

نوع مقاله: پژوهشی

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۴/۱

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱/۲۹

طراحی بهینه ریزشبکه چندحاملی با در نظر گرفتن قابلیت اطمینان

وحید امیر^۱، مهدی عظیمیان^{۲*}، مرتضی جوادی فر^۳

^۱ استادیار گروه مهندسی برق و کامپیوتر، واحد کاشان، دانشگاه آزاد اسلامی، کاشان، ایران

v.amir@iaukashan.ac.ir

^۲ دانشجوی دکتری گروه مهندسی برق و کامپیوتر، واحد کاشان، دانشگاه آزاد اسلامی، کاشان، ایران

m.azimian@iaukashan.ac.ir

^۳ دانشجوی دکتری گروه مهندسی برق و کامپیوتر، واحد اراک، دانشگاه آزاد اسلامی، اراک، ایران

m.javadifar97@iau-arak.ac.ir

چکیده: نفوذ بی سابقه تولیدات پراکنده در شبکه انرژی، توزیع شرایط را برای بهره‌وری انرژی توسط ریزشبکه‌ها مهیا کرده است. پیاده‌سازی یک ریزشبکه، مزایای زیادی مانند تعویق سرمایه‌گذاری، کاهش گازهای گلخانه‌ای، بهبود قابلیت اطمینان و کاهش تلفات شبکه را پیشنهاد می‌دهد. شبکه انرژی آینده شامل فرم‌های مختلف انرژی است که از طریق ترکیب منابع و ذخیره‌سازهای مختلف تحت مفهوم ریزشبکه چندحاملی حاصل می‌شوند. به منظور نمایش عملکرد مؤثر این ریزشبکه‌های چندحاملی، بهره‌برداری و طراحی بهینه ضروری است. این مقاله یک استراتژی ترکیبی را به منظور پیدا کردن مناسب‌ترین تجهیز از نظر ظرفیت و نوع به همراهی توزیع بهینه توان در یک ریزشبکه متصل به شبکه با در نظر گرفتن قابلیت اطمینان ارائه می‌کند. در اینجا، سطح مناسب قابلیت اطمینان در فرایند بهینه‌سازی به منظور تأمین تقاضاهای چندگانه مورد ارزیابی قرار گرفته است. در مدل پیشنهادی برای ایجاد یک ریزشبکه جدید از تجهیزات مختلفی نظیر مولد تولید همزمان برق و حرارت، ترانسفورماتور، سیستم خورشیدی، و گرماساز به همراه ذخیره‌ساز انرژی الکتریکی و حرارتی با نرخ‌های خرابی متفاوت از بین چندین نمونه استفاده شده است. روش برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح-آمیخته در نرم‌افزار گمز و الگوریتم ژنتیک در نرم‌افزار متلب برای حل مسئله بهینه‌سازی ترکیبی استفاده شده است. علاوه بر آن، یک برنامه پاسخ‌گویی بار بر اساس قیمت محلی به منظور تغییر الگوی مصرف پیشنهاد شده است. نتایج شبیه‌سازی قابلیت سیستم را برای توسعه برنامه‌ریزی ریزشبکه نشان داده است.

واژه‌های کلیدی: روش بهینه‌سازی ترکیبی، پاسخ‌گویی بار، برنامه‌ریزی توسعه تولید، ریزشبکه چندحاملی، قابلیت اطمینان.

* نویسنده مسئول

مشخصه‌های یکسانی را در مدل‌سازی سیستم انرژی آینده مطرح می‌کنند. بنابراین، مطالعه مقالات هاب انرژی می‌تواند موجب توسعه و مدل‌سازی سیستم‌های ریزشبه‌گردها. در واقع، ایده اصلی سیستم هاب انرژی تطبیق فرم‌های مختلف انرژی با استفاده از زیرساخت‌های انرژی موجود و تنوع مبدل‌ها و منابع ذخیره‌ساز در استفاده بهینه است [۸]. همچنین، ریزشبه‌تولید همزمان برق، حرارت و سرمایش برق قابل اعتماد را به همراهی حرارت و سرمایش برای مشترک با هزینه کم مهیا می‌کند [۷]. ریزشبه‌هایی که چندین حامل انرژی را در بر می‌گیرند، به‌عنوان ریزشبه‌چندحاملی مطرح می‌شوند. بیشترین مطالعات در زمینه ریزشبه‌ها در حوزه بهره‌برداری مانند توزیع اقتصادی بار [۹]، پخش بار بهینه [۱۰] و در مدار آمدن نیروگاه‌هاست [۱۱]. یک الگوریتم بهینه‌سازی ابتکاری برای پخش بار احتمالاتی در حضور منابع انرژی تجدیدپذیر در یک شبکه توزیع مش مورد مطالعه قرار گرفته است [۱۲]. نتایج نشان داده که یکپارچه‌سازی منابع تجدیدپذیر در ریزشبه‌ها به‌سادگی از دید پخش بار قابل پیاده‌سازی است. مرجع [۱۳] به تحلیل احتمالاتی توزیع اقتصادی بار در یک شبکه از ریزشبه‌های چندحاملی با در نظر گرفتن جنبه‌های اقتصادی پرداخته است. همچنین یک مدل پاسخ‌گویی بار در این مدل پیشنهاد شده است.

طراحی سیستم هاب انرژی در مطالعات مختلفی صورت گرفته است، درحالی‌که مطالعات کمی به طراحی ریزشبه‌ها پرداخته‌اند. یک روش برای تعیین سائز و راندمان بهینه یک نیروگاه تولید همزمان در مرجع [۱۴] ارائه شده است. مرجع [۱۵] برنامه‌ریزی توسعه بلندمدت یک ریزشبه‌چندحاملی را در شبکه برق، گاز و حرارت با وجود قید آلودگی صفر در افق چندساله پیشنهاد داده است. هدف این مقاله، ارزیابی و کاهش هزینه ناخالص کل سرمایه‌گذاری، بهره‌برداری و نگهداری است درحالی‌که قید آلودگی صفر برقرار باشد. علاوه بر آن، یک برنامه پاسخ‌گویی بار زمان استفاده به‌منظور تغییر الگوی مصرف و کاهش پیک ارائه شده است. مدل برنامه‌ریزی ریزشبه‌ها برای تعیین سائز بهینه، ترکیب تولیدات پراکنده و نوع ریزشبه‌ها (جریان مستقیم یا متناوب) از دید اقتصادی و قابلیت اطمینان ارائه شده است [۱۶].

همچنین مشخص است که ریزشبه‌ها جریان مستقیم بسیار به‌صرفه‌تر از ریزشبه‌ها جریان متناوب می‌باشد. به هر حال، این مدل قابلیت ریزشبه‌ها را در بر نمی‌گیرد و فقط یک نوع ریزشبه‌ها را انتخاب می‌کند. انتخاب بهینه پیکربندی (ظرفیت و موقعیت) و بهره‌برداری تولیدات پراکنده و گرماساز گازی در یک سیستم انرژی

امروزه تغییرات مهمی در زیرساخت‌های انرژی در حال اتفاق افتادن است. با افزایش تدریجی قیمت سوخت و به انتها رسیدن زیرساخت‌های تولید انرژی، افزایش مصرف انرژی‌های چندگانه موجب نگرانی شده است. برای حل مشکل، استفاده از منابع انرژی غیر متمرکز مانند منابع انرژی مقیاس کوچک با راندمان بالا، برنامه‌های مدیریت بار در ساختار سیستم‌های انرژی موجود به‌جای سرمایه‌گذاری‌های با هزینه زیاد، باید بیشتر شود [۱]. علاوه بر آن، خصوصی‌سازی و تغییر ساختار صنعت برق نسبت به قانون‌گذاری و فناوری‌های جدید، به‌سرعت در حال رخ دادن است. افزایش بهره‌وری انرژی بخش صنعتی و تجاری و توسعه غیرمتمرکز بخش تولید، انتقال و توزیع از مزیت‌های خصوصی‌سازی است. در نتیجه، یکپارچه‌سازی تولیدات پراکنده در شبکه توزیع موجب جلوگیری توسعه خطوط انتقال و ساخت نیروگاه‌ها با هزینه سرمایه‌گذاری زیاد می‌شود. یکی از مفاهیم اصلی در خصوصی‌سازی، ریزشبه‌هاست که می‌تواند با نیروگاه‌های مرکزی سستی با مهیا ساختن یک سطح قابل قبول قابلیت اطمینان و کیفیت توان مشترکین انتهایی، مقاومت در برابر خطاها، هزینه و آلودگی کم رقابت کند [۲-۴]. در آینده، ریزشبه‌ها ممکن است شامل تولیدات پراکنده و بارهای کنترل‌پذیر و غیر کنترل‌پذیر باشند که دارای محدوده الکتریکی و حرارتی مشخصی برای تأمین بار محلی هستند و نسبت به شبکه بالادست مستقل می‌باشند [۵]. به‌طور سستی، زیرساخت‌ها برای تأمین انرژی‌های الکتریکی، حرارتی و شیمیایی به‌صورت مستقل بررسی می‌شد درحالی‌که در فناوری‌های جدید، حامل‌های مختلف انرژی در چند دهه اخیر به‌دلیل وجود تولیدات همزمان دو یا سه حامل به‌صورت یکجا بررسی می‌شوند. واحدهای با سوخت گاز یک عامل اصلی در افزایش مصرف گاز در بسیاری از کشورها بوده‌اند. مصرف گاز به‌دلیل مزایای اقتصادی و محیطی رو به افزایش است. بنابراین، احتمال دارد که پیک بار از شبکه برق به شبکه گاز منتقل شود؛ زیرا تولید برق از گاز طبیعی ممکن است از نظر اقتصادی به‌جای مصرف مستقیم برق از شبکه برق در ساعاتی خاص قابل توجه باشد. علاوه بر آن، تولید برق از منابع مقیاس کوچک معمولاً فرم‌های مختلفی از انرژی را نظیر حرارتی و شیمیایی درگیر می‌کند. پس تحلیل شبکه برق باید طیف گسترده‌ای از انرژی‌های مختلف را به‌منظور استراتژی‌های بهره‌برداری و برنامه‌ریزی در بر گیرد [۶]. سیستم انرژی چندحاملی یکپارچه به‌عنوان یک واحد اصلی [۷]، هاب انرژی [۵] و یا ریزشبه [۷] در نظر گرفته شده است. ریزشبه‌ها و هاب

یکپارچه و شبکه توزیع تعیین شده است به صورتی که شبکه توزیع و آب به هم کوپل شده‌اند [۱۷]. نشان داده شد که یکپارچه‌سازی سیستم آب روی انتخاب ساینز بهینه و جایابی تولیدات پراکنده تأثیرگذار است و همچنین موجب بهبود نفوذ تولیدات پراکنده در مقایسه با شبکه توزیع منفرد می‌شود. مرجع [۱۸] به توسعه یک روش بهینه‌سازی دوسطحی برای توسعه یک ریزشبکه پرداخته است. این مسئله شامل دو تابع هدف است: تابع هدف اول به تعیین استراتژی انتخاب هزینه سرمایه‌گذاری و پیکربندی ریزشبکه، ماکزیم تولید آلودگی و پیک‌زایی با استفاده از ظرفیت شبکه مجاور می‌پردازد، در حالی که تابع هدف دوم به بهینه‌سازی توزیع اقتصادی بار تولیدات پراکنده از طریق یک سیستم مدیریت انرژی بهینه می‌پردازد. در مرجع [۱۹]، پیکربندی و کوپلاژ یک سیستم هاب انرژی بررسی شده است. در این مرجع، ترانسفورمر، مولد تولید همزمان، گرماساز و ذخیره‌ساز به صورت بهینه تعیین ظرفیت شده‌اند، در حالی که در دسترس‌پذیری اجزای هاب به صورت ایدئال در نظر گرفته شده است. کار توسعه‌یافته مرجع قبلی با حضور منابع انرژی تجدیدپذیر در مرجع [۲۰] ارائه شده است. مدل برنامه‌ریزی توسعه سیستم توزیع برق و گاز با نفوذ منابع تولید پراکنده با سوخت گاز در [۲۱] ارائه شده است. نتایج عددی نشان می‌دهد که نظریه پیشنهادی، هزینه توسعه شبکه‌های برق و گاز را کاهش می‌دهد. مرجع [۲۲] به بررسی چالش‌ها، فرصت‌ها و روندنمای آینده منابع تولید پراکنده که توسط مبدل جریان مستقیم به متناوب به شبکه توزیع وصل می‌شوند پرداخته است. برنامه‌ریزی یک ریزشبکه منفصل از شبکه با هدف ارزیابی شاخصه‌های قابلیت اطمینان، مزایای زیست‌محیطی و اقتصادی ناشی از تولیدات تجدیدپذیر با هدف کاهش هزینه انرژی، هزینه طول عمر تجهیزات، هزینه سالانه تلفات بار، هزینه‌های آلودگی در مرجع [۲۳] صورت گرفته شده است. همچنین شاخصه مزایای کلی تکنولوژی‌های سبز در این ریزشبکه توصیف و بهبود داده شده است.

با در نظر گرفتن مقالات مطالعه‌شده، طراحی بهینه یک سیستم ریزشبکه با در نظر گرفتن چندین حامل و بارهای پاسخ‌گو تحت ارزیابی شاخصه‌های قابلیت اطمینان به صورت همزمان صورت نگرفته است. بنابراین، این مقاله با هدف برنامه‌ریزی بهینه (انتخاب و اندازه) مجموعه‌ای از تجهیزات درون یک ریزشبکه چندحاملی مانند ترانسفورمر^۱، مولد تولید همزمان، گرماساز و سیستم خورشیدی قصد بهینه‌سازی را دارد. عناصرهای داخل ریزشبکه به صورت بهینه

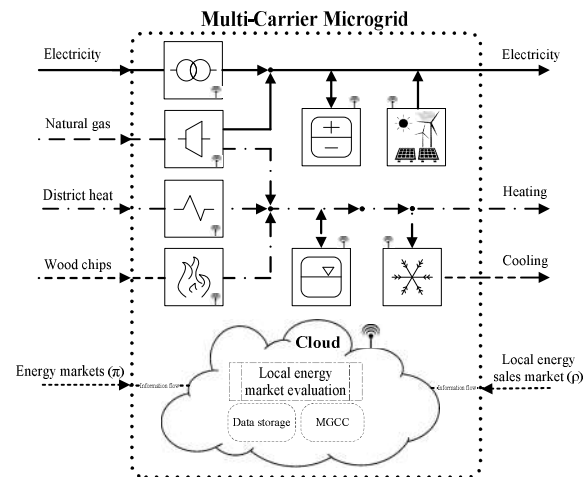
با در نظر گرفتن هزینه‌های بهره‌برداری و نگهداری و انرژی تأمین‌نشده انتخاب شده‌اند. شایان ذکر است که ذخیره‌ساز الکتریکی و حرارتی درون ریزشبکه‌های چندحاملی به صورت پیش‌فرض از قبل نصب شده‌اند و هزینه سرمایه‌گذاری‌شان در نظر گرفته نشده است. علاوه بر آن، تحلیل قابلیت اطمینان از آنجا که می‌تواند روی بهره‌برداری و حتی ساختار ریزشبکه تأثیرگذار باشد، در فرایند بهره‌برداری و برنامه‌ریزی در نظر گرفته شده است. علاوه بر آن، ریزشبکه چندحاملی در مد متصل به شبکه می‌باشد و قابلیت خرید برق و گاز را از شبکه دارد، در حالی که فروش برق و حرارت هم برای مدل پیشنهادی در نظر گرفته شده است. یک مدل پاسخ‌گویی بار زمان استفاده جدید بر اساس قیمت تمام‌شده در این مدل پیشنهاد شده است. هزینه خرید انرژی بارهای پاسخ‌گو برای حامل‌های مختلف وابسته به قیمت بازار روز پیش رو، مقدار انرژی خریداری شده و تولیدات داخلی در نظر گرفته شده است. منحنی بار ترتیبی الکتریکی و حرارتی برای هر سال برای دو روز و دو ماه مختلف و یک روز عادی و یک روز تعطیل تمایز داده شده است. در نهایت، مسئله توسط ترکیب یک مدل غیرخطی عدد صحیح-آمیخته^۲ نرم‌افزار گمز و الگوریتم ژنتیک نرم‌افزار متلب حل شده است. نوآوری این مقاله به صورت زیر خلاصه شده است:

۱. تعیین پیکربندی بهینه یک ریزشبکه چندحاملی با ارزیابی قیود قابلیت اطمینان.
۲. یک مدل جدید خرید انرژی برای بارهای پاسخ‌گو بر اساس ارتباط الگوی مصرف درگاه‌های ورودی و خروجی ریزشبکه چندحاملی و تولیدات داخلی.
۳. بهره‌برداری همزمان چندین حامل انرژی با وجود زیرساخت‌های مختلف نظیر شبکه برق، گاز و حرارت.
۴. استفاده از منابع مختلف برای تأمین منابع الکتریکی و حرارتی با قابلیت اطمینان قابل بالا.
۵. اعمال یک روش ترکیبی برای حل مسئله بهینه‌سازی زمان‌بندی تولید منابع و برنامه‌ریزی ریزشبکه.

۲. توصیف و توپولوژی مسئله

ریزشبکه‌ها به صورت گروهی از بارها و منابع تولید پراکنده در شبکه توزیع تعریف می‌شوند که به‌عنوان یک واحد مستقل از شبکه سراسری عمل می‌کنند. ریزشبکه‌ها در دو مدل متصل به شبکه یا جزیره‌ای در شرایط خطا می‌توانند کار کنند. این مقاله به طراحی

انرژی تأمین نشده، شاخصه انرژی قابلیت اطمینان، انتظار قطع بار و احتمال قطع بار برای بارهای الکتریکی و حرارتی است. در این مقاله، ریزشبکه چندحاملی به شبکه برق و گاز اصلی متصل می‌باشد و امکان خرید و فروش برق را میسر کرده است. علاوه بر آن، حرارت اضافی را می‌توان به شبکه حرارت محلی فروخت.



شکل (۲): ساختار ساده شده ریزشبکه چندحاملی (ارائه شده به عنوان یک شبکه انرژی با چندین حامل انرژی)

۱.۳ مدل سازی شبکه

در این مقاله، ریزشبکه چندحاملی پیشنهادی از مدل شبکه انرژی الگو گرفته شده است. بالانس بار الکتریکی و حرارتی بر اساس عناصرهای نصب شده به ترتیب (۱) و (۲) مدل سازی شده است

$$L_e(y, m, d, t) + D_e(y, m, d, t) + T_e(y, m, d, t) = Po_e^{chp}(y, m, d, t) + Po_e^{trans}(y, m, d, t) + Po_e^{pv}(y, m, d, t) - M_e(y, m, d, t) \quad (1)$$

$$L_h(y, m, d, t) + D_h(y, m, d, t) + T_h(y, m, d, t) = Po_h^{chp}(y, m, d, t) + Po_h^{bo}(y, m, d, t) - M_h(y, m, d, t) \quad (2)$$

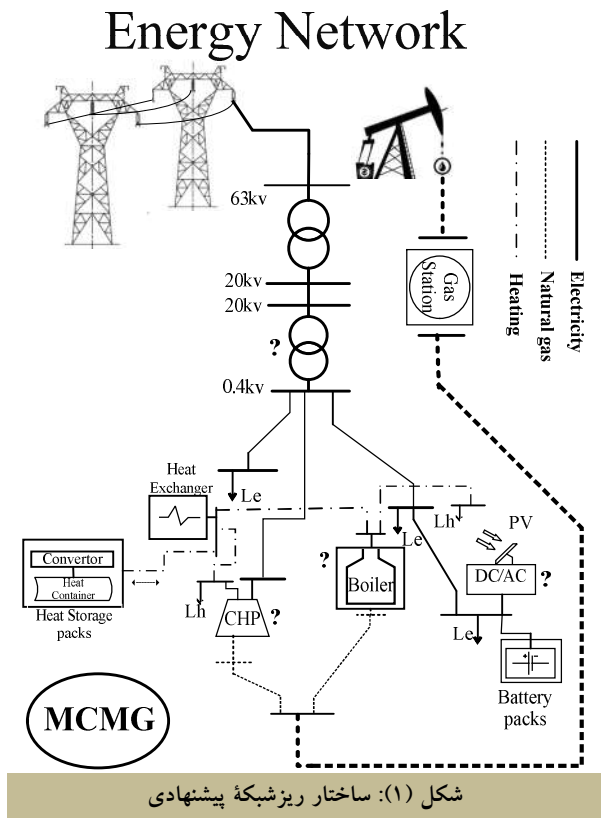
۲.۳ مدل سازی ذخیره ساز

پخش توان معادل در رابطه (۳) و (۴) که مستقیماً با مشتق انرژی رابطه دارد، به صورت زیر فرموله می‌شود:

$$M_l(y, m, d, t) = S_l(y, m, d, t) \times \dot{E}_l(y, m, d, t) \quad (3)$$

$$M_l(y, m, d, t) = ((E_l(y, m, d, t) - E_l(y, m, d, t - 1) - E_{l, stb})) \times \left(Ie_l^{ESS}(y, m, d, t) \times \eta_l^{char} + (1 - Ie_l^{ESS}(y, m, d, t)) \times \eta_l^{dischar} \right) \quad (4)$$

زیرساخت یک ریزشبکه چندحاملی با در نظر گرفتن هزینه های بهره برداری و انرژی تأمین نشده می‌پردازد. هدف اصلی این مقاله انتخاب بهترین تجهیزات با هدف حداقل سازی تابع هدف است. نوع و ظرفیت مناسب در دسترس تجهیزات درون یک ریزشبکه چندحاملی شکل (۱) مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. علاوه بر آن، ذخیره سازهای انرژی الکتریکی و حرارتی به صورت از قبل نصب شده درون ریزشبکه پیشنهادی وجود دارند.



شکل (۱): ساختار ریزشبکه پیشنهادی

۳. مدل سیستم

در این مقاله، مفهوم شبکه انرژی برای مدل سازی ریزشبکه چندحاملی پیشنهادی استفاده شده است [۲۴]. یک شبکه انرژی به عنوان یک ریزشبکه چندحاملی با درگاه های ورودی و خروجی در شکل (۲) نشان داده شده است.

جایابی منابع ذخیره ساز، بهینه سازی توزیع منابع، تحلیل پخش بار و بازیابی خطا و... توسط یک ماژول کنترل گر مرکزی بر اساس معماری محاسبات ابری که اینجا کنترل گر مرکزی نامیده شده، می‌تواند به سادگی صورت پذیرد. ماژول سرویس رسانی محاسبات ابری قابلیت مانیتور کردن تولیدات پراکنده را در یک محیط مجازی دارد که موجب کاهش هزینه مدیریت و جایابی مناسب منابع می‌شود. هدف اصلی این مقاله انتخاب تجهیزات مناسب برای ریزشبکه با در نظر گرفتن شاخصه های قابلیت اطمینان نظیر هزینه

مقدار انرژی ذخیره‌ساز در ابتدا و انتهای برنامه‌ریزی هر روز به‌منظور افزایش سطح عملکرد ذخیره‌ساز به‌صورت زیر، برابر در نظر گرفته شده است.

$$E_l(y, m, d, 1) = E_l(y, m, d, 24) \quad (5)$$

۳.۳. مدل‌سازی بار پاسخ‌گو

درحالی‌که بارهای غیر پاسخگو موجب پیک‌های شدید دو دوره از روز که قیمت انرژی کم است می‌شوند، یک راه‌حل اساسی برای حل مشکل استفاده از بارهای پاسخ‌گوست که موجب کاهش نگرانی برای اتفاق افتادن پیک می‌شود [۲۵]. بار پاسخ‌گوی الکتریکی و حرارتی به‌صورت زیر مدل شده است.

$$D_l(y, m, d, t) = D_{0,l}(y, m, d, t) \quad (6)$$

$$\cdot \left(1 + e_{\alpha}(t, t) \cdot \frac{\rho_{\alpha 0}(t) - \rho_{\alpha 0}(t')}{\rho_{\alpha 0}(t)} \right) + D_{0,l}(y, m, d, t) \times \left(1 + \left(\frac{EL_l(y, m, d, t, t') \times \rho_l(y, m, d, t')}{\sum_{t'=t} \rho_{0,l}(y, m, d, t')} - \frac{\rho_{0,l}(y, m, d, t')}{\rho_{0,l}(y, m, d, t')} \right) \right)$$

۳.۴. ارزیابی قابلیت اطمینان

ارزیابی قابلیت اطمینان ریزش‌بکه با منابع انرژی پراکنده، توجه بسیاری از محققان را جلب کرده است. در این مقاله، به‌منظور تحلیل قابلیت اطمینان تأمین بارهای مختلف ریزش‌بکه در حالت متصل به شبکه، برخی از شاخصه‌های قابلیت اطمینان معروف به کار برده شده‌اند. هزینه انرژی تأمین‌نشده، شاخصه انرژی قابلیت اطمینان، انتظار قطع بار و احتمال قطع بار به‌عنوان شاخصه‌های برجسته برای بارهای الکتریکی و حرارتی مورد ارزیابی قرار گرفته است. هزینه انرژی تأمین‌نشده به‌منظور به‌دست‌آوردن مقدار قطعی انرژی بررسی شده است. این شاخصه به‌صورت زیر مدل‌سازی شده است.

$$EENS_l(y) = \sum_{m=1}^{12} \sum_{d=1}^{30} \sum_{t=1}^{24} Pr_{l,t} \times ENS_{l,t} \quad (7)$$

شاخصه انرژی سالانه قابلیت اطمینان برحسب پروبیت به‌صورت زیر بیان شده است.

$$EIR_l^{pm}(y) = 1 - \frac{EENS_l(y)}{EnD_{tot,l}(y)} \quad (8)$$

انتظار قطع بار به‌منظور بیان احتمال ساعت‌های تأمین‌نشدن انرژی به کار برده شده است که به‌صورت رابطه (۹) معادل‌سازی

$$LOLE_l(y) = \sum_{m=1}^{12} \sum_{d=1}^{30} \sum_{t=1}^{24} Pr_{l,t} \times \hat{t}_{l,t} \quad (9)$$

احتمال خرابی سیستم به‌صورت زیر فرموله شده است.

$$LOLP_l(y) = \sum_{m=1}^{12} \sum_{d=1}^{30} \sum_{t=1}^{24} Pr_{l,t} \quad (10)$$

۵.۵. تابع هدف و قیود

پیکربندی ریزش‌بکه چندحاملی یک مسئله چندهدفه با هدف حداقل‌سازی هزینه‌های ناخالص سرمایه‌گذاری، بهره‌برداری (سوخت و نگهداری) و قطعی بار برای بارهای الکتریکی و حرارتی است.

$$Min : OF = C_{inv} + C_{oper} + C_{main} + \sum_{l \in (e, h)} C_{EIC,l} \quad (11)$$

هزینه سرمایه‌گذاری اجزای انتخاب‌شده (مولد تولید همزمان، ترانسفورمر، گرماساز و سیستم خورشیدی) در رابطه (۱۲) مدل‌سازی شده است. هزینه ناخالص خرید و فروش انرژی از شبکه در افق برنامه‌ریزی در عبارت اول و دوم رابطه (۱۳) به‌ترتیب نوشته شده است. هزینه ناخالص نگهداری تجهیزات در رابطه (۱۴) و هزینه ناخالص قطعی بار الکتریکی و حرارتی با ضرب کردن مقدار انرژی تأمین‌نشده در هزینه انرژی تأمین‌نشده در رابطه (۱۵) به دست آمده است.

$$C_{inv} = \left(\sum_{c=1}^{Nc^{chp}} Invs^{chp}(c) \times I^{chp}(c) \right) + \left(\sum_{c=1}^{Nc^{trans}} Invs^{trans}(c) \times I^{trans}(c) \right) + \left(\sum_{c=1}^{Nc^{bo}} Invs^{bo}(c) \times I^{bo}(c) \right) + \left(\sum_{c=1}^{Nc^{pv}} Invs^{pv}(c) \times I^{pv}(c) \right) \quad (12)$$

$$C_{oper} = \left(\sum_{y=1}^{Ny} \frac{1}{(1+i)^{y-1}} \right) \times \sum_{m=1}^{12} \sum_{d=1}^{30} \sum_{t=1}^{24} \left[\begin{aligned} &+ \sum_{p \in (e, g)} P_p(y, m, d, t) \times \pi_p(y, m, d, t) \\ &- \sum_{l \in (e, h)} T_l(y, m, d, t) \times \psi_l(y, m, d, t) \end{aligned} \right] \quad (13)$$

$$\sum_{c=1}^{N_c^{RP}} Po_e^{pv}(y, m, d, t) \cdot I^{pv}(c) \leq Po_e^{pv}(y, m, d, t) \quad (23)$$

$$C_{main} = \left(\sum_{y=1}^{N_y} \frac{1}{(1+i)^{y-1}} \right) \times \quad (14)$$

$$\leq \sum_{c=1}^{N_c^{RP}} Po_e^{pv}(y, m, d, t) \cdot I^{pv}(c)$$

مقدار انرژی دریافتی و انتقالی از شبکه به ترتیب در زیر آمده

$$P_p(y, m, d, t) \leq P_p(y, m, d, t) \leq \overline{P_p}(y, m, d, t) \quad (24)$$

$$T_l(y, m, d, t) \leq T_l(y, m, d, t) \leq \overline{T_l}(y, m, d, t) \quad (25)$$

قیود (۲۶) و (۲۷) ظرفیت انرژی ذخیره‌شده و سطح توان شارژ و دشارژ شده را در ذخیره‌سازها نشان می‌دهند.

$$E_l(y, m, d, t) \leq E_l(y, m, d, t) \leq \overline{E_l}(y, m, d, t) \quad (26)$$

$$|M_l(y, m, d, t)| \leq \overline{M_l}(y, m, d, t) \quad (27)$$

توزیع انرژی ورودی گاز به مولد تولید همزمان و گرماساز به صورت زیر تعریف شده است.

$$v^{chp}(y, m, d, t) + v^{bo}(y, m, d, t) = 1 \quad (28)$$

انتظار قطع بار و احتمال خرابی سیستم به ترتیب در روابط (۲۹) و (۳۰) تعریف شده‌اند. این مقادیر در هر سال در طول دوره برنامه‌ریزی باید کمتر از مقدار معینی باشند.

$$LOLE_l(y) \leq \overline{LOLE_l}^{targeted} \quad (29)$$

$$LOLP_l(y) \leq \overline{LOLP_l}^{targeted} \quad (30)$$

۴. روش حل

هدف اصلی مدل پیشنهادی پیدا کردن عناصر ظرفیت‌های مناسب با هدف حداقل‌سازی تابع هدف است درحالی‌که قیود قابلیت اطمینان رعایت شوند. نمودار حل طراحی ریزشکته با ارزیابی شاخصه‌های قابلیت اطمینان در شکل (۳) نشان داده شده است. اطلاعات ورودی به منظور شکل‌گیری پارامترهای اساسی ریزشکته پردازش می‌شوند. سپس، برای هر کروموزوم (در اینجا تجهیزات و مشخصه تجهیزاتی که قرار است نصب شوند) مقدار تابع برازندگی ارزیابی و سپس شاخصه قابلیت سالانه بررسی می‌شود. اگر از حد قابلیت اطمینان سالانه تعریف شده تجاوز شود، تابع برازندگی برای کروموزوم مربوط جریمه می‌گردد. فرایند حل مسئله تا زمانی که یک طراحی بهینه برای تأمین قابلیت اطمینان سالانه طی افق برنامه‌ریزی به دست نیاید، تکرار می‌شود.

۵. شبیه‌سازی و مطالعات عددی

در این بخش، روش پیشنهادی روی طراحی یک ریزشکته چندحاملی با هدف کاهش هزینه و تأمین بار بهینه صورت گرفته

$$\left[\begin{aligned} & \left(\sum_{c=1}^{N_c^{chp}} Po_e^{chp}(y, m, d, t) \times \right. \\ & \left. K_{main}^{chp}(c) \times I^{chp}(c) \right) \\ & + \left(\sum_{c=1}^{N_c^{bo}} Po_h^{bo}(y, m, d, t) \times \right. \\ & \left. K_{main}^{bo}(c) \times I^{bo}(c) \right) \\ & + \left(\sum_{c=1}^{N_c^{trans}} Po_e^{trans}(y, m, d, t) \times \right. \\ & \left. K_{main}^{trans}(c) \times I^{trans}(c) \right) \\ & + \left(\sum_{c=1}^{N_c^{RP}} Po_e^{pv}(y, m, d, t) \times \right. \\ & \left. K_{main}^{pv}(c) \times I^{pv}(c) \right) \end{aligned} \right]$$

$$C_{EIC,l} = VOLL_l \times \sum_{y=1}^{N_y} \frac{EENS_l(y)}{(1+i)^{y-1}} \quad (15)$$

مدل انرژی تولید واحد تولید همزمان، ترانسفورمر، گرماساز و سیستم خورشیدی به ترتیب در رابطه‌های زیر مدل‌سازی شده است.

$$Po_l^{chp}(y, m, d, t) = \quad (16)$$

$$\sum_{c=1}^{N_c^{chp}} P_g(y, m, d, t) \times \eta_l^{chp}(c) \times v^{chp}(t, m) \times I^{chp}(c)$$

$$l \in \{e, h\}$$

$$Po_e^{trans}(y, m, d, t) = \quad (17)$$

$$\sum_{c=1}^{N_c^{trans}} P_e(y, m, d, t) \times \eta_e^{trans}(c) \times I^{trans}(c)$$

$$Po_h^{bo}(y, m, d, t) = \quad (18)$$

$$\sum_{c=1}^{N_c^{bo}} P_g(y, m, d, t) \times \left(\eta_h^{bo}(c) \times v^{bo}(t, m) \times I^{bo}(c) \right)$$

$$Po_e^{pv}(y, m, d, t) = \quad (19)$$

$$\sum_{c=1}^{N_c^{pv}} RP_e^{pv}(y, m, d, t) \times \eta_e^{pv}(c) \times I^{pv}(c)$$

حد بهره‌برداری حداقل و حداکثر واحد تولید همزمان، ترانسفورمر، گرماساز و سیستم خورشیدی به ترتیب در رابطه‌های زیر توصیف شده است.

$$\sum_{c=1}^{N_c^{chp}} Po_e^{chp}(y, m, d, t) \cdot I^{chp}(c) \leq Po_e^{chp}(y, m, d, t) \quad (20)$$

$$\leq \sum_{c=1}^{N_c^{chp}} Po_e^{chp}(y, m, d, t) \cdot I^{chp}(c)$$

$$\sum_{c=1}^{N_c^{trans}} Po_e^{trans}(y, m, d, t) \cdot I^{trans}(c) \leq Po_e^{trans}(y, m, d, t) \quad (21)$$

$$\leq \sum_{c=1}^{N_c^{trans}} Po_e^{trans}(y, m, d, t) \cdot I^{trans}(c)$$

$$\sum_{c=1}^{N_c^{bo}} Po_h^{bo}(y, m, d, t) \cdot I^{bo}(c) \leq Po_h^{bo}(y, m, d, t) \quad (22)$$

$$\leq \sum_{c=1}^{N_c^{bo}} Po_h^{bo}(y, m, d, t) \cdot I^{bo}(c)$$

جلوگیری کنیم، مقدار متوسط بار مصرفی الکتریکی و حرارتی تقریباً برابر با ۴۰۰ کیلووات ساعت در سال اول در نظر گرفته شده است. جدول (۳) مشخصه‌های اقتصادی فرض شده در مسئله را نشان می‌دهد. قیمت انرژی بازار در شکل (۴) فرض شده است. هزینه انرژی تأمین‌نشده برای بارهای پاسخ‌گوی الکتریکی و حرارتی، سه برابر قیمت بازار فرض شده است.

است. طراحی توسعه ریزشبه چندحاملی در حالت متصل به شبکه در شکل (۱) نشان داده شده است. همان طور که مشخص است، ریزشبه چندحاملی به شبکه برق، گاز و حرارت محلی متصل می‌باشد و بالانس بین تقاضا و تولید از طریق منابع انرژی پراکنده و شبکه خارجی برقرار شده است.

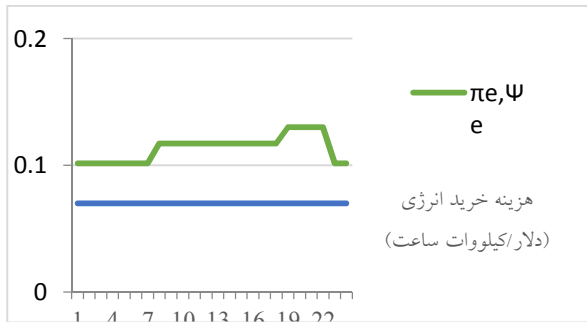
پنج نوع از هر عنصر مانند ترانسفورمر، واحد تولید همزمان، گرماساز و سیستم خورشیدی برای تأمین بار در افق برنامه‌ریزی در دسترس هستند. مشخصه‌های تجهیزات و پارامترهای ذخیره‌ساز در جدول (۱) و جدول (۲) نشان داده شده است. طراحی ریزشبه برای ۵ سال بر اساس هزینه ناخالص با استفاده از نرخ بهره انجام شده است. نصب تجهیزات فقط در سال اول برنامه‌ریزی فرض شده است. به‌منظور اینکه درباره مقدار بار مصرفی، دیدی به خواننده بدهیم و از شکل اضافی در مقاله

جدول (۱): مشخصات سیستم ذخیره‌ساز انرژی

عناصر ذخیره‌ساز	ظرفیت اینورتر، کیلووات		ظرفیت شارژ، کیلووات	
	ظرفیت حداکثر، کیلووات	راندمان شارژ و دشارژ بر حسب درصد	ظرفیت شارژ	راندمان شارژ و دشارژ بر حسب درصد
الکتریکی	۹۰	۹۲	۳۰	۹۵
حرارتی	۹۰	۹۲	۳۰	۹۵

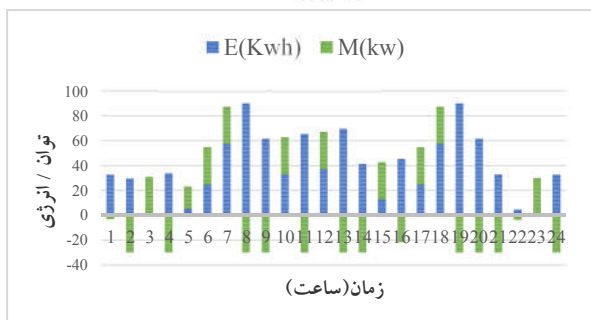
جدول (۲): مشخصه تجهیزات

عناصر	نوع	ظرفیت حداکثر، کیلووات	راندمان بر حسب درصد			هزینه نصب بر حسب میلیون دلار	ضریب هزینه نگهداری بر حسب میلیون دلار (کیلووات بر ساعت)	نرخ خروج اجباری (%)
			$\frac{P_{in}}{P_{out}}$	$\frac{P_{out}}{P_{in}}$	$\frac{P_{out}}{P_{in}}$			
ترانسفورماتور	۱	۸۰۰	۹۲		۹۲	۰/۸۲۵	۰/۰۰۳	۰/۳۵
	۲	۹۰۰	۹۰		۹۰	۱/۳۲۸	۰/۰۰۲۷	۰/۰۲۶
	۳	۱۰۰۰	۸۹		۸۹	۱/۶۶	۰/۰۰۲۴	۰/۰۱۴
	۴	۱۵۰۰	۸۷		۸۷	۲/۴۹	۰/۰۰۲۲	۰/۰۰۵
	۵	۱۸۰۰	۸۵		۸۵	۲/۹۸۸	۰/۰۰۲	۰/۰۰۲
مولد تولید هم‌زمان	۱	۵۰۰	۴۰	۳۵	۷۵	۰/۲۲۱	۰/۰۱۵	۰/۰۲
	۲	۶۰۰	۴۰	۴۴	۸۴	۰/۲۷۲	۰/۰۱۳۵	۰/۰۵
	۳	۸۲۵	۵۰	۳۰	۸۰	۰/۳۷۵	۰/۰۱۲۵	۰/۰۲۵
	۴	۱۱۲۵	۴۰	۴۰	۸۰	۰/۴۸۷	۰/۰۱۱۵	۰/۰۱
	۵	۱۳۵۰	۳۵	۴۰	۷۵	۰/۶	۰/۰۱	۰/۰۱۶
گرماساز	۱	۳۰۰		۹۰	۹۰	۰/۰۷۵	۰/۰۰۹	۰/۰۳۵
	۲	۴۵۰		۸۷	۸۷	۰/۱	۰/۰۰۸	۰/۰۳۱
	۳	۶۰۰		۸۵	۸۵	۰/۱۲۵	۰/۰۰۵	۰/۰۲۵
	۴	۷۵۰		۸۳	۸۳	۰/۱۵	۰/۰۰۳	۰/۰۲
	۵	۹۰۰		۸۰	۸۰	۰/۱۷۵	۰/۰۰۲	۰/۰۱۵
سیستم خورشیدی	۱	۵۰	۹۰		۹۰	۰/۰۶۲۵	۰/۰۰۱۷	۰/۰۲۸
	۲	۷۰	۸۸		۸۸	۰/۰۸۷	۰/۰۰۱۵	۰/۰۲۹
	۳	۱۰۰	۸۵		۸۵	۰/۱۲۵	۰/۰۰۱۴	۰/۰۱۴
	۴	۱۲۰	۸۲		۸۲	۰/۱۵	۰/۰۰۱۲	۰/۰۲۸
	۵	۱۵۰	۸۰		۸۰	۰/۱۸۷	۰/۰۰۱	۰/۰۳۶

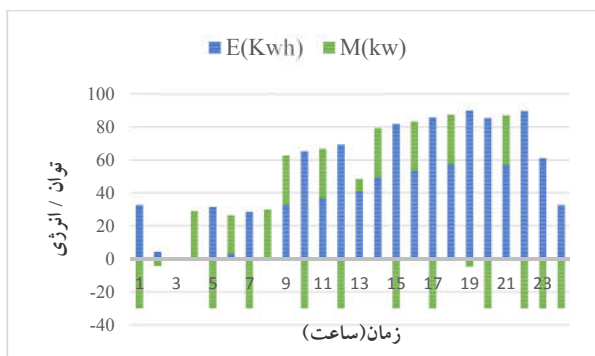


شکل (۴): هزینه خرید انرژی در سال اول

شایان ذکر است با به کارگیری تکنیک پاسخ گویی بار، مقدار پیک و هزینه های شبکه کاهش داشته است. همچنین با استفاده از ذخیره ساز درون شبکه از هدررفت انرژی جلوگیری شده است. مقدار انرژی و توان شارژ یا دشارژ شده ذخیره ساز الکتریکی و حرارتی در شکل (۵) و (۶) به ترتیب نشان داده شده است.



شکل (۵): وضعیت شارژ و دشارژ ذخیره ساز الکتریکی در سال آخر یک روز تعطیل در زمستان

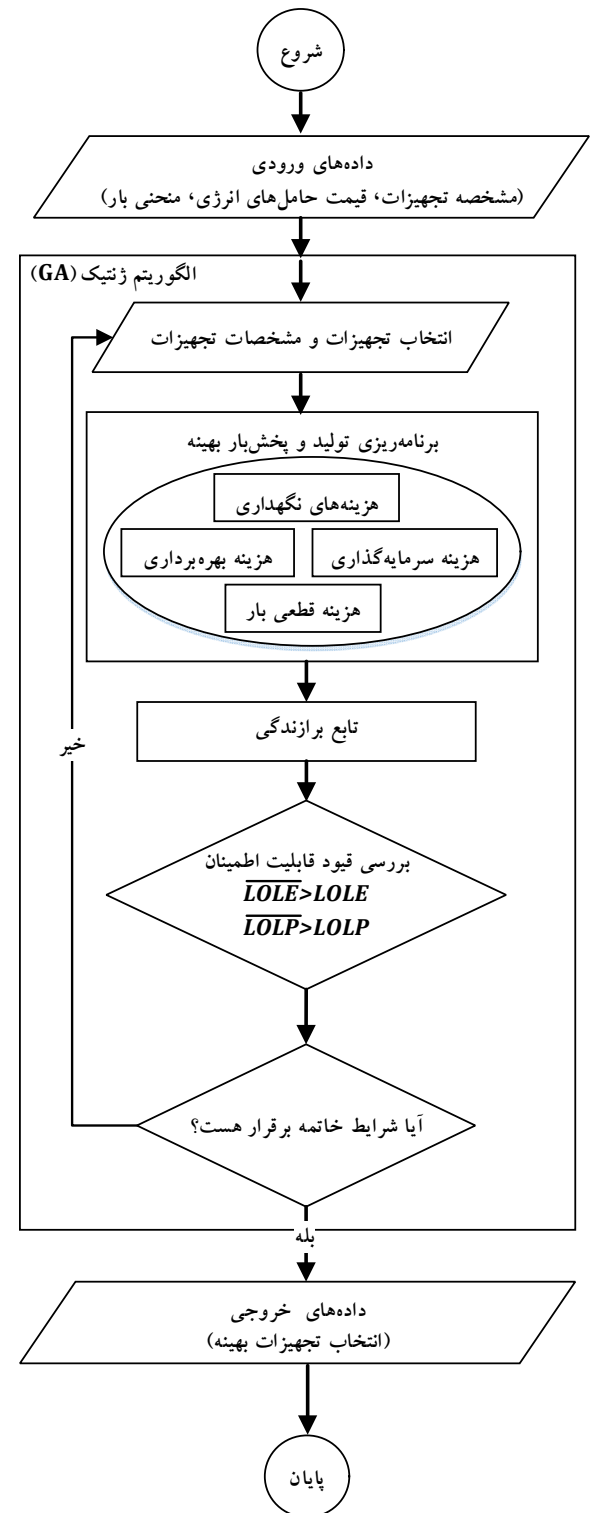


شکل (۶): وضعیت شارژ و دشارژ ذخیره ساز حرارتی در سال آخر یک روز تعطیل در زمستان

در این مقاله، برای ارزیابی روش پیشنهادی، طراحی ریزشبکه با و بدون شاخصه های قابلیت اطمینان، مورد ارزیابی قرار گرفته است. با حل مسئله، مقادیر بهینه و مشخصه های عنصرهای ریزشبکه در جدول (۴) نشان داده شده است. همچنین شاخصه های قابلیت اطمینان نظیر ساعت های خاموشی برابر ده ساعت در سال و احتمال قطعی بار برابر با ۰/۱۰٪ در سال به دست آمده است.

جدول (۳): پارامترهای اقتصادی

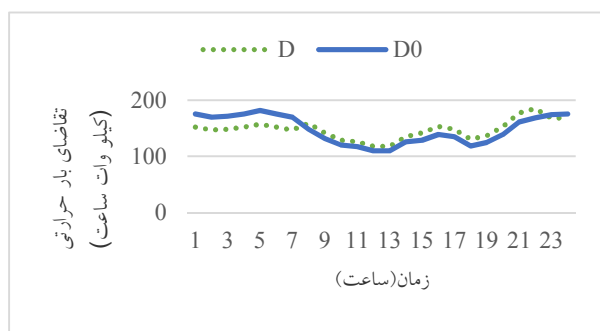
نرخ رشد هزینه خرید انرژی سالانه %	نرخ رشد بار سالانه %	نرخ بهره سالانه %
۲۰	۱۰	۱۵



شکل (۳): نمودار برنامه ریزی ریزشبکه با چندین حامل انرژی

جدول (۴): اطلاعات تجهیزات انتخابی با و بدون در نظر گرفتن شاخصه‌های قابلیت اطمینان

فرایند بهینه‌سازی	عناصر	ظرفیت (کیلووات)	راندمان (%)			هزینه سرمایه‌گذاری (میلیون دلار)	ضریب هزینه نگهداری (دلار کیلووات ساعت)	نرخ خرابی (%)
			$\frac{P_{avg}}{P_{max}}$	$\frac{P_{min}}{P_{max}}$	$\frac{P_{avg}}{P_{min}}$			
با در نظر گرفتن شاخصه‌های قابلیت اطمینان	ترانسفورماتور ۳	۱۰۰۰	۸۹		۸۹	۱/۶۶	۰/۰۰۲۴	۰/۰۱۴
	مولد تولید همزمان ۴	۱۱۲۵	۴۰	۴۰	۸۰	۰/۴۸۷	۰/۰۱۱۵	۰/۰۱
	گرماساز ۴	۷۵۰		۸۳	۸۳	۰/۱۵	۰/۰۰۳	۰/۰۲
	سیستم خورشیدی ۳	۱۰۰	۸۵		۸۵	۰/۱۲۵	۰/۰۰۱۴	۰/۰۱۴
بدون در نظر گرفتن شاخصه‌های قابلیت اطمینان	ترانسفورماتور ۱	۸۰۰	۹۲		۹۲	۰/۸۲۵	۰/۰۰۳	۰/۰۳۵
	مولد تولید همزمان ۳	۸۲۵	۵۰	۳۰	۸۰	۰/۳۷۵	۰/۰۱۲۵	۰/۰۲۵
	گرماساز	-			-	-	-	-
	سیستم خورشیدی ۳	۱۰۰	۸۵		۸۵	۰/۱۲۵	۰/۰۰۱۴	۰/۰۱۴

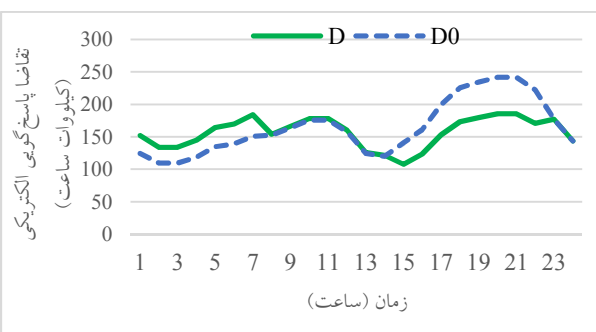


شکل (۸): بار پاسخ‌گویی حرارتی برای سال آخر یک روز کاری در زمستان

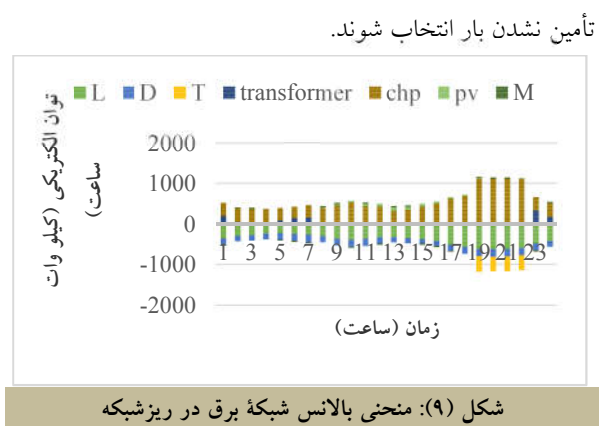
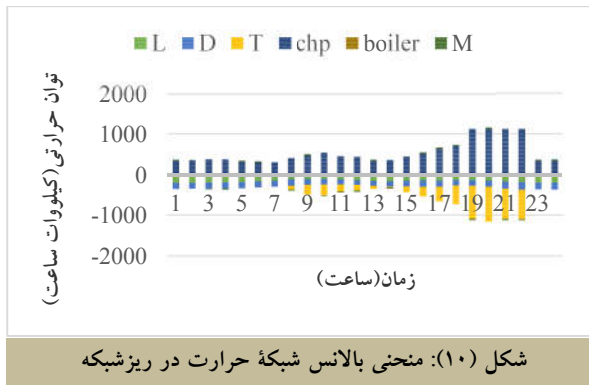
بالانس بار الکتریکی و حرارتی در ریزش‌بکه طراحی شده در شکل (۹) و (۱۰) به ترتیب نشان داده شده است. در این روز کاری زمستان سال پنجم، بار الکتریکی توسط شبکه اصلی و مولد تولید همزمان تأمین شده است، در حالی که بخش کمی از بار توسط سیستم فتوولتائیک تأمین شده است. علاوه بر آن، بار حرارتی توسط مولد تولید همزمان تأمین شده است در حالی که حرارت اضافی به شبکه محلی فروخته شده است. مهم‌ترین هدف این مقاله، ارزیابی قابلیت اطمینان در محیط ریزش‌بکه چندحاملی است به منظور ارزیابی مزایای قابلیت اطمینان، چندین شاخصه قابلیت اطمینان برای بارهای الکتریکی و حرارتی همان طور که در جدول (۵) نشان داده شده، محاسبه شده است. همان طور که دیده می‌شود، مقدار سالانه احتمال قطعی بار برای بار حرارتی بدون در نظر گرفتن قابلیت اطمینان بالای حد مجاز می‌باشد.

محدودیت‌های ساعات و احتمال قطعی به همراه هزینه‌های قطعی بار مربوط در تابع هدف موجب شده تا تجهیزات با ظرفیت بالاتر و شاخصه در دسترس ناپذیری کمتر به منظور جلوگیری از

همچنین از جدول (۴) نتیجه می‌شود که یک مولد تولید همزمان بزرگ‌تر مدل با قابلیت اطمینان به منظور تأمین بار الکتریکی و حرارتی انتخاب شده است. نتایج با در نظر گرفتن قابلیت اطمینان نشان داده است که ترانسفورمر نوع ۳ به دلیل شاخصه دسترس ناپذیری کم نسبت به بقیه انتخاب شده است. همچنین مولد تولید همزمان نوع ۴ به دلیل شاخصه دسترس ناپذیری کم و تأمین همزمان چندین حامل انتخاب شده است. از سوی، گرماساز نوع ۴ به دلیل ضریب نگهداری پایین و راندمان مناسب آن برای تأمین بخشی از بار حرارتی انتخاب شده است. همچنین سیستم فتوولتائیک نوع ۳ به دلیل تولید برق بدون هزینه و ظرفیت مناسب نسبت به هزینه سرمایه‌گذاری و راندمان انتخاب شده است. در مقایسه با مدل بدون در نظر گرفتن قابلیت اطمینان، مشخص می‌باشد که مولد تولید همزمان ارزان‌تر و هیچ گرماسازی نسبت به مدل قبلی انتخاب نشده است. نتایج بهره‌برداری در شکل (۷) تا (۱۱) نشان داده شده است. واکنش بارهای پاسخ‌گویی الکتریکی و حرارتی به قیمت برق در شکل (۷) و (۸) به ترتیب نشان داده شده است. گفتنی است که با به کارگیری تکنیک پاسخ‌گویی بار، مقدار پیک کاهش یافته و هزینه‌های شبکه کاهش داشته است. همچنین با استفاده از ذخیره‌ساز درون شبکه از هدررفت انرژی جلوگیری شده است.



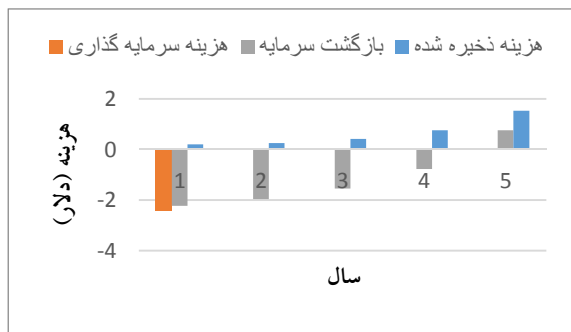
شکل (۷): بار پاسخ‌گویی الکتریکی برای سال آخر یک روز کاری در زمستان



جدول (۵): مقادیر شاخصه‌های قابلیت اطمینان برای مدل با/بدون در نظر گرفتن قابلیت اطمینان

نتایج	سال	EENS (Kwh)		EIR (pu)		LOLE (Hour)		LOLP (%)	
		برق	حرارت	برق	حرارت	برق	حرارت	برق	حرارت
با در نظرگیری شاخصه قابلیت اطمینان	۱	۹۲۷۰۰۷۹	۱/۵۷۷×۱۰ ^۳	۰/۹۹۹۷۳۴۸	۰/۹۹۹۱۶۸	۲/۴۱۹۲	۶/۹	۰/۰۲۸	۰/۰۸
	۲	۱/۰۲۵×۱۰ ^۳	۱/۷۲۸×۱۰ ^۳	۰/۹۹۹۷۳۳۴	۰/۹۹۹۱۷۰۹	۲/۴۱۹۲	۶/۹	۰/۰۲۸	۰/۰۸
	۳	۱/۱۳۳×۱۰ ^۳	۱/۸۹۵×۱۰ ^۳	۰/۹۹۹۷۳۲۲	۰/۹۹۹۱۷۳۶	۲/۴۱۹۲	۶/۹	۰/۰۲۸	۰/۰۸
	۴	۱/۲۵۱×۱۰ ^۳	۲/۰۷۹×۱۰ ^۳	۰/۹۹۹۷۳۱۱	۰/۹۹۹۱۷۷۶	۲/۴۱۹۲	۶/۹	۰/۰۲۸	۰/۰۸
	۵	۱/۳۸۲×۱۰ ^۳	۲/۲۸×۱۰ ^۳	۰/۹۹۹۷۳۰۱	۰/۹۹۹۱۷۸۲	۲/۴۱۹۲	۶/۹	۰/۰۲۸	۰/۰۸
	۱ تا ۵	۵/۷۱۹×۱۰ ^۴	۹/۵۵۹×۱۰ ^۳	۰/۹۹۹۷۳۲	۰/۹۹۹۱۷۳	۱۲/۰۹۶	۳۴/۶	-	-
بدون در نظرگیری شاخصه قابلیت اطمینان	۱	۵/۷۹۲×۱۰ ^۳	۱/۹۷۱×۱۰ ^۵	۰/۹۹۸۳۴۲۶	۰/۸۹۶۰۱۱۲	۱۵/۱۲	۸۶۳/۹	۰/۰۱۷	۰/۱
	۲	۶/۴۰۲×۱۰ ^۳	۲/۱۶۱×۱۰ ^۵	۰/۹۹۸۳۳۴۲	۰/۸۹۶۳۷۳۸	۱۵/۱۲	۸۶۳/۹	۰/۰۱۷	۰/۱
	۳	۷/۱۲۲×۱۰ ^۳	۲/۳۶۹×۱۰ ^۵	۰/۹۹۸۳۱۵۸	۰/۸۹۶۷۰۳۵	۲۱/۴۸۹	۸۶۳/۹	۰/۰۵	۰/۱
	۴	۹/۸۸۵×۱۰ ^۳	۲/۵۹۸×۱۰ ^۵	۰/۹۹۷۸۷۴۸	۰/۸۹۷۰۰۳۲	۶۱/۳۴	۸۶۳/۹	۰/۱۱۸۲	۰/۱
	۵	۱/۵۲۵×۱۰ ^۴	۲/۸۵۱×۱۰ ^۵	۰/۹۹۷۰۱۹۲	۰/۸۹۷۲۷۵۶	۹۱/۸۸	۸۶۳/۹	۰/۱۱۸۲	۰/۱
	۱ تا ۵	۴/۴۴۵×۱۰ ^۴	۱/۱۹۵×۱۰ ^۶	۰/۹۹۷۹۱۶۵	۰/۸۹۶۷۳۳۲	۲۰۱/۹۵	۴۳۱۹/۹	-	-

نظر گرفتن قیود قابلیت اطمینان نسبت به مدلی که ریزشبکه وجود نداشته باشد، در اواسط سال چهارم اتفاق می‌افتد. همچنین مقایسه نتایج این پژوهش نسبت به مقالات [۲۶-۲۷] نشان می‌دهد که هزینه سرمایه‌گذاری ریزشبکه‌ها با در نظر گرفتن قیود قابلیت اطمینان می‌تواند حدود ۲۲ تا ۲۴ افزایش یابد تا سطح قابلیت اطمینان را برای تأمین انرژی برآورده سازد.



همان طور که مشخص است هزینه انرژی تأمین نشده با در نظر گرفتن قیود قابلیت اطمینان، بهبود قابل توجهی یافته است. جدول (۶) مقایسه هزینه‌های ناخالص مختلف تأمین بار در طی دوره برنامه‌ریزی را نشان می‌دهد. در اینجا نشان داده شده است که محدودیت‌های قابلیت اطمینان روی نوع و سایز تجهیزات و هزینه سرمایه‌گذاری ریزشبکه چندحاملی اثر گذاشته است. شایان ذکر است هزینه طراحی کلی با در نظر گرفتن قابلیت اطمینان به‌منظور برآورد شاخصه‌های قابلیت اطمینان نسبت به مدل ساده به‌شدت افزایش داشته، درحالی‌که مقدار شاخصه قابلیت اطمینان کاهش هم کاهش چشمگیری داشته است. نتایج توانایی روش پیشنهادی را برای تأمین بارهای مختلف با در نظر گرفتن شاخصه‌های قابلیت اطمینان اثبات کرده است. در نهایت، نمودار جریان نقدی برای مطالعات اقتصادی ریزشبکه به‌منظور تفهیم بهتر در شکل (۱۱) نشان داده شده است. طبق نمودار، بازگشت سرمایه توسعه ریزشبکه با در

در نهایت، تحلیل طراحی ریزشبه‌چندحاملی با در نظر گرفتن قابلیت اطمینان ممکن است موجب افزایش فرایند بهینه‌سازی شده باشد ولی درک بهتری را به برنامه‌ریز برای ارزیابی ریسک تغییرات در هزینه‌های سیستم می‌دهد. چنین نتایجی بسیار از دید توسعه‌دهنده، واقعی و قابل اعتماد است.

جدول (۶): تحلیل اقتصادی هزینه‌های ریزشبه‌ها/ بدون در نظر گرفتن قابلیت اطمینان

نتایج	سال	هزینه سرمایه‌گذاری (میلیون دلار)				هزینه نگهداری (میلیون دلار)		EIC برحسب مقدار حال خالص (میلیون دلار)		هزینه کل (میلیون دلار)
		ترانسفورماتور ۳	تولید همزمان برق و حرارت ۴	گرماساز ۴	تولید خورشیدی ۳	مقدار حال	هزینه حال خالص NPV	بار الکتریکی	بار حرارتی	
با شاخصه قابلیت اطمینان	۱	۱/۶۶	۰/۴۸۷	۰/۱۵	۰/۱۲۵	۰/۵۱۷	۰/۵۱۷	۰/۰۰۰۳۱۵	۰/۰۰۰۲۸۳	۸۵۸/۵
	۲	-	-	-	-	۰/۶۷۷	۰/۵۸۹	۰/۰۰۰۳۰۳	۰/۰۰۰۲۷۱	
	۳	-	-	-	-	۰/۷۹	۰/۶۷۳	۰/۰۰۰۲۹۱	۰/۰۰۰۲۵۷	
	۴	-	-	-	-	۱/۱۷۲	۰/۷۷۱	۰/۰۰۰۲۷۹	۰/۰۰۰۲۴۶	
	۵	-	-	-	-	۱/۵۴۵	۰/۸۸۳	۰/۰۰۰۲۶۸	۰/۰۰۰۲۳۴	
	۱ تا ۵	۱/۶۶	۰/۴۸۷	۰/۱۵	۰/۱۲۵	۴/۸۰۱	۳/۴۳۳	۰/۰۰۱۴۵۸	۰/۰۰۱۲۹۲	
		ترانسفورماتور ۱	تولید همزمان برق و حرارت ۲	گرماساز	تولید خورشیدی ۳					هزینه کل (میلیون دلار)
بدون شاخصه قابلیت اطمینان	۱	۰/۸۲۵	۰/۳۷۵	-	۰/۱۲۵	۰/۴۸۶	۰/۴۸۶	۰/۰۰۱۹۶۹	۰/۰۳۵۴۷۷	۴/۷۰۲
	۲	-	-	-	-	۰/۶۳۳	۰/۵۵	۰/۰۰۱۸۹۳	۰/۰۳۳۸۱۶	
	۳	-	-	-	-	۰/۸۲۹	۰/۶۲۶	۰/۰۰۱۸۳۱	۰/۰۳۲۲۴۳	
	۴	-	-	-	-	۱/۰۹	۰/۷۱۷	۰/۰۰۲۲۱	۰/۰۳۰۷۵۲	
	۵	-	-	-	-	۱/۴۴	۰/۸۲۲	۰/۰۰۲۹۶۴	۰/۰۲۹۳۳۷	
	۱ تا ۵	۰/۸۲۵	۰/۳۷۵	-	۰/۱۲۵	۴/۴۸	۳/۲	۰/۰۱۰۸۶۷	۰/۱۶۱۲۵	

۶. نتیجه‌گیری

منابع با هزینه حداقلی در طی افق برنامه‌ریزی اعمال شده است. نتایج شبیه‌سازی اثرگذاری در نظر گرفتن قیود قابلیت اطمینان در مدل پیشنهادی نشان داده است؛ این مدل روی ساختار و بهره‌برداری ریزشبه‌چندحاملی (نظیر انتخاب مولد تولید همزمان با هزینه و قابلیت اطمینان بالاتر که ممکن است در نگاه اول موجب افزایش هزینه گردد ولی یک سطح قابل قبول از تأمین انرژی برای بارهای مختلف و مزایای اقتصادی در افق برنامه‌ریزی مهیا می‌کند) صورت گرفت. همچنین یک مدل پاسخ‌گویی بار جدید که قیمت خرید انرژی بارهای پاسخ‌گو را با قیمت بازار انرژی، مقدار انرژی خریداری شده و تولیدات داخلی مرتبط می‌کند، پیشنهاد شده است. در نهایت، اثرگذاری مدل پیشنهادی نشان داده شده است. مطالعات آینده روی تحلیل اثرگذاری انواع برنامه‌های پاسخ‌گویی بار روی قابلیت اطمینان سیستم درحالی‌که عدم قطعیت‌های مختلف به‌منظور

در این مقاله، یک استراتژی ترکیبی برای مدل‌سازی و فرموله کردن طراحی ریزشبه‌چندحاملی با در نظر گرفتن قیود قابلیت اطمینان پیشنهاد شده است. روش پیشنهادی یک مسئله برنامه‌ریزی را با هدف کاهش هزینه‌های بهره‌برداری و سرمایه‌گذاری به همراه هزینه‌های انرژی تأمین‌نشده برای بارهای چندگانه ارائه کرده است. به‌منظور رسیدن به مقدار معقول سطح قابلیت اطمینان برای تأمین بارها، شاخصه‌های مختلف قابلیت اطمینان نظیر هزینه انرژی تأمین‌نشده، شاخصه انرژی قابلیت اطمینان، انتظار قطع بار و احتمال قطع بار در فرایند بهینه‌سازی تعریف شده‌اند. همچنین مدل پیشنهادی روی یک ریزشبه‌چندحاملی تک‌باس به‌منظور تعیین انتخاب بهینه نوع و سائز تولیدات پراکنده برای تأمین بدون وقفه

دستیابی به مدلی دقیق تر دیده شده‌اند، تمرکز دارد.

علائم اختصاری

$\hat{t}_{l,i}$	زمان قطعی	A	ظرفیت در دسترس تجهیزات
i	نرخ بهره سالانه	C	هزینه
علائم یونانی		D	بار پاسخ‌گو
π	قیمت خرید انرژی	D_0	بار پاسخ‌گوی اولیه
ψ	قیمت فروش انرژی	E	انرژی ذخیره‌ساز
v	ضریب توزیع گاز	$EENS$	هزینه انرژی تأمین نشده
ρ	هزینه خرید انرژی بارهای پاسخ‌گو	EIR	شاخصه انرژی قابلیت اطمینان
η	راندمان	El	کشش قیمت
بالانویس		ENS	انرژی تأمین نشده مورد انتظار
bo	گرماساز	$Invs$	هزینه نصب و سرمایه‌گذاری
cap	ظرفیت	I	متغیر باینری وضعیت انتخاب تجهیز
$char$	وضعیت شارژ ذخیره‌ساز	K	ضریب هزینه نگهداری
chp	مولد تولید همزمان	L	بار غیر پاسخ‌گو
$dischar$	وضعیت دشارژ ذخیره‌ساز	$LOLE$	انتظار قطع بار
pv	فتوولتائیک	$LOLP$	احتمال قطع بار
$trans$	ترانسفورماتور	M	راندمان واحدها
ESS	ذخیره‌ساز سیستم پایین نویس	P	انرژی دریافت شده
0	مقدار اولیه	Po	انرژی تولید شده
e	برق	Pr	احتمال قطع بار
g	گاز طبیعی	RP	تولید انرژی تجدیدپذیر
h	حرارت	T	انتقال انرژی
α	نوع حامل	$VOLL$	هزینه قطعی بار
inv	سرمایه‌گذاری	Co	ماتریس کوپلاژ مبدل
p	حامل دریافت انرژی	S	ضریب کوپلاژ ذخیره‌ساز
l	حامل انتقال انرژی	Ie	متغیر باینری وضعیت شارژ و دشارژ ذخیره‌ساز
$main$	نگهداری	c	شماره تجهیزات موجود
$oper$	بهره‌برداری	ee	عناصر کشش
stb	انرژی تلف شده ذخیره‌ساز	t	ساعت
tot	کل	d	روز
اختصارات			
$MCMG$	ریزشبکه چندحاملی		
$MGCC$	کنترلر مرکزی ریزشبکه		

مراجع

- [1] Nazarpour, D., Golshannavaz, S. and Mahboobkhah, A., "Investigating the effect of load uncertainty on prioritizing demand response programs", Energy Eng. Manag. , Vol. 7, No. 4, pp. 20–27, 2018.
- [2] Farza, F., Lahiri, S., Kleinberg, M., Gharieh, K. and Jafari, M., "Microgrids for fun and profit: The economics of installation investments and operations", IEEE Power and Energy Magazine (IPEM), Vol. 11, No. 4, pp. 52–58, 2013.

- [3] Shahidehpour, M. and Clair, J. F., "A functional microgrid for enhancing reliability, sustainability, and energy efficiency", *The Electricity Journal*, Vol. 25, No. 8, pp. 21-28, 2012.
- [4] Parhizi, S., Lotfi, H., Khodaei, A. and Bahramirad, S., "State of the art in research on microgrids: A review", *IEEE Access*, Vol. 3, pp. 890-925, 2015.
- [5] Favre-perrod, P., Kienzle, F. and Andersson, G., "Modeling and design of future multi-energy generation and transmission systems", *Electr. Power Syst*, Vol. 20, No. 2, pp. 994-1008, 2010.
- [6] Guetal, W., "Modeling, planning and optimal energy management of combined cooling, heating and power microgrid: A review", *Int. J. Electr. Power Energy Syst*, Vol. 54, pp. 26-37, 2014.
- [7] Geidl, M., Koepfel, G. and Favre-Perrod, P., "The Energy Hub-A powerful concept for future energy systems", *Third Annual Carnegie Mellon Conference on the Electricity Industry (TACMCEI)*, Vol. 6, No. 5, pp. 13 - 14, 2007
- [8] Manshadi, S. D. and Khodayar, M. E., "Resilient operation of multiple energy carrier microgrids", *IEEE Trans. Smart Grid*, Vol. 6, No. 4, pp. 2283-2292, 2015.
- [9] Nikmehr, N. and Najafi Ravadanegh, S., "Optimal Power Dispatch of Multi-Microgrids at Future Smart Distribution Grids", *IEEE Trans. Smart Grid*, pp. 1648-1657, 2015.
- [10] Olivares et al. D. E., "A Centralized energy management system for isolated microgrids", *IEEE Trans. Smart Grid*, Vol. 5, No. 4, pp. 1864-1875, 2014.
- [11] Shahmohammadi, A., Moradi-Dalvand, M., Ghasemi, H. and Ghazizadeh, M. S., "Optimal design of multicarrier energy systems considering reliability constraints", *IEEE Trans. Power Deliv*, Vol. 30, No. 2, pp. 878-886, 2015.
- [12] Yuyang, M., Jinling, L. and Guodong, Z., "Improved multi-objective particle swarm optimization algorithm based scheduling optimization of grid-connected microgrid", *Electr. Power Sci. Eng*, Vol. 7, pp. 4-10, 2012.
- [13] Kinjyo, Y., Asato, B., Yona, A., Senjyu, T., Funabashi, T. and Kim, C.-H., "Optimal operation of smart grid with fuel cell in isolated islands", *J. Int. Counc. Electr. Eng*, Vol. 2, No. 4, pp. 423-429, 2012.
- [14] Esmat, A., Magdy, A., ElKhattam, W. and ElBakly, A. M., "A novel energy management system using ant colony optimization for microgrids", *3rd Int. Conf. Electr. Power Energy Convers. System*, pp. 1-6, 2013.
- [15] Cao, Y., Zhang, Y., Zhang, H., Shi, X. and Terzija, V., "Probabilistic optimal PV capacity planning for wind farm expansion based on NASA data", *IEEE Trans. Sustain. Energy*, Vol. 8, No. 3, pp. 1291-1300, 2017.
- [16] Nikmehr, N. and Najafi Ravadanegh, S., "Solving probabilistic load flow in smart distribution grids using heuristic methods", *J. Renew. Sustain. Energy*, Vol. 7, No. 4, pp. 1-15, 2015.
- [17] Song, N.-O., Lee, J.-H. and Kim, H.-M., "Optimal electric and heat energy management of multi-microgrids with sequentially-coordinated operations", *Energies*, Vol. 9, No. 6, pp. 1-18, 2016.
- [18] Amir, V., Jadid, S. and Ehsan, M., "Probabilistic optimal power dispatch in multi-carrier networked microgrids under uncertainties", *Energies*, Vol. 10, No. 11, pp. 2-21, 2017.
- [19] Seifi, H. and Sepasian, M. S., "Electric Power System Planning: Issues, Algorithms and Solutions", Vol. 49, 2011.
- [20] Ren, H., Gao, W. and Ruan, Y., "Optimal sizing for residential CHP system", *Appl. Therm. Eng*, Vol. 28, No. 5-6, pp. 514-523, 2008.
- [21] Gu, M., Tang, Y., Peng, S., Wang, D., Sheng, W. and Liu, K., "Optimal configuration and analysis of combined cooling, heating, and power microgrid with thermal storage tank under uncertainty", *J. Renew. Sustain. Energy*, Vol. 7, No. 1, pp. 1-14, 2015.
- [22] Yazdaninejadi, A., Hamidi, A., Golshannavaz, S., Aminifar, F. and Teimourzadeh, S., "Impact of inverter-based DERs integration on protection, control, operation, and planning of electrical distribution grids", *Electr. J*, Vol. 32, No. 6, pp. 43-56, 2019.
- [23] Adefarati, T. and Bansal, R. C., "Reliability, economic and environmental analysis of a microgrid system in the presence of renewable energy resources", *Applied Energy*, Vol. 236, pp. 1089-1114, 2019.
- [24] Guo, L., Liu, W., Cai, J., Hong, B. and Wang, C., "A two-stage optimal planning and design method for combined cooling, heat and power microgrid system", *Energy Convers. Manag*, Vol. 74, pp. 433-445, 2013.
- [25] Bahramirad, S., Reder, W. and Khodaei, A., "Reliability-Constrained Optimal Sizing of Energy Storage System in a Microgrid", *IEEE Trans. Smart Grid*, Vol. 3, No. 4, pp. 2056-2062, 2012.
- [26] Amir, V., Jadid, S. and Ehsan, M., "Optimal planning of a multi-carrier microgrid (MCMG) considering demand-side management", *Int. J.*

Renew. Energy Res, Vol. 8, No. 1, pp. 238–249, 2018.

- [27] Amir, V., Jadid, S. and Ehsan, M., "*Optimal design of a multi-carrier microgrid (MCMG) considering net zero emission*", Energies, Vol. 10, No. 12, pp. 2019–2030, 2017.