بهینه‌سازی چند هدفه برای تامین تقاضای برق با استفاده از زمانبندی منابع تجدیدپذیر و منابع معمول

نوید خلیل‌پور تیلمی[۱]، جواد رضائیان[۲]*، ایرج مهدوی[۳]

[۱]کارشناسی‌ارشد مهندسی صنایع از دانشگاه علوم و فنون مازندران ـ ایران
nkht69@gmail.com
[۲]دانشیار دانشکده مهندسی صنایع دانشگاه علوم و فنون مازندران ـ ایران
j.rezaeian@ustmb.ac.ir
[۳]استاد دانشکده مهندسی صنایع دانشگاه علوم و فنون مازندران ـ ایران
irajarash@ustmb.ac.ir

چکیده: به علت افزایش تقاضای برق، کاهش منابع سوخت‌های فسیلی و کاهش خروج دی‌اکسید کربن بکارگیری از منابع انرژی‌های تجدیدپذیر یکی از استراتژی‌های مهم دنیای پیشرفته صنعتی می‌باشد. در این تحقیق برای تامین تقاضای برق یک شهر با استفاده از منابع تجدیدپذیر مانند صفحه‌های فتوولتائیک و توربین‌های بادی که قابلیت ذخیره سازی انرژی در باتری را دارند و منابع حرارتی معمول که نقش یک منبع جایگزین را ایفا می‌کنند استفاده میگردد. حداکثر مقدار انرژی که صفحه‌های خورشیدی و توربین‌های بادی می‌توانند در طول هر ساعت از شبانه‌روز تولید کنند به ترتیب به توابعی بستگی دارند که خود به میزان تابش خورشید و سرعت وزش باد برای هر ساعت وابسته است. یک قابلیت اطمینانی در مورد انرژی تولیدی هر منبع برای هر ساعت قابل تخمین می‌باشد. هدف حداقل کردن هزینه و حداکثر کردن قابلیت اطمینان می‌باشد. یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی دو هدفه برای مساله مورد نظر تعریف می‌گردد. از آنجایی که اهداف در تناقض هستند دستیابی به یک حل بهینه منفرد که هر دو هدف را بهینه کند امکان‌پذیر نمی‌باشد لذا از الگوریتم فراابتکاری ژنتیک دو هدفه بر مبنای مرتب سازی نامغلوب برای نمایش خروجی الگوریتم در نظر گرفته شده است.

واژه‌های کلیدی: زمانبندی، انرژی تجدیدپذیر، بهینه سازی چند هدفه، قابلیت اطمینان، مرتب سازی نامغلوب، الگوریتم ژنتیک دوهدفه.

تاریخ ارسال مقاله : ۱۳۹۷/۱/۱۹

تاریخ پذیرش مقاله : ۱۳۹۷/۴/۱۳

نام نویسنده‌ی مسئول : جواد رضائیان

نشانی نویسنده‌ی مسئول : دانشکده مهندسی صنایع دانشگاه علوم و فنون مازندران ـ ایران

* Corresponding Author: J. Rezaeian, E-mail: j.rezaeian@ustmb.ac.ir

[Downloaded from ieijqp.ir on 2025-08-18]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1397.7.1.10.4]

۱. مقدمه

امروزه با توجه به رشد جمعیت و پیشرفت‌های صنعتی نیاز روز افزون به منابع انرژی مخصوصا انرژی برق که از پاکترین انرژی‌ها و به راحتی قابل تبدیل به انرژی‌های دیگر و قابل انتقال، توزیع و استفاده می‌باشد; بیشتر احساس می‌شود. به گونه‌ای که بشر امروزی انرژی برق را با زندگی خود عجین شده می‌بیند و بدون آن زندگی را دشوار می‌بیند و از طرفی دستیابی به چنین انرژی پاک و مهمی به آسانی میسر نیست زیرا تولید این انرژی خود نیاز به در دست داشتن انرژی‌های دیگری است که این انرژی‌ها محدود، در اختیار کشورهای محدود و روز به روز بر قیمت آنها افزوده می‌گردد. لذا با توجه به نیاز روز افزون به منابع انرژی و کم شدن منابع انرژی فسیلی، ضرورت سالم نگه داشتن محیط زیست، کاهش آلودگی هوا، محدودیت‌های برق رسانی و تامین سوخت برای نقاط و روستاهای دور افتاده و ... استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر مانند: انرژی باد، انرژی خورشید و انرژی داخل زمین می‌تواند جایگاه ویژه‌ای داشته باشد. بیشتر کشورهای جهان به اهمیت و نقش منابع انرژی، به‌ویژه انرژی‌های تجدیدپذیر در تامین نیاز حال و آینده پی‌برده و به‌طور گسترده در توسعه و بهره‌برداری از این منابع لایزال تحقیقات وسیع و سرمایه‌گذاری‌های اصولی می‌کنند.

کلیه انرژی‌های تجدیدپذیر روز به‌روز سهم بیشتری در سیستم تامین انرژی جهان بر عهده می‌گیرند. از ویژگی‌های دیگر این منابع پراکندگی و گستردگی آن در تمام جهان، نیاز به فناوری‌های پایین‌تر، انرژی‌های تجدیدپذیر را به‌ویژه برای کشورهای در حال توسعه از جاذبه بیشتری برخوردار کرده است. علاوه بر اینها اخیرا پیشرفت‌هایی در زمینه ذخیره انرژی‌های تجدیدپذیر در زمان اوج تولید صورت گرفت که منفعت استفاده از این انرژی را دو چندان می‌کند. آنچه در این میان تصمیم‌گیری را برای مدیران و تصمیم‌گیران دشوار می‌سازد سرو کار داشتن با اهدافی متفاوت است، اهدافی که گاها در تضاد با یکدیگر هستند.

این مقاله به مساله‌ی بهینه سازی دو هدفه می‌پردازد که در آن سلول‌های خورشیدی، توربین‌های بادی، سیستم ذخیره‌سازی باتری و منابع حرارتی معمول همراه شده‌اند که نیاز به تقاضای انرژی را برآورده می‌کنند تا هزینه تامین برق حداقل و قابلیت اطمینان سیستم حداکثر گردد. در این مقاله یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی دو هدفه ارائه خواهد شد. برای حل مدل هم از حل دقیق به کمک نرم افزار لینگو و حلی به کمک الگوریتم فراابتکاری ژنتیک دو هدفه بر مبنای مرتب‌سازی نامغلوب ارائه شده است.

۲. مرور ادبیات

بی شک در آینده‌ای نه چندان دور انرژی‌های تجدیدپذیر جایگاه مهمی در تامین انرژی بشر خواهند داشت، بحران ناشی از مصرف بی‌رویه سوخت‌های فسیلی توجه به این مقوله را روز به روز با اهمیت‌تر می‌کند. از طرفی با توجه به اجباری که بشر در حرکت به سمت انرژی‌های نو دارد می‌توان از این اجبار یک فرصت ساخت، زیرا انرژی‌های تجدیدپذیر بسترهای مناسب شغلی و سرمایه‌گذاری ایجاد می‌کنند. با توجه به پتانسیل‌های موجود در زمینه‌های انرژی خورشیدی و بادی در جهان و بخصوص ایران زمینه را برای زمانبندی و برنامه‌ریزی درست برای استفاده بهینه از این منابع لایزال فراهم می‌آورد. در این تحقیق، مسئله بهینه سازی دو هدفه با اهداف حدقل کردن هزینه تامین برق و حداکثر کردن قابلیت اطمینان در شرایط تولید همزمان انرژی الکتریسیته از دو منبع تجدیدپذیر خورشیدی و بادی و امکان ذخیره‌سازی انرژی در باتری برای زمان اوج تولید و استفاده از منابع حرارتی معمول به عنوان یک منبع جایگزین که باعث افزایش راندمان سیستم و توان خروجی آن می‌شود، مورد مطالعه قرار می‌گیرد.

اواخر قرن ۱۸ میلادی با دستیابی انسان به منابع زغال‌سنگ و بهره‌برداری از معادن، که مقدمه‌ای برای آغاز انقلاب صنعتی بود، فناوری‌های جدیدی پا به عرصه وجود گذاشتند و انسان توانست با استفاده از انرژی‌های فسیلی، شرایط لازم را برای توسعه صنعت و بهره‌برداری بهتر از انرژی بدست آورده و به موفقیت‌های چشمگیری دست یابد. از چند دهه گذشته بخش عمده‌ای از توان مورد نیاز جهان از منابع فسیلی مانند نفت، گاز و انرژی هسته‌ای تامین می‌گردد و پس از تحریم نفتی در سال ۱۹۷۳ میلادی، به طور وسیعی به منابع انرژی تجدیدپذیر به عنوان منابع تامین کننده نباز انرژی جوامع، پرداخته شد [۶].

حمید فلقی و محمود رضا حقی‌فام [۴] مسئله مدل سازی و تحلیل اثر تولید پراکنده روی قابلیت اطمینان شبکه‌های توزیع را مورد بررسی قرار دادند، که با انجام آزمایش‌هایی روی فیدر توزیع فشار متوسط واقعی به تاثیر تعداد، مکان و ظرفیت واحدهای تولید پراکنده دست یافتند، در این مقاله هزینه تامین انرژی از واحدهای تولید پراکنده و تاثیر شرایط آب و هوایی روی قابلیت اطمینان شبکه توزیع لحاظ نگردید. محمود فندرسکی و همکاران [۵] مسئله ارزیابی قابلیت اطمینان نیروگاه بادی منجیل و نیشابور را مورد بررسی قرار دادند که ملاک عمل جنبه‌ها و شاخص‌های مهم قابلیت نیروگاه‌های بادی منجیل و نیشابور بوده است و در پایان با توجه به ویژگی‌های این دو منطقه بادی مدل‌های مناسب‌تر و کارآمدتر توربین‌های بادی به‌خصوص از لحاظ قابلیت اطمینان را برای این دو منطقه بادی پیشنهاد می‌دهد. این مقاله قابلیت اطمینان توربین‌های نیروگاه بادی را بررسی کرده بدون اینکه شرایط آب‌وهوایی و قابلیت اطمینان نیروگاه خورشیدی و باتری را ملاک بررسی قرار دهد. تی‌چا و همکاران [۷] مسئله ارزیابی قابلیت اطمینان شبکه توزیع با اتصال تولید پراکنده فتوولتائیک با تاثیر شرایط آب‌وهوایی را مورد ارزیابی قرار دادند. اهمیت این مقاله در این است که استفاده از تولید پراکنده در سیستم قدرت باعث افزایش قابلیت اعتماد شبکه می‌گردد و برای نزدیکی بیشتر به شرایط دنیای واقعی تاثیر شرایط آب‌وهوایی را روی شبکه تولید پراکنده در نظر

[Downloaded from ieijqp.ir on 2025-08-18]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1397.7.1.10.4]

گرفتند. در این مقاله منابع تامین انرژی تجدیدپذیر بادی و باتری و تاثیر شرایط آب‌وهوایی برای آن را در نظر نگرفته نشد. لیانگ و لیو [۸] تحقیقی با یک رویکرد بهینه‌سازی فازی برای زمانبندی تولید با سیستم انرژی‌های خورشیدی و بادی انجام دادند، هدف این مسئله حداقل کردن هزینه سوخت کل واحدهای حرارتی بود. یکی از ویژگی‌های این کار آن است که با در نظر گرفتن رویکرد بهینه سازی فازی برای میزان آب در دسترس، سرعت وزش باد و میزان تابش برای جلوگیری از خطاها به صورت ساعتی پیش‌بینی می‌شوند که نتایج دقیق‌تر و منطقی‌تر بدست آمده است. در این مقاله تک هدفه از باتری برای ذخیره انرژی استفاده نمی‌شود و قابلیت اطمینان تولید انرژی توسط منابع لحاظ نگردید. تورس و همکاران [۹] مسئله زمانبندی زوج‌های فتوولتائیک، باتری و منابع انرژی معمول را با هدف حداکثر کردن منفعت با استفاده از مدل برنامه‌ریزی خطی انجام دادند. از ویژگی‌های این کار استفاده از باتری برای ذخیره مازاد تولید و استفاده از منابع حرارتی به عنوان یک منبع جایگزین می‌باشد. در این مقاله تاثیر شرایط جوی در میزان انرژی تولیدی توسط سلول‌های خورشیدی برای نزدیکتر شدن به شرایط دنیای واقعی مورد بررسی قرار نگرفت. برای حداکثر کردن منفعت از توربین‌های بادی به عنوان یک منبع تامین انرژی استفاده نشد و قابلیت اطمینان منابع تامین انرژی لحاظ نگردید. هایل [۱۰] حلی را برای مسئله بهینه‌سازی با تمرکز بر روی حداقل کردن هزینه پرداخت شده توسط یک مشتری خاص پیشنهاد کرد. نیاز تقاضا با استفاده از منابع خورشیدی که قابلیت ذخیره انرژی در باتری را دارند و منابع حرارتی معمول برآورده می شود. در این مقاله تک هدفه قابلیت اطمینان و تاثیر شرایط آب‌وهوایی بر روی منابع تامین انرژی لحاظ نگردید. و از توربین‌های بادی به عنوان یک منبع تامین انرژی استفاده نگردید. ناتروت و همکاران [۱۱] مسئله حداقل کردن مقدار انرژی که توسط یک مشتری از شبکه الکتریکی خریداری می‌شود و مشتری با ذخایر باتری و خورشیدی می‌تواند انرژی را به شبکه بفروشد. آنها ارزش خالصی از طریق افزایش باتری زمانی که عملیات در یک زمان بهینه انجام می‌شود را پیدا کردند. اما قابلیت اطمینان منابع تامین انرژی و تاثیر شرایط آب‌وهوایی در مقدار انرژی تولیدی لحاظ نگردید. مروالی و همکاران [۱۲] با استفاده از توابع لاگرانژی و برنامه‌ریزی پویا سعی در حداقل کردن نقش منابع معمول به شبکه داشتند، تا بیشترین اثرات مربوط به ظرفیت دریافت انرژی از منابع خورشیدی و باتری باشد. ریفونیو [۱۳] مسئله حداقل کردن ارزش نهایی پول نقد را با استفاده از یک الگوریتم زمانبندی قدرت بر مبنای برنامه‌ریزی پویا در یک سیستمی که شامل صفحه‌های خورشیدی، باتری و منابع معمول با پارامترهای درجه حرارت، عمر باتری و انرژی ورودی می‌باشد، ارائه دادند. هو و همکاران [۱۴] مدل برنامه‌ریزی خطی چند هدفه‌ای برای بقای انرژی و ساخت انرژی تجدیدپذیر از یک فضای کم کربن در نظر گرفتند. در این مقاله بیشتر به جنبه اقتصادی بودن استفاده از انرژی‌های نو و زودترین زمان بازگشت سرمایه مورد ارزیابی قرار گرفت. کرمانی و همکاران [۱۵] یک رویکرد برنامه‌ریزی خطی اصلاح کننده برای بهینه کردن همزمان آب و انرژی در نظر گرفتند. در چهار مقاله معرفی شده، قابلیت اطمینان و تاثیر توربین بادی در تامین انرژی تجدیدپذیر مورد بررسی قرار نگرفت. لین و همکاران [۱۶] الگوریتم ها و کاربردهای مسئله قابلیت اطمینان بر اساس برنامه‌ریزی سیستم‌های قدرت و بهره‌برداری با ادغام نیروی بادی را مورد نقد و بررسی قرار دادند. در این مقاله تاثیر سلول‌های خورشیدی وباتری در تامین انرژی لحاظ نگردید. چنگس [۱۷] مدل برنامه‌ریزی آرمانی چند انتخابی برای بدست آوردن بهترین محل برای به‌کارگیری منابع انرژی تجدیدپذیر در تایوان به کار گرفتند. در این مقاله هدف انتخاب محل مناسب برای نصب منابع انرژی تجدیدپذیر می‌باشد. و تاثیر قابلیت اطمینان در منابع تامین انرژی لحاظ نگردید. بهزادی و روشن‌دل [۲۰] برای افزایش نفوذ انرژی تجدیدپذیر در تامین تقاضا، یک چارچوب توالی محدب جدید برای بهینه‌سازی عملیات افق‌های زمانی کوتاه شونده یک سیستم انرژی تجدیدپذیر هیبریدی ارائه دادند، در این سیستم با افزایش طول افق پیش‌بینی عملکرد اقتصادی افزایش می‌یابد. در این مقاله قابلیت اطمینان منابع تامین انرژی لحاظ نگردید. خاره و همکاران [۲۱] با بررسی جامع از جنبه‌های مختلف سیستم‌های انرژی تجدیدپذیر ترکیبی، به تحلیل اندازه‌گیری بهینه، مدل‌سازی، جنبه‌های کنترل و مسائل اطمینان را مورد بحث قرار می‌دهد. در این مقاله تاثیر شرایط آب‌وهوایی و ذخیره باتری را در نظر نگرفتند.

با توجه به معرفی تحقیقات انجام شده توسط سایر نویسندگان در ادامه تحقیقات تورس و همکاران [۹] برای حداکثر کردن بهره‌وری و استفاده حداکثری از ظرفیت منابع تجدیدپذیر ترکیبی از تمامی شرایط ارائه شده در مقالات مراجع با در نظر گرفتن شرایط آب‌وهوایی برای نزدیکی بیشتر به شرایط دنیای واقعی با استفاده از توابعی که به سرعت وزش باد و میزان تابش خورشید وابسته‌اند و قابلیت اطمینان که میزان موفقیت سیستم درارائه برق به مصرف کننده‌گان است، برای دست‌یابی به منبع انرژی مورد نظر با حداقل هزینه و حداکثر قابلیت اطمینان مورد مطالعه قرار دادند. در صورتیکه در این تحقیق علاوه بر در نظر گرفتن منابع تجدیدپذیر متنوع و در نظر گرفتن شرایط آب و هوایی و توابع وابسته به سرعت باد و شدت تابش خورشید ، زمانبندی ترکیب منابع تامین انرژی سلول خورشیدی ، توربین بادی، باتری و منابع حرارتی معمول با ظرفیت تولیدی را بعنوان نوآوری جهت کمینه کردن هزینه و افزایش قابلیت اطمینان همزمان در نظر گرفت. لذا مسئله بهینه سازی دو هدفه برای تامین تقاضای برق با استفاده از منابع تجدیدپذیر و منابع حرارتی معمول در ادامه کارهای قبلی ارائه خواهد شد. قابلیت اطمینان و مقدار انرژی تولیدی توسط هر منبع به توابعی وابسته‌اند که از جنس سرعت وزش باد و میزان تابش خور شید در هر ساعت می‌باشند. اهداف حداقل کردن هزینه و حداکثر کردن قابلیت اطمینان سیستم می‌باشند. برای مسئله مورد نظر یک مدل برنامه‌ریزی

[Downloaded from ieijqp.ir on 2025-08-18]

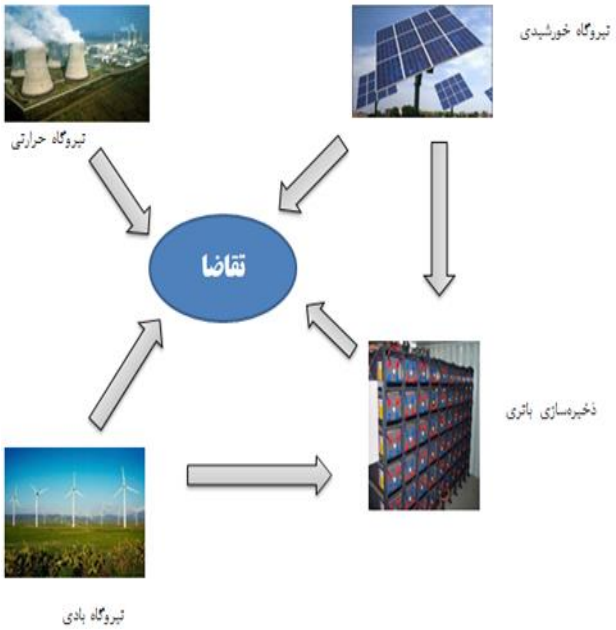
[DOR: 20.1001.1.23222344.1397.7.1.10.4]

غیرخطی دو هدفه ارائه خواهد شـــد که برای حل از نرم‌افزار لینگو و الگوریتم فراابتکاری ژنتیک دو هدفه (NSGAII) استفاده خواهد شد.

۳. تشریح مسئله و ارائه مدل

۳-۱. تعریف مسئله

این مقاله می‌خواهد برای ۲۴ ساعت یک شبانه روز برنامه‌ریزی دا شته باشـد تا برای پاسـخ به تقاضـای برق یک شـهر با اسـتفاده از منابع تجدیدپذیر مانند صفحه‌های خور شیدی و توربین‌های بادی که قابلیت ذخیره سـازی انرژی در باتری را در زمان‌های اوج تولید دارند تا بتوان در زمان اوج مصـرف از آن اسـتفاده کرد و از منابع حرارتی معمول به عنوان یک منبع جایگزین اسـتفاده گردد، حداکثر مقدار انرژی‌ای که توربین‌های بادی و صفحه‌های خور شیدی می‌توانند در طول هر ساعت از شـبانه‌روز تولید کنند به ترتیب به توابعی بسـتگی دارند که خود به پیش‌بینی‌های سـرعت وزش باد و تابش خورشـید برای هر سـاعت وابسـته‌اند. تقاضـای برق برای هر سـاعت لزومی ندارد تنها توسـط یک منبع تامین شـود. از آنجایی که تابشـی در شـب نداریم، انرژی برق تولیدی توسط منبع خورشیدی صفر می‌باشد و برای طول روز با توجه به پیش‌بینی وضعیت جوی فرضا برای یک روز صاف تابستانی در صبح کم و هرچه به اواسط روز می‌رسیم چون خورشید به طور عمود می‌تابد رفته‌رفته میزان انرژی برق تولیدی توسـط منبع خورشـیدی افزایش یافته به اوج رسـیده و سـپس برای غروب رفته‌رفته کاهش می‌یابد. در حالت کلی روندی شبیه به یک تابع نرمال خواهیم دا شت. مقدار انرژی برق تولیدی در هر ساعت توسط توربین‌های بادی به پیش‌بینی سرعت وزش باد وابسته است نکته قابل توجه در توربین‌های بادی این است که اگر سرعت وزش باد از یک حداقل مقداری کمتر باشد به علت اقتصادی نبودن و همچنین اگر سرعت وزش باد از یک حداکثر مقداری فراتر رود چون امکان شکسته شدن پره‌ها و آ سیب ر ساندن به سیستم توربین وجود دارد توربین را خاموش می‌کنند. باتری که برای ذخیره سـازی انرژی از آن ا ستفاده می شود دارای حداقل و حداکثر ظرفیت می‌با شد. انرژی ذخیره شده در باتری هر چه به حداکثر ظرفیتش نزدیک‌تر باشد خروجی بهتر صـورت می‌گیرد. در ابتدای هر روز باتری دارای ظرفیت شروع می‌باشد، انرژی موجود در باتری در پایان هر روز بایستی درصدی از شروع با شد یا به عبارتی از تمام انرژی درون باتری می‌توان ا ستفاده نگردد. هر منبع تامین انرژی در هر سـاعت از شـبانه روز دارای یک قابلیت اطمینانی می‌باشـد. قابلیت اطمینان صـفحه‌های خورشـیدی و توربین‌های بادی به توابعی که از جنس شـرایط آب و هوایی و قابلیت اطمینان باتری به تابعی که از جنس ظرفیت باتری، وابسـته هسـتند. هدف حداقل کردن هزینه و حداکثر کردن قابلیت اطمینان می‌باشد.



شکل (۱): تصویری از زمانبندی سه منبع تامین انرژی و ذخیره باتری برای برآورده کردن تقاضا برق

۳-۲.مفروضات مسئله

- تقاضای برق برای هر ساعت از شبانه روز مقداری معین است.
- انرژی الکتریسیته تولیدی توسط صفحه خورشیدی و توربین‌های بادی یا به طور مسـتقیم وارد شـبکه‌های توزیع می‌شـوند یا در باتری ذخیره می‌گردد.
- حداکثر مقدار انرژی که تو سط سلول خور شیدی و توربین‌های بادی در یک ساعت برای شارژ باتری ا ستفاده می شود مقداری معین می‌باشد.
- حداکثر مقدار انرژی که می‌توان در یک سـاعت از باتری دریافت کرد (دشارژ) مقداری مشخص می‌باشد.
- حداقل و حداکثر ظرفیت باتری مقداری معلوم است.
- حداقل ظرفیت باتری و انرژی باتری در لحظه شروع در صدی از حداکثر ظرفیت باتری می‌باشد.
- شعاع پره توربین‌ها مقداری مشخص می‌باشد.
- اگر سرعت وزش باد کمتر یا بیشتر از یک بازه‌ای مشخص با شد توربین‌ها خاموش می‌گردند.
- هزینه تامین یک کیلو وات ساعت انرژی از صفحه خور شیدی، توربین‌های بادی و باتری در هر سـاعت مقداری ثابت و از منبع حرارتی معمول وابسـته به تقاضـاسـت. اگر تقاضـا از ۸۰ درصـد بیشترین تقاضا کمتر باشد مقدار ثابت ۰٫۰۸ واحد هزینه، در غیر اینصورت به صورت خطی با تقاضا زیاد می‌شود طبق رابطه زیر:

$$C_i^C = \max\{.۰۸ , .۱ \frac{D_i}{max_i\{D_i\}}\}$$

- تامین انرژی با اسـتفاده از منابع حرارتی معمول بدون محدودیت بوده و همیشـه در دسـترس اسـت لذا قابلیت

[Downloaded from ieijqp.ir on 2025-08-18]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1397.7.1.10.4]

اطمینان مربوط به آن یک فرض شده و در محا سبه قابلیت اطمینان سیستم (تابع هدف دوم) لحاظ نمی‌گردد.

- منظور از قابلیت اطمینان سیستم، قابلیت اطمینان منابع تجدیدپذیر (صفحه‌های خورشیدی، توربین‌های بادی و باتری) می‌باشد.

۳-۳.مدل ریاضی پیشنهادی

در این بخش ابتدا اندیس‌ها و پارامترهای ورودی به مدل و متغیرهای تصمیم‌گیری تعریف می‌گردند. سپس مدل ریاضی پیشنهادی برای مسئله یاد شده ارائه گردیده و توابع هدف و محدودیت‌ها تشریح می‌شوند.

۳-۳-۱. اندیس‌ها و پارامترهای مدل

- i : اندیس ساعت $i = 1, 2, \ldots, 24$
- j : اندیس منابع تجدیدپذیر تامین انرژی $j = 1, 2, 3$
- C_i^{PV} : هزینه تامین یک کیلو وات انرژی در ساعت iام توسط منبع فتوولتائیک.
- C_i^{W} : هزینه تامین یک کیلو وات انرژی در ساعت iام توسط منبع بادی.
- C_i^{C} : هزینه تامین یک کیلو وات انرژی در ساعت iام توسط منبع حرارتی معمول.
- C_i^{B} : هزینه تامین یک کیلو وات انرژی در ساعت iام توسط باتری.
- D_i : تقاضای ساعت iام بر حسب کیلو وات ساعت.
- B_{max} : حداکثر ظرفیت مجاز باتری بر حسب کیلو وات ساعت.
- B_{min} : حداقل ظرفیت مجاز باتری بر حسب کیلو وات ساعت.
- B_{start} : انرژی اولیه ذخیره شده در باتری بر حسب کیلو وات ساعت.
- E_{charge}^{PVB} : حداکثر انرژی که در یک ساعت می‌توان از منبع فتوولتائیک برای شارژ باتری استفاده کرد برحسب کیلو وات ساعت.
- E_{charge}^{WB} : حداکثر انرژی که در یک ساعت می‌توان از منبع بادی برای شارژ باتری استفاده کرد برحسب کیلو وات ساعت.
- $E_{discharge}^{B}$: حداکثر انرژی که در یک ساعت می‌توان از باتری دریافت کرد بر حسب کیلو وات ساعت.
- R_{ij} : قابلیت اطمینان منبع jام در ساعت iام.
- G_i : پیش‌بینی میزان تابش در ساعت iام بر حسب وات بر متر مربع.
- V_i : پیش‌بینی میزان سرعت وزش باد در ساعت iام بر حسب کیلومتر بر ساعت.
- r : شعاع پره توربین بر حسب متر.
- P_{sn} : نرخ معادل قدرت خروجی از تولید کننده‌های فتوولتائیکی بر حسب وات ساعت.
- G_{std} : تابش در محیط استاندارد بر حسب وات بر متر مربع.
- R_C : یک نقطه تابش معین از مجموعه بر حسب وات بر متر مربع.
- ρ : تراکم باد بر حسب کیلوگرم بر متر مکعب.
- β : ضریب بهره‌وری که به طراحی توربین وابسته است و نمی‌تواند بیش از ۵۹٪ باشد.

۳-۳-۲. متغیرهای تصمیم‌گیری

- E_i^{PV} : مقدار انرژی که در ساعت iام از منبع فتوولتائیک به طور م ستقیم برای برآورده کردن تقا ضا دریافت می شود بر حسب کیلو وات ساعت.
- E_i^{PVB} : مقدار انرژی که در ساعت iام از منبع فتوولتائیک برای شارژ باتری استفاده می‌شود بر حسب کیلو وات ساعت.
- E_i^{W} : مقدار انرژی که در ساعت iام از منبع بادی به طور مستقیم برای برآورده کردن تقاضا دریافت می‌شود بر حسب کیلو وات ساعت.
- E_i^{WB} : مقدار انرژی که در ساعت iام از منبع بادی برای شارژ باتری استفاده می‌شود بر حسب کیلو وات ساعت.
- E_i^{B} : مقدار انرژی که در ساعت iام از باتری برای برآورده کردن تقاضا دریافت می‌شود بر حسب کیلو وات ساعت.
- B_i : مقدار انرژی که در ساعت iام در باتری وجود دارد برحسب کیلو وات ساعت.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2025-08-18]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1397.7.1.10.4]

$$minF = \sum_{i=۱}^{۲۴}(C_i^{PV} - C_i^C)E_i^{PV} + (C_i^W - C_i^C)E_i^W + (C_i^B - C_i^C)E_i^B + C_i^C D_i \quad (۱)$$

$$\max R_s = \prod_{i=۱}^{۲۴}\left(۱ - \prod_{j=۱}^{۳}(۱ - R_{ij})\right) \quad (۲)$$

s.t

$$E_i^{PV} + E_i^{PVB} \le \left[P_{sn}\frac{(G_i)^۲}{G_{std}R_c}\right] \qquad \forall\ G_i < R_c\ ,i \quad (۳)$$

$$E_i^{PV} + E_i^{PVB} \le \left[P_{sn}\frac{G_i}{G_{std}}\right] \qquad \forall\ G_i \ge R_c\ ,i \quad (۴)$$

$$E_i^W + E_i^{WB} \le ۰ \qquad \forall\ V_i \le V_۱\ or\ V_i \ge V_۳\ ,\ i \quad (۵)$$

$$E_i^W + E_i^{WB} \le \frac{۱}{۲}.\beta.\rho.\pi.r^۲.V_i^۳ \qquad \forall\ V_۱ < V_i \le V_۲\ ,\ i \quad (۶)$$

$$E_i^W + E_i^{WB} \le ۱۵۷۰ \qquad \forall\ V_۲ < V_i < V_۳\ ,\ i \quad (۷)$$

$$E_i^{PV} + E_i^W + E_i^B \le D_i \qquad \forall\ i \quad (۸)$$

$$B_i = B_{start} + \sum_{k=۱}^{i}(E_k^{PVB} + E_k^{WB} - E_k^B) \quad (۹)$$

$$B_i \le B_{max} \qquad \forall i \quad (۱۰)$$

$$B_i > B_{min} \qquad \forall i \quad (۱۱)$$

$$E_i^B + \frac{aE_{discharge}^B}{(B_{max} - B_{min})}\sum_{k=۱}^{i}(E_k^B - E_k^{PVB} - E_k^{WB}) \le E \qquad \forall i \quad (۱۲)$$

$$E_i^{PVB} \le E_{charge}^{PVB} \qquad \forall\ i \quad (۱۳)$$

$$E_i^{WB} \le E_{charge}^{WB} \qquad \forall\ i \quad (۱۴)$$

$$\sum_{k=۱}^{۲۴}(E_k^B - E_k^{PVB} - E_k^{WB}) \le (۱ - \gamma)B_{start} \quad (۱۵)$$

$$R_{ij} = G_i/۱۰۰۰ \qquad \forall\ j = ۱\ ,\quad i \quad (۱۶)$$

$$R_{ij} = ۰ \qquad \forall\ V_i \le V_۱\ or\ V_i \ge V_۳\ ,j = ۲,\ \ i \quad (۱۷)$$

$$R_{ij} = [(V_i - V_۱)/(V_۲ - V_۱)] \quad \forall\ V_۱ < V_i \le V_۲\ ,\ j = ۲\ ,\ i \quad (۱۸)$$

$$R_{ij} = ۱ \qquad \forall\ V_۲ < V_i < V_۳\ ,\ j = ۲\ ,\ i \quad (۱۹)$$

$$R_{ij} = [(B_i - B_{min})/(B_{max} - B_{nin})] \qquad \forall\ j = ۳\ ,\ i \quad (۲۰)$$

$$E_I^{PV}, E_i^W, E_i^B, E_i^{PVB}, E_i^{WB}, R_{ij} \quad (۲۱)$$

مدل پیشنهادی می‌تواند برای چند روز با هر کسری از یک ساعت (به طور مثال (۱، ۵، ۱۰، ۲۰و ۳۰ دقیقه) تعمیم داده شـــود. در ادامه با توجه به مدل ریاضـی ارائه شـده به تشـریح آن خواهیم پرداخت. رابطه شماره (۱) تابع هدف اول می‌باشد که هزینه کل تامین تقاضای انرژی برای یک روز در فواصل کوچک ساعتی را حداقل می‌کند. به طور کلی مقدار انرژی که از هر منبع دریافت می‌شـــود در هزینه مربوط به آن ضرب می‌گردد. مانند رابطه (۱'):

$$F = \sum_{i=۱}^{۲۴}[C_i^C E_i^C + C_i^{PV}E_i^{PV} + C_i^W E_i^W + C_i^B E_i^B] \quad (۱')$$

از آنجایی که تابع هدف به رابطه ("۲) وابســـته اســـت. در این رابطه انرژی منابع مختلف باید تقاضا را برآورده کنند.

$$E_i^C + E_i^{PV} + E_i^W + E_i^B = D_i \quad (۲")$$

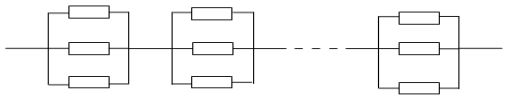
حال با ادغام روابط (۱') و ("۲) می‌توان رابطه (۱) را نتیجه گرفت.

رابطه شـــماره (۲) تابع هدف دوم مســـئله می‌باشـــد که از نوع حداکثر کردن قابلیت اطمینان برای منابع تجدیدپذیر اســـت. طبق تعاریف و

[Downloaded from ieijqp.ir on 2025-08-18]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1397.7.1.10.4]

روابط مربوط به محاسبه قابلیت اطمینان شبکه‌ای که برای این تحقیق در نظر گرفته می شود مانند شکل (۲) می‌با شد. که در هر ساعت سه منبع خورشیدی، بادی و باتری به صورت موازی کنار هم قرار می‌گیرند و برای ۲۴ ســـاعت این منابع موازی به صـــورت متوالی کنار هم قرار می‌گیرند.



شکل (۲): سیستمی متوالی با سه عضو موازی برای هر ساعت

محدودیت شماره (۳) و (۴) میزان کل انرژی تولیدی توسط صفحه‌های خورشـیدی را در هر ســاعت که تابعی اســت از میزان تابش خورشـید، محاســبه می‌کند. در هر ســاعت بســته به اینکه پیش‌بینی میزان تابش چه وضـــعیتی در مقایســـه با یک نقطه تابش معین دارد یکی از این محدودیت‌ها اعمال می‌شود. مقدار کل انرژی تولیدی توسط صفحه‌های خورشیدی در یک ساعت برابر است با مقدار انرژی که در همان ساعت از منبع خور شیدی دریافت و به طور م ستقیم برای تامین تقا ضا، وارد شبکه بعلاوه‌ی مقدار انرژی که در همان ساعت از منبع خورشیدی وارد باتری می‌گردد.

محدودیت‌های شـــماره (۵)، (۶) و (۷) میزان کل انرژی الکتریســـیته تولیدی توســـط توربین‌های بادی در یک ســـاعت را که تابعی اســـت از ســـرعت وزش باد محاســـبه می‌کند. در هر ســـاعت با توجه به پیش‌بینی ســـرعت وزش باد یکی از ســـه حالت اتفاق می‌افتد. مقدار کل انرژی تولیدی توسط توربین‌های بادی در یک ساعت برابر است با مقدار انرژی که در همان ســـاعت از توربین بادی دریافت و به طور مســـتقیم برای تامین تقا ضا، وارد شبکه بعلاوه‌ی مقدار انرژی که در همان ساعت وارد باتری می‌گردد [۸].

محدودیت شماره (۸) نشان می‌دهد که مجموع مقدار انرژی که از منبع خور شیدی، بادی و باتری به طور م ستقیم وارد شبکه می شود حداکثر به اندازه تقاضای همان ساعت است.

محدودیت شـــماره (۹) مقدار انرژی که در ســـاعت iام در باتری وجود دارد را محاسبه می‌کند.

محدودیت شـماره (۱۰) و (۱۱) بیان کننده آن اســت، مقدار انرژی که در ســـاعت iام در باتری وجود دارد از حداکثر ظرفیت باتری تجاوز نمی‌کند و از حداقل ظرفیت باتری کمتر نمی‌شود.

محدودیت شـــماره (۱۲) بیان کننده آن اســـت، مقدار انرژی که در هر ساعت می‌توان از باتری دریافت کرد وابسته است به مقدار انرژی که در باتری وجود دارد. یعنی هرچه انرژی ذخیره شده در باتری بیشتر با شد خروجی به حداکثر ظرفیت خروجی ($E^B_{discharge}$) نزدیک می‌باشـــد و برعکس. این محدودیت در واقع بر گرفته از رابطه (۱۲') می‌باشد:

$$E^B_i \le E^B_{discharge} \quad \forall\ i \qquad (۱۲')$$

یعنی مقدار انرژی که در ســـاعت iام می‌توان از باتری دریافت کرد حداکثر برابر ظرفیت خروجی باتری می‌باشـــد. که این رابطه را می‌توان به صورت زیر فرموله کرد:

$$E^B_i \le E^B_{discharge}[۱ - a + a(B_i - B_{min}/B_{max} - B_{min})]$$

به عبارتی می‌توان اینطور بیان کرد، اجازه برای دریافت از باتری که وابســـته اســـت به حالت شـــارژ، یعنی اگر $B_i = B_{max}$ انرژی دریافتی حداکثر مقدار و اگر $B_i = B_{min}$ انرژی در یافتی توســـط فاکتور a کاهش خواهد یافت [۹].

سمت راست این محدودیت شماره (۱۲) به یک تابعی وابسته است که داریم:

$$E = E^B_{discharge}(۱ - a) + aE^B_{discharge}\left(\frac{B_{start} - B_{min}}{B_{max} - B_{min}}\right)$$

محدودیت شماره (۱۳) و (۱۴) بیان کننده آن است که مقدار انرژی که در ساعت iام می‌توان توسط صفحه خورشیدی یا توربین بادی در باتری ذخیره کرد، حداکثر برابر اســـت با حداکثر ظرفیت شـــارژ توســـط منبع خورشیدی یا توربین بادی.

محدودیت شماره (۱۵) نشان دهنده آن است که مقدر انرژی که بعد از ورود و خروج از باتری در ساعت آخر یک روز، در باتری می‌ماند بایستی به اندازه‌ی $(۱ - \gamma)$ درصد حالت اولیه شارژ وارد مرحله بعد شود یا به اندازه γ درصد ظرفیت شروع برای یک دوره مصرف شود. که داریم:

$$B_{۲۴} = B_{start} + \sum_{k=۱}^{۲۴}(E^{PVB}_k + E^{WB}_k - E^B_k) \ge \gamma B_{start}$$

بنابراین باتری باید دوباره شارژ شود تا به یک سطحی از شارژ که کمتر یا مســـاوی با حالت اولیه اســـت در پایان دوره برنامه‌ریزی برســـد. یا به عبارتی ظرفیت باتری در ســـاعت ۲۴ نباید از ظرفیت باتری در لحظه شروع کمتر باشد [۹].

محدودیت شماره (۱۶) قابلیت اطمینان صفحه‌های خور شیدی را برای هر ساعت محا سبه می‌کند. قابلیت اطمینان صفحه خور شیدی تابعی است از پیش‌بینی میزان تابش خورشید.

محدودیت شماره (۱۷)، (۱۸) و (۱۹) قابلیت اطمینان توربین‌های بادی را برای هر ساعت محاسبه می‌کند. قابلیت اطمینان توربین بادی، تابعی از سرعت وزش باد می‌باشد.

محدودیت شـــماره (۲۰) قابلیت اطمینان باتری را برای هر ســـاعت محا سبه می‌کند. قابلیت اطمینان باتری تابعی ا ست از مقدار انرژی که در باتری می‌باشد.

در نهایت محدودیت (۲۱) نشـــان می‌دهد که متغیر تصـــمیم و قابلیت اطمینان نمی‌توانند منفی باشند.

۴. روش حل و نتایج محاسباتی

الگوریتم‌هایی که برای حل مســـائل بهینه ســـازی در نظر گرفته می‌شـــوند را می‌توان در دو دســـته الگوریتم‌های دقیق و تقریبی

[Downloaded from ieijqp.ir on 2025-08-18]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1397.7.1.10.4]

طبقه‌بندی نمود. برای مسائل با اندازه‌های کوچک می‌توان از الگوریتم‌های دقیق استفاده نمود چرا که توانایی یافتن پاسخ‌های بهینه در زمان محاسباتی معقول را دارند. ولی برای مسائل کاربردی با اندازه های بزرگ از رویکرد های تقریبی استفاده می شود، که هر چند با کاهش قابل توجه زمان محاسباتی همراه هستند، اما این مزیت به بهای از بین رفتن تضمین یافتن جواب بهینه بدست می‌آید.

برای حل دقیق مسئله از نرم‌افزار لینگو استفاده شده است که نرم‌افزار لینگو قابلیت حل مسائل دو هدفه را ندارد لذا از روش وزن‌دار کردن دو هدف را به یک هدف تبدیل کرده، وزن هدف اول را ۰٫۶ و وزن هدف دوم را ۰٫۴ در نظر گرفته می‌شود. از آنجایی که قابلیت اطمینان پارامتری بی‌بعد است با استفاده از روش نرمالیزه کردن هدف اول را بی‌بعد کرده و مسئله را با یکسری داده‌های تصادفی با توجه به مفروضات مسئله برای پارامترها در نظر خواهیم گرفت، مانند جداول (۱) و (۲) که نتایج بدست آمده از نرم افزار لینگو را در جدول (۳) ارائه گردید.

جدول (۱): داده‌های تصادفی برای پارامترهای مسئله

	D(kwh)	G(w/m²)	V(km/h)	C^B	C^W	C^{PV}	C^C
۱	۷۴۰۰	۰	۳٫۵	۰٫۰۱۱	۰٫۰۰۹	۰٫۰۱	۰٫۰۸
۲	۷۱۰۰	۰	۳٫۶	۰٫۰۱۱	۰٫۰۰۹	۰٫۰۱	۰٫۰۸
۳	۶۹۰۰	۰	۱٫۵	۰٫۰۱۱	۰٫۰۰۹	۰٫۰۱	۰٫۰۸
۴	۶۸۰۰	۰	۱٫۴	۰٫۰۱۱	۰٫۰۰۹	۰٫۰۱	۰٫۰۸
۵	۷۰۰۰	۰	۱.	۰٫۰۱۱	۰٫۰۰۹	۰٫۰۱	۰٫۰۸
۶	۷۵۰۰	۰	۱٫۸	۰٫۰۱۱	۰٫۰۰۹	۰٫۰۱	۰٫۰۸
۷	۸۳۰۰	۱۱۱	۱٫۳	۰٫۰۱۱	۰٫۰۰۹	۰٫۰۱	۰٫۰۸۳
۸	۸۶۰۰	۳۱۱	۲٫۲	۰٫۰۱۱	۰٫۰۰۹	۰٫۰۱	۰٫۰۸۶
۹	۹۲۰۰	۳۷۵	۳٫۸	۰٫۰۱۱	۰٫۰۰۹	۰٫۰۱	۰٫۰۹۲
۱۰	۹۵۰۰	۵۰۳	۳٫۷	۰٫۰۱۱	۰٫۰۰۹	۰٫۰۱	۰٫۰۹۵
۱۱	۹۶۰۰	۶۱۷	۲	۰٫۰۱۱	۰٫۰۰۹	۰٫۰۱	۰٫۰۹۶
۱۲	۹۴۰۰	۶۸۶	۶.	۰٫۰۱۱	۰٫۰۰۹	۰٫۰۱	۰٫۰۹۴
۱۳	۹۳۵۰	۷۰۳	۴.	۰٫۰۱۱	۰٫۰۰۹	۰٫۰۱	۰٫۰۹۳۵
۱۴	۹۳۰۰	۷۳۶	۸٫۴	۰٫۰۱۱	۰٫۰۰۹	۰٫۰۱	۰٫۰۹۳
۱۵	۹۲۵۰	۵۸۶	۹٫۹	۰٫۰۱۱	۰٫۰۰۹	۰٫۰۱	۰٫۰۹۲۵
۱۶	۹۳۰۰	۴۲۵	۱۰٫۱	۰٫۰۱۱	۰٫۰۰۹	۰٫۰۱	۰٫۰۹۳
۱۷	۹۴۰۰	۲۹۱	۹٫۷	۰٫۰۱۱	۰٫۰۰۹	۰٫۰۱	۰٫۰۹۴
۱۸	۹۶۰۰	۸۶	۹٫۲	۰٫۰۱۱	۰٫۰۰۹	۰٫۰۱	۰٫۰۹۶
۱۹	۱۰۰۰۰	۰	۹٫۶	۰٫۰۱۱	۰٫۰۰۹	۰٫۰۱	۰٫۱
۲۰	۹۵۰۰	۰	۱۰	۰٫۰۱۱	۰٫۰۰۹	۰٫۰۱	۰٫۰۹۵
۲۱	۹۲۵۰	۰۰	۱۰	۰٫۰۱۱	۰٫۰۰۹	۰٫۰۱	۰٫۰۹۲۵
۲۲	۸۴۰۰	۰	۹٫۵	۰٫۰۱۱	۰٫۰۰۹	۰٫۰۱	۰٫۰۸۴
۲۳	۸۰۰۰	۰	۹٫۹	۰٫۰۱۱	۰٫۰۰۹	۰٫۰۱	۰٫۰۸
۲۴	۷۷۰۰	۰	۱۲٫۶	۰٫۰۱۱	۰٫۰۰۹	۰٫۰۱	۰٫۰۸

[Downloaded from ieijqp.ir on 2025-08-18]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1397.7.1.10.4]

جدول (۲): مقادیر در نظر گرفته شده برای پارامترهای مسئله

B_{max}	B_{min}	B_{start}	E_{charge}^{PVB}	E_{charge}^{WB}	$E_{discharge}^{B}$	P_{sn}	G_{std}	R_c
۲۰۰۰۰	۶۰۰۰	۱۴۰۰۰	۲۰۰۰	۲۲۰۰	۴۰۰۰	۸۳۳	۱۰۰۰	۱۵۰
$V_۱$	$V_۲$	$V_۳$	α	B	R	ρ	γ	
۲	۱۱	۱۵	۰٫۵	۰٫۵	۲۲	۱٫۲۲۵	۰٫۵	

جدول (۳): نتایج بدست آمده از حل مسئله آزمایشی با نرم‌افزار لینگو

	E_i^{PV}	E_i^{W}	E_i^{B}	E_i^{PVB}	E_i^{WB}	B_i	R_{i1}	R_{i2}	R_{i3}
۱	۰	۷۴۰۰	۰	۰	۲۲۰۰	۲۰۰۰۰	۰	۰/۱۶۷	۱
۲	۰	۷۱۰۰	۰	۰	۲۲۰۰	۲۰۰۰۰	۰	۰/۱۷۸	۱
۳	۰	۰	۳۹۴۲/۵۱۲	۰	۰	۲۰۰۰۰	۰	۰	۱
۴	۰	۰	۰	۰	۰	۲۰۰۰۰	۰	۰	۱
۵	۰	۰	۰	۰	۰	۲۰۰۰۰	۰	۰	۱
۶	۰	۰	۳۹۴۲/۵۱۲	۰	۰	۲۰۰۰۰	۰	۰	۱
۷	۶۸/۴۲۲	۰	۴۰۰۰	۰	۰	۲۰۰۰۰	۰/۱۱۱	۰	۱
۸	۲۵۹/۰۶۳	۴۹۵۵/۸۶۱	۳۳۸۵/۰۷۶	۰	۰	۲۰۰۰۰	۰/۳۱۱	۰/۰۲۲	۱
۹	۰	۹۲۰۰	۰	۳۱۲/۳۷۵	۲۲۰۰	۲۰۰۰۰	۰/۳۷۵	۰/۲	۱
۱۰	۰	۹۵۰۰	۰	۴۱۸/۹۹۹	۲۲۰۰	۲۰۰۰۰	۰/۵۰۳	۰/۱۸۹	۱
۱۱	۵۱۳/۹۶۱	۰	۴۰۰۰	۰	۰	۲۰۰۰۰	۰/۶۱۷	۰	۱
۱۲	۵۷۱/۴۳۸	۰	۴۰۰۰	۰	۰	۲۰۰۰۰	۰/۶۸۶	۰	۱
۱۳	۵۸۵/۵۹۹	۰	۴۰۰۰	۰	۰	۲۰۰۰۰	۰/۷۰۳	۰	۱
۱۴	۰	۹۳۰۰	۰	۶۱۳/۰۸۸	۲۲۰۰	۲۰۰۰۰	۰/۷۳۶	۰/۷۱۱	۱
۱۵	۰	۹۲۵۰	۰	۴۸۸/۱۳۸	۲۲۰۰	۲۰۰۰۰	۰/۵۸۶	۰/۸۷۸	۱
۱۶	۰	۹۳۰۰	۰	۳۵۴/۰۲۵	۲۲۰۰	۲۰۰۰۰	۰/۴۲۵	۰/۹	۱
۱۷	۰	۹۴۰۰	۰	۲۴۲/۴۰۳	۲۲۰۰	۲۰۰۰۰	۰/۲۹۱	۰/۸۵۶	۱
۱۸	۰	۹۶۰۰	۰	۴۱/۰۷۲	۲۲۰۰	۲۰۰۰۰	۰/۰۸۶	۰/۸	۱
۱۹	۰	۱۰۰۰۰	۰	۰	۲۲۰۰	۲۰۰۰۰	۰	۰/۸۴۴	۱
۲۰	۰	۹۵۰۰	۰	۰	۲۲۰۰	۲۰۰۰۰	۰	۰/۸۹۹	۱
۲۱	۰	۹۲۵۰	۰	۰	۲۲۰۰	۲۰۰۰۰	۰	۰/۸۸۹	۱
۲۲	۰	۸۴۰۰	۰	۰	۲۲۰۰	۲۰۰۰۰	۰	۰/۸۳۳	۱
۲۳	۰	۸۰۰۰	۰	۰	۲۲۰۰	۲۰۰۰	۰	۰/۸۷۸	۱
۲۴	۰	۱۵۷۰	۰	۰	۰	۲۰۰۰۰	۰	۱	۱

[Downloaded from ieijqp.ir on 2025-08-18]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1397.7.1.10.4]

۴-۱. الگوریتم فراابتکاری پیشنهادی برای حل مسئله

با توجه به پیچیدگی مسئله مورد بررسی، الگوریتم جستجوی دقیق برای حل آن نیاز به زمان محاسباتی زیادی دارند و این زمان با بزرگ شدن ابعاد مسئله به صورت نمایی افزایش می‌یابد و در برخی موارد نیز یافتن جواب بهینه عملا امکان پذیر نمی باشد. لذا الگوریتم های فراابتکاری که در پی به‌دست آوردن جواب با کیفیت خوب در زمان معقول باشند، در حل این مسئله کاربرد بسیار پیدا کرده است. به همین منظور در این تحقیق، یک الگوریتم فراابتکاری NSGAII برای حل مدل به‌کار گرفته می‌شود.

ایده اولیه الگوریتم ژنتیک از نظریه تکاملی داروین الهام گرفته شده است و کاربرد آن بر اساس ژنتیک طبیعی استوار می‌باشد. در الگوریتم ژنتیک هر جواب به صورت یک رشته از کدها بیان می‌شود که آن را اصطلاحا کروموزوم می‌نامند. هر کروموزوم متناظر با یک جواب از مجموعه جواب‌های مسئله می‌باشد. جواب متناظر با هر کروموزوم را برازندگی آن کروموزوم می‌نامند. عناصر تشکیل دهنده رشته کروموزوم که معمولا اعداد هستند را ژن می‌گویند. برای شروع حل، الگوریتم نیاز به مجموعه‌ای از کروموزوم‌ها دارد، این مجموعه از کروموزوم‌ها را یک جامعه می‌نامند و هر تکرار از الگوریتم یک نسل گفته می‌شود [۱۸]. الگوریتم ژنتیک کار خود را با یک جامعه‌ای از جواب‌ها که از طریق یک فرایند تصادفی ایجاد شده‌اند، آغاز می‌کند. جامعه جواب‌ها توسط یک تابع برازش ارزیابی می‌شوند. هر بار که ارزیابی اعضای جامعه صورت می‌پذیرد، تعدادی از آنها با توجه به میزان برازش محاسبه شده به عنوان والدین انتخاب می‌شوند. به طور طبیعی اعضایی که میزان برازش بیشتری دارند از احتمال بیشتری برای انتخاب برخوردارند. با بکارگیری عملیات ژنتیک بر روی والدین، جمعیت فرزندان تولید می‌شوند و پس از آن از میان جمعیت فعلی و جمعیت فرزندان جامعه جدیدی تولید می‌شود. تا این مرحله الگوریتم یک تکرار یا یک نسل را طی نموده است و پس از طی چندین نسل به تدریج به سمت جواب بهینه همگرا خواهد شد.

۴-۲. الگوریتم ژنتیک بر مبنای مرتب‌سازی نامغلوب

الگوریتم NSGAII یکی از معروف‌ترین و موثرترین الگوریتم‌های تکاملی چند هدفه می‌باشد که توسط دب و همکارانش [۱۹] در سال ۲۰۰۲ میلادی معرفی شده است. این الگوریتم با بکارگیری یک جمعیت اولیه و بر مبنای مفهوم غلبه می‌تواند تقریب خوبی از لبه‌ی پارتوی بهینه بدست آورد. دو عملگر مهم این الگوریتم، رتبه بندی نامغلوب سریع و فاصله ازدحامی می‌باشند. عملگر رتبه بندی جمعیت کروموزوم، کروموزوم‌ها را به لبه‌های مختلف تقسیم بندی می‌کند وآن‌ها را به ترتیب صعودی مرتب می‌کند. عملگر فاصله ازدحامی میزان پراکندگی پاسخ‌ها را روی هر لبه محاسبه می‌کند و آن‌ها را به ترتیب نزولی مرتب می‌کند و همچنین باعث حفظ گوناگونی در مسئله می‌شود.

۴-۲-۱.نمایش کروموزومی مسئله

اولین گام در بکار گیری الگوریتم NSGAII کد گذاری و نمایش جواب‌های مسئله به صورت یک کروموزوم است. انتخاب ساختار مناسب برای کدگذاری جواب‌ها موجب ساده سازی و کاهش زمان محاسباتی عملیات صورت گرفته در طول اجرای الگوریتم می شود. از آنجایی که مسئله مورد بررسی در این تحقیق یک مسئله خاص بوده و از قبل با چنین ویژگی‌هایی روی آن کار نشده است لذا کروموزومی که برای این تحقیق در نظر گرفته شده است، کروموزوم دو بعدی ۲۴*۶ می‌باشد مانند شکل (۳) که برای ۲۴ ساعت یک شبانه‌روز ۶ متغیر تصمیم مسئله را پاسخ می‌دهد. به علت طولانی بودن طول رشته کروموزوم خلاصه‌ای از آن را در شکل (۳) ارائه شده است. و اعداد داخل کروموزوم از جواب بهینه حل لینگو پر گردید.

۰	۰	۰
۰	۰	۰
۷۴۰۰	۷۱۰۰	۰
۲۲۰۰	۲۲۰۰	۰
۰	۰	۳۹۴۳
۲۰۰۰۰	۲۰۰۰۰	۲۰۰۰۰

۰
۰
۱۵۷۰
۰
۰
۲۰۰۰۰

شکل (۳) نحوه نمایش کروموزومی

سطر اول مربوط به مقدار انرژی است که در ساعت iام از طریق صفحه خورشیدی به طور مستقیم وارد شبکه می‌گردد. سطر دوم مقدار انرژی را که در ساعت iام از طریق صفحه خور شیدی وارد باتری می شود را نشان می‌دهد. سطر سوم مربوط به مقدار انرژی است که در ساعت iام از طریق توربین بادی به طور مستقیم وارد شبکه می‌گردد. سطر چهارم مقدار انرژی را که در ساعت iام از طریق توربین بادی وارد باتری می شود را نشان می‌دهد. سطر پنجم مقدار انرژی که در ساعت iام از باتری برای تامین تقاضا دریافت می‌شود را نشان می‌دهد. و سطر ششم مقدار انرژی که در ساعت iام در باتری وجود دارد را نشان می‌دهد.

۴-۲-۲. تولید جمعیت اولیه

پس از تعیین سیستم کدینگ و مشخص شدن روش تبدیل هر جواب به کروموزم، باید یک جمعیت اولیه از کروموزم‌ها تولید نمود. در این تحقیق از استراتژی کاملا تصادفی برای تولید جمعیت اولیه استفاده شده است. همانطور که در قسمت مدل سازی مسئله اشاره گردید انرژی تولیدی توسط صفحه خورشیدی و توربین بادی به توابعی وابسته هستند که به ترتیب از جنس پیش‌بینی میزان تابش خورشید و سرعت وزش باد می‌باشند. برای تولید جمعیت مربوط به سطر یک یا سه ابتدا

[Downloaded from ieijqp.ir on 2025-08-18]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1397.7.1.10.4]

کل انرژی تولیدی توسط صفحه خورشیدی یا توربین بادی برای هر ساعت محاسبه می‌گردد. حال اگر کل انرژی تولیدی توسط منبع خورشیدی یا بادی مقدار گرفته باشد برای ژن مربوط به آن ساعت یک عدد تصادفی در فاصله‌ی صفر تا کل انرژی تولیدی آن منبع محاسبه می‌شود. مقدار بدست آمده به ژن مربوطه اختصاص داده می‌شود، ولی اگر کل انرژی تولیدی صفر باشد در ژن مربوطه صفر لحاظ می‌گردد. برای جمعیت مربوط به سطر دو یا چهار مقدار قرار گرفته در سطر یک یا سه را از کل انرژی تولیدی در آن ساعت توسط منبع خورشیدی یا بادی کسر کرده، با حداکثر مقدار انرژی که می‌توان در یک ساعت توسط آن منبع وارد باتری گردد مقایسه کرده و حداقل آن به ژن سطر دو یا چهار اختصاص داده می‌شود. برای تولید جمعیت مربوط به سطر پنجم به تقاضا و مقدار انرژی که در ساعت قبل در باتری وجود دارد بستگی دارد. اگر مجموع ژن‌های مربوط به سطر یک، سه و پنج بیش از تقاضا باشد مازاد انرژی از ژن‌های سطر یک و سه به طور مساوی کسر می‌گردد به طوری که هیچ ژنی مقدار منفی نمی‌پذیرد. به منظور تولید جمعیت مربوط به سطر ششم برای هر ساعت مجموع انرژی اولیه باتری را با اختلاف تبادل انرژی در باتری برای هر ساعت محاسبه می‌گردد. با توجه به اندازه جمعیت اولیه این عمل تکرار شده و جمعیت اولیه تولید می‌گردد.

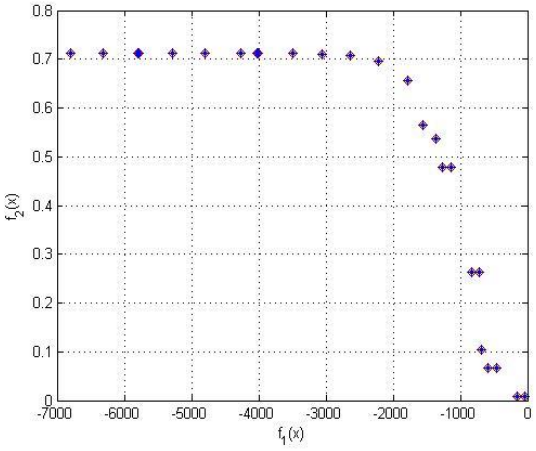
۴-۲-۳. محاسبه و ارزیابی برازندگی

تابع برازش شاخصی برای ارزیابی کروموزوم‌ها می‌باشد، بدین ترتیب کروموزومی که برازندگی بیشتری دارد با احتمال بیشتری در تولید فرزندان شرکت می‌کند و جواب‌های بیشتری به دنبال آن تولید می‌شوند. با این حال در مسائل چند هدفه که به دنبال یافتن مجموعه‌ای از جواب‌ها تحت عنوان نقاط پارتو می‌باشند این سادگی عمل با پیچیدگی بیشتری مواجه می‌شود. جهت اختصاص برازش به جواب‌ها در این تحقیق مقدار توابع هدف برای هر هدف محاسبه گردید و برای اعمال محدودیت‌های مسئله میزان تخطی از محدودیت‌ها برای همه محدودیت‌ها محاسبه گردیده با هم جمع شده و در یک عدد بزرگ ضرب شده و با هدف اول جمع می‌کنیم که احتمال انتخاب آن کروموزوم برای تولید فرزند کم می‌شود.

در این تحقیق از دو عملگر تقاطع و جهش برای تولید فرزند استفاده می‌گردد. تقاطع تک نقطه‌ای با نرخ ۰٫۸ و جهش پیوسته از نوع جایگذاری با نرخ ۰٫۳ استفاده گردید. پس از آنکه عمل تقاطع انجام می‌شود ممکن است فرزندانی تولید شوند که معادل هیچ جواب موجهی در فضای حل نباشند. این کروموزوم‌های ناموجه با اعمال جریمه پذیرفته می شوند. این جریمه عبارت است از کاهش قابل ملاحظه تابع برازش به طوری که برازندگی و شانس بقای جواب برای نسل‌های بعد به شدت ضعیف می‌گردد.

۴-۲-۴. تجزیه و تحلیل نتایج الگوریتم

با توجه به تعاریفی که از پیکره بندی الگوریتم NSGAII برای مسئله مورد بررسی در این تحقیق شده است، زمانبندی برای تامین تقاضای برق با استفاده از منابع تجدیدپذیر و منابع معمول، ارائه گردید. الگوریتم را با داده‌های تصادفی جداول (۱) و (۲) مجددا با استفاده از نرم‌افزار MATLAB 2009 حل گردید زمان محاسباتی در این حالت به ۳۲ ثانیه کاهش یافت و مجموعه پارتو با ۲۵ جواب طبق شکل (۴) بدست آمد. حال بسته به نظر تصمیم‌گیرنده و درجه اهمیت این اهداف می‌توان هر یک از این جواب‌ها را به عنوان جواب بهینه در نظر گرفت. در نتیجه جواب حاصل از الگوریتم NSGAII مقدار بهینه برای هر هدف را در یک زمان قابل قبولی ارائه می‌دهد. در ضمن جمعیت ۵۰تایی و تکرار ۱۰۰تایی برای این تحقیق در نظر گرفته شد.



شکل (۴): نقاط پارتو حاصل از حل الگوریتم NSGAII

۵. نتیجه‌گیری

در این تحقیق یک مسئله بهینه سازی دو هدفه‌ای برای تامین تقاضای برق با استفاده از منابع تجدیدپذیر سلول‌های خورشدی و توربین‌های بادی که قابلیت ذخیره سازی انرژی در باتری را دارند و منابع حرارتی معمول که به عنوان یک منبع جایگزین فرض شده است، در نظر گرفته شده‌اند. تابع هدف‌های مسئله حداقل کردن هزینه و حداکثر کردن قابلیت اطمینان می‌باشد. برای مسئله مورد نظر یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی دو هدفه ارائه نمودیم که برای حل از نرم‌افزار لینگو استفاده کردیم که نرم‌افزار لینگو هرچند جواب بهینه به ما می‌دهد ولی مسئله دو هدفه حل نمی‌کند که مجبور شدیم آن را با روش وزن‌دار کردن به یک هدف تبدیل کنیم، و همچنین زمان محاسباتی طولانی داشت. لذا برای حل، الگوریتم فراابتکاری NSGAII را پیشنهاد کردیم که در یک زمان قابل قبولی مسئله را حل کرد 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 شوند.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2025-08-18]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1397.7.1.10.4]

۶. مراجع

[۱] کالیانموی. دب، الگوریتم‌های ژنتیک با رویکرد بهینه‌یابی چندهدفه، ترجمه جعفر رضـایی و منصـور داوودی‌فر، انتشـارات پلک، چاپ آبان ۱۳۸۷.

[۲] روی. بیلینتون ، رونالد. آلن، ارزیابی قابلیت اطمینان سـیسـتم‌های مهند سی مفاهیم و رو شها، ترجمه دکتر مح سن ر ضائیان، انت شارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر،چاپ بهار ۱۳۹۳.

[۳] رضائیان جواد، شفیع پور عمرانی مسعود، عبداله پور سناء، الگوریتم‌های فراابتکاری و کاربردهای آن، انتشارات جهاد دانشگاهی مازندران، تابستان ۱۳۹۳.

[٤] فلقی حمید، حقی‌فام محمودرضا، مدل‌سازی و تحلیل اثر تولید پراکنده روی قابلیت اطمینان شبکه‌های توزیع، بیستمین کنفرانس بین‌المللی برق، سال ۱۳۸۴.

[٥] فندرسکی محمود، عرب‌یار محمدی محمدتقی، رستگار حسن، پیرایش نقاب ابولفضل، ارزیابی قابلیت اطمینان نیروگاه‌های بادی منجیل و نیشابور، بیست و دومین کنفرانس بین‌المللی برق، سال ۱۳۸۶.

[6] Yang Hong Xing, Zhou Wei, Lou Changsha, Optimal design and techno-economic analysis of an ybrid solar-wind power generation system, Journal of Biotechnology, Vol. 118, Issue 1, Supplement, 1-۱۸۹, □□□□□□ ۲۰۰۵.

[7] Cha ST, Jeon DH, Bae IS, Lee IR, Reliability evaluation of distribution system connected photovoltaic generation considering weather effects, IEEE Probabilistic Methods Applied to Power Systems, 451-456, 2004.

[8] Liang. R. H, Liao. J. H, A fuzzy-optimization approach for generation scheduling with wind and solar energy systems, IEEE Transactions on Power Systems, vol. 22, NO. 4, ۲۰۰۷.

[9] Torres. D, Crichigno. J, Padilla. G, Rivera. R, Scheduling coupled photovoltaic, battery and conventional energy sources to maximize profit using linear programming, Renewable Energy, vol. 72, pp. 284-290, 2014.

[10] Hill J, Nwankpa C. System constraints effects on optimal dispatch schedule for battery storage systems. In: ISGT '12 proceedings of the 2012 IEEE PES innovative smart grid technologies, pp. 1e8, 2012.

[11] Nottrott A, Kleissl J, Washom B. Energy dispatch schedule optimization and cost benefit analysis for grid-connected, photovoltaic-battery storage systems. Renew Energy, ۵۵:۲۳۰□۴۰, ۲۰۱۳.

[12] Marwali M, Haili M, Shahidehpour S, Abdul-Rahman K. Short term generation scheduling in photovoltaic-utility grid with battery storage. IEEE Transactions Power System, 13:1057e62, 1998.

[13] Riffonneau Y, Bacha S. Optimal power flow management for grid connected PV systems with batteries. IEEE Transactions Sustain Energy, 2:309e20, 2011.

[14] Ho. Y. F, Chang. C. C , Wei. C. C, Multi-objective programming model for energy conservation and renewable energy structure of a low carbon campus, Energy and Buildings, http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild .۲۰۱۴.۰۴.۰۵۴, ۲۰۱۴.

[15] Kermani. M, Perin-Levasseur. Z, Benali. M, Savulescu. L, Marechal. F, An improved linear programming approach for simultaneous optimization of water and energy, European Symposium on Computer Aided Process Engineering, vol. 24, pp. 15-18, 2014..

[16] Lin. J, Cheng. L, Chang. Y, Zhang. K, Shu. B, Liu. G, Reliability based power systems planning and operation with wind power integration: A review to models, algorithms and applications, Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 31, pp. 921-934, 2014.

[17] Chang .C.T, Multi-choice goal programming model for the optimal location of renewable energy facilities, Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 41, pp.379-389, ۲۰۱۵.

[18] Holland J.H. Adaptation in natural and artificial system, An Arbor University of Michigan Press, USA,1975.

[19] Deb K, Pratap A, Agarwal S, Meyarivan T. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. IEEE Transactions on Evolutionary Computation2002; ۶(۲):۱۸۲-۱۹۷.

[20] Behzadi Forough. A, Roshandel. R, Multi Objective Receding Horizon Optimization for Optimal Scheduling of Hybrid Renewable Energy System, Energy and Buildingshttp://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.06.03.

[21] Khare. V, Nema. S, Baredar. P, Solar-wind hybrid renewable energy system : A review, Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 58, pp.23-33, 2016.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2025-08-18]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1397.7.1.10.4]