تقاضا در جدول شماره ۲۴ بیان شده است. برای احداث نیروگاه خورشیدی ۴ منطقه کاندید وجود دارد که فاصله این مناطق تا مرکز احداث در جدول شماره ۲۵ نشان داده شده است.

جدول ۲۵. جمعیت مناطق تقاضا

| شماره منطقه | نام منطقه | جمعیت |
|-------------|------------|--------|
| ۱ | کاشان شمال | ۶۸,۰۰۰ |
| ۲ | کاشان جنوب | ۴۷,۰۰۰ |
| ۳ | کاشان شرق | ۵۲,۰۰۰ |
| ۴ | کاشان غرب | ۶۰,۰۰۰ |
| ۵ | کاشان مرکز | ۴۵,۰۰۰ |
| ۶ | قمصر | ۱۲,۰۰۰ |
| ۷ | آران | ۷۰,۰۰۰ |
| ۸ | بیدگل | ۳۲,۰۰۰ |
| ۹ | راوند | ۱۰,۰۰۰ |
| ۱۰ | برزک | ۷۰,۰۰۰ |
| ۱۱ | اردهال | ۵,۵۰۰ |
| ۱۲ | مشکات | ۶,۵۰۰ |



شکل ۷. مناطق تقاضای کاشان



شکل ۸. مناطق تقاضای آران و بیگلر



شکل ۹. مناطق کاندید برای احداث نیروگاه

جدول ۲۶. فاصله بین مکان کاندید و مکان تقاضا

| شماره منطقه | نام منطقه | منطقه ۳ | منطقه ۱ | منطقه ۲ | منطقه ۴ |
|-------------|------------|---------|---------|---------|---------|
| ۱ | کاشان شمال | ۳ | ۷ | ۱/۵ | ۱۰ |
| ۲ | کاشان جنوب | ۹ | ۹ | ۸/۵ | ۱۱ |
| ۳ | کاشان شرق | ۸/۵ | ۴ | ۶/۵ | ۱۴ |
| ۴ | کاشان غرب | ۷/۵ | ۹ | ۶ | ۹ |
| ۵ | کاشان مرکز | ۴/۵ | ۳/۵ | ۳ | ۱۲ |
| ۶ | قمصر | ۲۰ | ۲۰ | ۲۴ | ۳۵ |
| ۷ | آران | ۱۵ | ۱۸ | ۶ | ۱۱ |
| ۸ | بیدگل | ۱۴/۵ | ۱۷ | ۵ | ۱۲ |
| ۹ | راوند | ۵ | ۱۴ | ۱۱ | ۱/۵ |
| ۱۰ | برزک | ۳۵ | ۴۰ | ۴۲ | ۳۰ |
| ۱۱ | اردهال | ۳۲ | ۴۰ | ۴۳ | ۲۸ |
| ۱۲ | مشکات | ۳۰ | ۳۸ | ۴۰ | ۲۶ |

با توجه به مطالعات انجام شده، مصرف برق برای هر نفر ۳۰۰ کیلووات در ساعت بوده و هزینه گسترش خطوط برای هر متر ۲۰۰ هزار تومان برآورد شده است. با توجه به اطلاعات داده شده و داده‌های ورودی مسئله، وضعیت احداث نیروگاه‌های خورشیدی به شرح جدول شماره ۲۶ خواهد بود.

جدول ۲۷. تعیین مناطق احداث شده

| وضعیت | شماره منطقه کاندید |
|--------------|--------------------|
| رد | ۱ |
| احداث می‌شود | ۲ |
| احداث می‌شود | ۳ |
| رد | ۴ |

همچنین با توجه به احداث منطقه کاندید دو و سه، مناطق تقاضا به شرح جدول شماره ۲۷ به نیروگاه‌های خورشیدی تخصیص داده می‌شود.

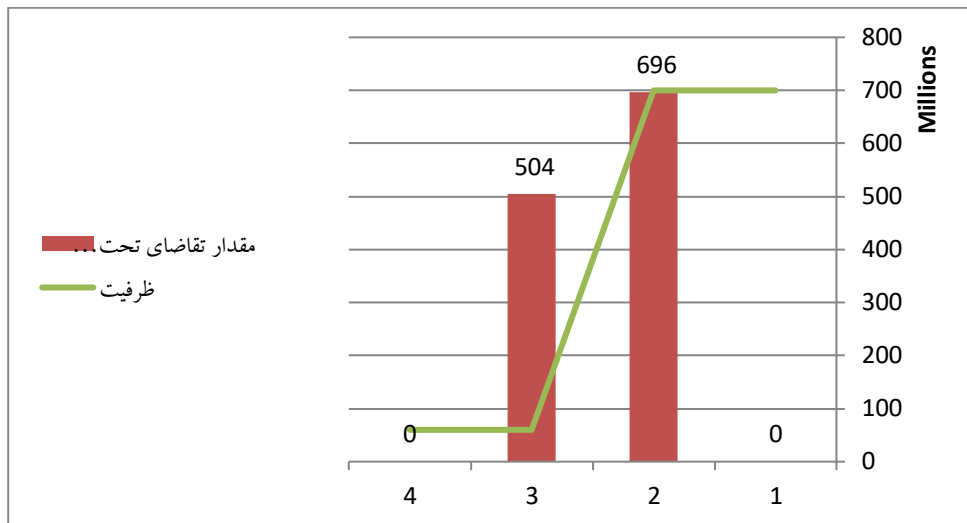
جدول ۲۸. تخصیص مناطق مختلف به نیروگاه‌ها

| نام منطقه | نیروگاه تخصیص داده شده |
|------------|------------------------|
| کاشان شمال | ۲ |
| کاشان جنوب | ۳ |
| کاشان شرق | ۲ |
| کاشان غرب | ۳ |
| کاشان مرکز | ۳ |
| قمصر | ۳ |
| آران | ۲ |
| بیدگل | ۲ |
| راوند | ۲ |
| برزک | - |
| اردهال | - |
| مشکات | - |

یکی از محدودیت‌های مسئله، وجود ظرفیت برای نیروگاه‌های خورشیدی است که این محدودیت در جدول شماره ۲۸ بررسی شده است.

جدول ۲۹. بررسی محدودیت ظرفیت نیروگاه‌ها

| شماره نیروگاه | مقدار تقاضای تحت پوشش | ظرفیت |
|---------------|-----------------------|-------------|
| ۲ | ۶۹۶,۰۰۰,۰۰۰ | ۷۰۰,۰۰۰,۰۰۰ |
| ۳ | ۵۰۴,۰۰۰,۰۰۰ | ۶۰,۰۰۰,۰۰۰ |



نمودار ۵. محدودیت ظرفیت نیروگاه‌ها

۵. نتیجه گیری

در این پژوهش یک مسئله بهینه سازی چندهدفه برای مکان یابی تخصیص احداث نیروگاه های خورشیدی ارائه شد که چهار هدف اقتصادی، زیست محیطی، قابلیت اطمینان و اجتماعی را دنبال می نماید. نوآوری این پژوهش نسبت به پژوهش های پیشین، تفاوت در طراحی مدل بهینه سازی چندهدفه است که با توجه به بیان مشکل مسئله در مدل ریاضی به تعریف مجموعه ها، پارامترها، متغیرهای تصمیم گیری، اهداف و محدودیت های آن پرداخته شد و همچنین تفاوت در روش حل مسئله که به دو روش حل دقیق و تقریبی اثبات صحت مدل ریاضی مورد بررسی قرار گرفت. به منظور بررسی مدل ارائه شده توسط نرم افزار گمز، با توجه به این که تمامی ویژگی ها و محدودیت های مسئله رعایت و مقدار تابع هدف درست محاسبه شده است، کارایی مدل ریاضی به اثبات رسید. برای اثبات پیچیده بودن مسئله، مثال های مختلف و تصادفی ارائه شد که در نتیجه با توجه به پیچیدگی مسئله مورد بررسی از الگوریتم ژنتیک چندهدفه برای حل مدل استفاده گردید. سپس با ارائه مثال های تصادفی، کارایی الگوریتم ژنتیک چندهدفه در ابعاد کوچک و بزرگ بررسی گردید. با توجه به اختلاف کم بین میانگین جواب

های الگوریتم ژنتیک چندهدفه در مقایسه با جواب حاصل از نرم افزار گمز، ثابت گردید که الگوریتم ژنتیک چندهدفه ارائه شده در ابعاد کوچک و بزرگ دارای کارایی مناسبی است. همچنین مدل مسئله را با الگوریتم شبیه سازی تیرید چندهدفه MOSA حل نموده و نتایج بدست آمده از آن را با نتایج الگوریتم NSGA II مقایسه نموده که نشان دهنده کارایی مناسب الگوریتم ژنتیک چندهدفه در ابعاد بزرگ می باشد. نتایج پژوهش حاضر می تواند مورد استفاده سندیکای شرکت های تولیدکننده برق به منظور مکان یابی بهینه در احداث نیروگاه ها باشد تا در نهایت بتوان بر اساس آن بهترین مکان بهینه برای احداث نیروگاه های برق خورشیدی انتخاب شود تا هم سود بیشتری کسب شده و هم در کاهش آلودگی های زیست محیطی سهمیم باشیم. در تحقیقات آتی برای حل مسئله میتوان از الگوریتم فراابتکاری دیگری استفاده کرد و داده های موجود در مسئله می تواند قطعی نباشد، به طور مثال می تواند فازی و یا احتمالی باشد.

۶. منابع

[۱] قربانخانی احمد، مروتی شریف آبادی علی، میرغفوری سید حبیب الله، میرفخرالدینی سید حیدر. (۱۴۰۰). طراحی مدل احتمالاتی زنجیره تأمین پایدار در صنعت برق با نفوذ تولیدات تجدیدپذیر. پژوهش های مدیریت منابع سازمانی؛ ۱۱(۱): ۱۰۵-۱۲۸.

[۲] روزنامه دنیای اقتصاد. ۱۴۰۰. <https://www.donya-e-qtasad.com/fa/tiny/news->

۳۸۰۸۹۸۹

[۳] Vance, L., Cabezas, H., Heckl, I., Bertok, B., & Friedler, F. (۲۰۱۳). Synthesis of sustainable energy supply chain by the P-graph framework. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, ۵۲(۱) ۲۶۶-۲۷۴.

[۴] Jabbarzadeh, A., Fahimnia, B., & Rastegar, S. (۲۰۱۷). Green and resilient design of electricity supply chain networks: a multiobjective robust optimization approach. *IEEE Transactions on Engineering Management*, ۶۶(۱), ۵۲-۷۲.

[۵] Qu, B., & Lu, L. (۲۰۱۱, October). Optimization model for electric power supply chain operation based on system engineering. In ۲۰۱۱ International Conference on System science, Engineering design and Manufacturing informatization (Vol. ۲, pp. ۷۷-۸۰). IEEE.

[۶] Osmani, A., & Zhang, J. (۲۰۱۴). Optimal grid design and logistic planning for wind and biomass based renewable electricity supply chains under uncertainties. *Energy*, ۷۰, ۵۱۴-۵۲۸.

[۷] Hosseini-Motlagh, S. M., Samani, M. R. G., & Shahbazbegian, V. (۲۰۲۰). Innovative strategy to design a mixed resilient-sustainable electricity supply chain network under uncertainty. *Applied Energy*, ۲۸۰, ۱۱۵۹۲۱.

[۸] خلیل پور تیلمی, نوید, رضائیان, & مهدوی. (۲۰۱۸). بهینه‌سازی چند هدفه برای تامین تقاضای برق با استفاده از زمانبندی منابع تجدیدپذیر و منابع معمول. نشریه کیفیت و بهره‌وری صنعت برق ایران, ۱۷(۱), ۱۰۲-۱۱۳.

[۹] باقری, زارع علی آبادی, & انضباطی. (۲۰۱۹). بررسی تاثیر استفاده از منابع تجدیدپذیر در تامین تقاضای شبکه‌ی برق با ارائه‌ی یک مدل ریاضی دو هدفه. دو فصلنامه انرژی‌های تجدیدپذیر و نو, ۱(۱), ۳۸-۴۶.

[۱۰] Tan, Q., Wang, T., Zhang, Y., Miao, X., & Zhu, J. (۲۰۱۷). Nonlinear multi-objective optimization model for a biomass direct-fired power generation supply chain using a case study in China. *Energy*, ۱۳۹, ۱۰۶۶-۱۰۷۹.

[۱۱] Tsao, Y. C., Thanh, V. V., & Lu, J. C. (۲۰۱۹). Multiobjective robust fuzzy stochastic approach for sustainable smart grid design. *Energy*, ۱۷۶, ۹۲۹-۹۳۹.

[۱۲] نجابت خواه, فرزام, حسینی, & دانیالی. (۲۰۱۲). بهسازی مصرف انرژی الکتریکی: چالش‌ها و راهکارها. نشریه علمی-پژوهشی کیفیت و بهره‌وری صنعت برق ایران, ۱(۱), ۳۸-۴۵.

[۱۳] دانشوری, سلاطین, پروانه, & خلیل زاده. (۲۰۲۰). تاثیر انرژی‌های تجدیدپذیر بر اقتصاد سبز. فصلنامه علوم و تکنولوژی محیط زیست, ۲۱(۱۲), ۱۶۵-۱۷۹.