نشریه علمی (فصلنامه) «انرژی ایران»
دوره ۲۸، شماره۲، تابستان ۱۴۰۴، صفحه ۱۰-۲۷

تحلیل و بررسی فنی و اقتصادی انرژی خورشیدی و ذخیره ساز ترکیبی

شایان جعفری مرندی
دانش آموخته کارشناسی ارشد مهندسی سیستم های انرژی، واحد تهران شمال، دانشگاه آزاداسلامی، تهران، ایران
مسعود ترابی آزاد*
استاد، واحد تهران شمال، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران (عهده دا ر مکاتبات)M_Azad@Iau-tnb.ac.ir
غلامرضا صالحی
دانشیار، واحد تهران مرکز، دانشگاه آزاد اسلامی ، تهران، ایران

تاریخ دریافت:
۱۴۰۴/۱۱/۰۵

تاریخ پذیرش:
۱۴۰۴/۱۱/۰۹

کلمات کلیدی:
ذخیره ساز انرژی، سیستم مدیریت انرژی، انرژی های تجدیدپذیر، انرژی خورشیدی، الگوریتم بهینه سازی نهنگ

چکیده

با توجه به نقش انرژی های خورشـیدی و ذخیره سـازهای هیبریدی انرژی الکتریکی در بهبود تامین انرژی الکتریکی، در این مطالعه، الگوریتم جدیدی بر پایه روش بهینه سازی نهنگ جهت حل م سئله بهره برداری اقت صادی انرژی خور شیدی تحت دو ا ستراتژی مختلف اولویت تامین برق (FEL) و اولویت تامین حرارت (FTL) ارائه گردیده ا ست. نتایج ن شان می دهد که میزان صـرفه جویی انرژی (PEC) در اسـتراتژی FEL، کاهشـی برابر با۱۱/۰۶ در صد ن سبت به حالت مرجع دارند و در ا ستراتژی FTL به میزان ۴ درصـد نسـبت به حالت مرجع افزایش یافته اسـت. همچنین هزینه عملکردی در ا ستراتژیهای FEL، ۴/۶در صد ن سبت به حالت مرجع کاهش یافته است. در حالیکه در استراتژی FTL کاهشی برابر با ۵۴ درصد دارد. از طرفی میزان ن شر دی اک سید کربن ا ستراتژی های FTL FEL به ترتیب کاهشـی برابر با ۳۶/۰۵ درصـد، ۲۴ درصـد نسـبت به حالت مرجع دارند. میزان صـرفه جویی انرژی (PEC) در اسـتراتژی FEL- peo و - FTL peo به ترتیب کاهشی برابر با ۱۳/۳۵ درصد و ۹/۱۱ درصد نسبت به حالت مرجع دارند. همچنین هزینه عملکردی در اسـتراتژی های FEL-peo و FTL-peo به ترتیب کاهشی برابر با ۱۳/۳۵ درصد و ۹/۱۱درصد نسبت به حالت مرجع دارند. از طرف دیگر میزان نشر دی اکسید کربن ا ستراتژیهای FEL-peo و FTL-peo به ترتیب کاهشی برابر با ۳۶/۲۳ در صد و ۲۶/۲۷ در صد ن سبت به حالت مرجع دارند. ا ستراتژی FEL با هدف حداقل نمودن سوخت م صرفی اولیه، عملکرد بهتری ن سبت به ا ستراتژی FEL به دلیل کاهش سوخت م صرفی، هزینه عملکردی و ن شر دی اک سید کربن دارند. میزان صرفه جویی انرژی (PEC) در ا ستراتژی FEL-oco و FTL-oco به ترتیب کاه شی برابر با ۱۲/۸۴در صد و ۴ در صد ن سبت به حالت مرجع دارند.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-24]

۱ مقدمه

منابع انرژی تجدیدپذیر نظیر انرژی خورشـیدی و باد، به دلیل رایگان بودن و فراوانی جغرافیایی دارای قابلیت های بالایی در تولید برق می با شند. نیروگاه های خور شیدی منا سب ترین فناوریهای تجدیدپذیر برای تولید و ذخیره الکتریسیته بوده و نصب آنها به سرعت در حال افزایش اسـت. با توجه به روند رو به رشـد اسـتفاده از منابع انرژی های تجدید پذیر در شـبکه های توزیع، به دلیل ماهیت تصـادفی و عدم قطعیت در تولید توان خروجی قابلیت اطمینان شبکه تحت تأثیر قرار می‌گیرد. سیستم های ذخیره ساز انرژی نقش بسیار مهمی در ایجاد تعادل در شبکه های توزیع برق دارد و باعث می شود که شبکه ای انعطاف پذیر تر و قابل اعتمادتر دا شته با شیم. عملکرد سیستم های ذخیره ساز انرژی در مواقعی که میزان عرضه برق بیشتر از تقاضا است، مازاد تولید را ذخیره می‌کنند و در مواقعی که میزان تقاضا از عرضه بیشتر می‌شود، برق ذخیره شده را برای ایجاد تعادل در شبکه عرضه می‌کنند.

انعطاف پذیری شبکه‌های توزیع، موضوعی است که با تکامل این شبکه‌ها با جریان یک جهته الکتریسیته (از ژنراتورهای بزرگ متمرکز) به یک سیستم از طریق جریان برق دو جهته بین ژنراتورهای سنتی و تولیدکنندگان فزاینده مقیاس کوچک، بیش از پیش افزایش یافته است. تولیدکنندگان اغلب از منابع انرژی پراکنده (DER) اسـتفاده می‌کنند که بصـورت متناوب می‌باشـد و به آنها این امکان را می‌دهد تا نقش فعالانه و پویاتری در مصرف و تولید برق دا شته با شند. در این بین، دستگاه‌های ذخیره انرژی الکتریکی نقش به سزایی در افزایش انعطاف پذیری شبکه خواهند دا شت (Javadi et al. 2019). ا صطلاح "ذخیره انرژی الکتریکی" شامل تعداد قابل توجهی از فن‌آوری‌های متنوع ا ست که هدف آنها ذخیره انرژی و سپس انتشار آن به صورت الکتریسیته می‌با شد (Gissey et al. 2018). د ستگاه‌های معمولی ذخیره انرژی الکتریکی (نظیر UPS ها) در سـیسـتم‌های تامین کننده انرژی الکتریکی به منظور بهبود کیفیت توان تولیدی، کمک به کنترل فرکانس اولیه و ثانویه در راسـتای افزایش پایداری شـبکه، هموارسـازی نوسـانات توان در پروفایل‌های تولیدی و ادغام بهتر منابع انرژی تجدیدپذیر و ارتقا مشارکت کاربران در مدیریت تقاضا از طریق تغییر زمان مصرف انرژی مورد استفاده قرار می‌گیرند(Mazza et al. 2020). با توجه به نقش مؤثر این دستگاه ها در برقراری انعطاف پذیری شبکه، در صورتی که ظرفیت دستگاه‌های ذخیره انرژی الکتریکی اشتباه انتخاب شده با شد و یا در مکان ا شتباهی قرار گیرد، می‌تواند از نظر م سائل فنی، نتایج منفی‌ای را به همراه دا شته با شد و حتی منجر به پیامدهای اقتصادی و فنی نامطلوبی برای شبکه شود (Das et al. 2018). وجود انرژی خورشیدی در شبکه سبب ایجاد بارها و توان راکتیو در شبکه می شود که ذخیره سازهای هیبریدی با قرارگیری و ظرفیت بهینه خود در مکان های تعیین شده، می‌توانند به حفظ پایداری در شبکه کمک کرده و با فراهم نمودن شرایط بهینه اقتصادی، رضایت مشترکان و سرمایه گذاران انرژی را برآورده سازند.

کالینچی و همکاران (۲۰۱۵) به تجزیه و تحلیل فنی–اقتصادی یک سیستم انرژی تجدیدپذیر هیبریدی مستقل با گزینه های تولید و ذخیره هیدروژن پرداختند. ابزار بهینه سـازی ترکیبی برای انرژی های تجدیدپذیر الکتریکی (HOMER) برای تعریف اندازه بهینه تجهیزات بر ا ساس داده های جغرافیایی و هوا شنا سی منطقه مورد مطالعه ا ستفاده شد. این مطالعه دو سناریو را در نظر می‌گیرد که فقط توربین بادی و سـیسـتم‌های هیبریدی توربین بادی/PV هسـتند. اسـتفاده از توربین بادی/سـیسـتم آرایه PV، به جای تنها توربین بادی، NPC را از ۱۴،۶۲۴،۳۴۳ دلار به ۱۱،۹۶۰،۶۹۸ دلار کاهش می دهد. همچنین ظرفیت مخزن هیدروژن را به ۴۰۰ کیلوگرم کاهش می‌دهد.

خ سروی و همکاران (۲۰۱۸) در مقاله ای به تجزیه و تحلیل انرژی، اگزرژی و اقتصادی یک انرژی تجدیدپذیر هیبریدی با سیستم ذخیره سازی هیدروژن پرداختند. این سیستم ترکیبی از انرژی خورشیدی و باد، واحد تولید هیدروژن و سلول سوختی است. آنالیز انرژی و اگزرژی سیستم PV برای بازده انرژی و اگزرژی به ترتیب میانگین ۱۲٪ و ۱۶٪ گزارش شده است. میانگین راندمان انرژی و اگزرژی توربین بادی به ترتیب تقریباً ۳۲ و ۲۵ درصد به دست آمده است. حداکثر تخریب اکسرژی برای سیستم PV حدود ۶۵٪ حاصل شده است. همچنین بر اساس تحلیل های اقتصادی، سیستم ذخیره انرژی ۵۰ درصد از کل سرمایه گذاری را شامل می‌شود.

کومار و همکاران (۲۰۱۹) به برر سی ادغام ا ستراتژیک سیستم‌های ذخیره انرژی باتری با ارائه خدمات جانبی توزیع شده در سیستم‌های توزیع فعال پرداختند. در این مقاله، یک چارچوب بهینه سازی دو سطحی جهت تخ صیص بهینه واحدهای تولید انرژی باد و سیستم‌های

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-24]

ذخیره انرژی با ارائه خدمات جانبی مرکزی در سیستم‌های توزیع، ارائه شده است. چارچوب پیشنهادی بر روی سیستم توزیع برای موارد مختلف با استفاده از الگوریتم ژنتیک حل شده است. مقایسه نتایج شبیه سازی نشان دهنده کاهش مصرف برق و کاهش تلفات توان و ولتاژ بر اساس طرح پیشنهادی است. تاماریا و همکاران (۲۰۱۹) در پژوهشی به بررسی استراتژی کنترلی برای ریزشبکه AC-DC با ذخیره سازی انرژی ترکیبی تحت حالات عملیاتی مختلف پرداختند. در این مقاله، استراتژی کنترل برای سیستم ذخیره انرژی هیبرید متصل به منابع تجدیدپذیر (HESS) تحت شرایط متصل به شبکه/جزیره ای، پیشنهاد گردید. این رویکرد به انتقال یکپارچه بین مدهای فرعی مختلف سیستم همراه با خدمات اضافه، مانند بهبود کیفیت توان و دیسپاچ (پخش) توان بین منابع مختلف، می پردازد. اثربخشی طرح پیشنهادی، بوسیله بررسی های شبیه سازی (عددی) و تجربی، تایید می‌شود.

الزحرانی و همکاران (۲۰۲۰) به بررسی کاهش تلفات برق از طریق قرار دادن بهینه باتری در یک شبکه توزیع شده با نفوذ زیاد سیستم فوتوولتائیک پرداختند. در این مقاله، تلفات سیستم و مسائل مربوط به کیفیت توان برق مرتبط با استقرار زیاد PV در یک شبکه توزیع ۳۳ باسه IEEE بررسی شده و با بهره¬گیری از الگوریتم ژنتیک، جایگذاری ظرفیت BESS صورت گرفته است. نتایج به دست آمده به ویژه در مورد قرار دادن توزیع شده BESS، کاهش قابل توجهی در تلفات سیستم را نشان می‌دهد. لاتا و وادهرا (۲۰۲۰) به ارائه مدلی بهینه در راستای بهبود قابلیت اطمینان سیستم توزیع شعاعی با تعیین مکان و ظرفیت بهینه سیستم ذخیره انرژی با استفاده از الگوریتم TLBO پرداختند. الگوریتم پیشنهادی از روش TLBO برای به حداقل رساندن توابع هدف استفاده می‌کند. همچنین از شبکه شعاعی ۳۰ با سه استاندارد جهت تجزیه و تحلیل داده‌ها استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از روش پیشنهادی به منظور تعیین مکان و اندازه ESS ها در سیستم توزیع، ۱۷٪ کاهش در کل هزینه بهره برداری را فراهم نموده است. عدم درنظرگیری زمان استفاده (ToU) از موضوعات پرداخته نشده در این مقاله است.

لیو و همکاران (۲۰۲۳) در پژوهشی به بررسی تعیین مکان و ظرفیت سیستم ذخیره سازی انرژی بر اساس الگوریتم بهینه سازی نهنگ بهبودیافته پرداختند. در این پژوهش از الگوریتم بهینه سازی نهنگ بهبود یافته استفاده شده. نتایج نشان داده که مکان‌یابی سیستم‌های ذخیره سازی انرژی و نتایج تعیین ظرفیت حل شده توسط این الگوریتم می‌تواند به ذخیره سازی انرژی متصل شود و در نتیجه نوسان‌های ولتاژ و تلفات شبکه توان فعال سیستم را کاهش دهد، اثر کاری تولید انرژی جدید را بهبود بخشد و تاثیر نوسان‌های برق بر روی سیستم را کمتر نماید. سان و همکاران (۲۰۲۲) در پژوهشی به طراحی چارچوب سیستم هیبریدی انرژی فتوولتائیک–بیو زباله با ذخیره ساز هیدروژن و در نظر گرفتن شاخص های اقتصادی و فنی با استفاده از الگوریتم بهینه سازی نهنگ پرداختند. روش پیشنهادی برای طراحی سیستم هیبریدی عملکرد بهتری نسبت به PSO در دستیابی به TNPC کمتر و قابلیت اطمینان بهتر با سرعت و دقت همگرایی بالاتر ارائه کرده. با توجه به نتایج، کاهش در دسترس بودن مولفه ها باعث افزایش TNPC و تضعیف شاخص های قابلیت اطمینان می‌شود.

شکرزاده و همکاران (۱۳۹۷) در پژوهشی به بررسی ایجاد سیستم ذخیره کننده انرژی باتری – ابرخازن (HESS) برای ذخیره انرژی تولید شده توسط سیستم های تجدیدپذیر در مناطق دور پرداختند. ذخیره سازی انرژی ترکیبی باتری ابر خازن (HESS) به عنوان راهی برای گسترش طول عمر باتری با کاهش نوسانات جریان باتری می باشد. در این مقاله نتایج عامل از شبیه سازی Matlab-Simolink از توپولوژی اتصال منفعل باتری ابر خازن نشان دهنده عملکرد بهتر سیستم ذخیره کننده ی انرژی برای سیستم های تجدیدپذیر و افزایش طول عمر باتری می‌باشد.

خرم دل و سلیمی (۱۳۹۸) به مکان‌یابی بهینه ذخیره سازهای انرژی در مواجهه با عدم قطعیت‌های شبکه جهت کاهش هزینه‌های بهره¬برداری پرداختند. در این مقاله از روش سیستم ذخیره انرژی به منظور حفظ قابلیت اطمینان در شبکه قدرت استفاده شده است. برای اعتبارسنجی، روش ارائه شده با استفاده از نرم افزار GAMS بر روی یک شبکه ۶ باسه استاندارد IEEE صورت گرفته که نتایج به دست آمده مؤثر بودن روش پیشنهادی را تأیید کرده است. در این تحقیق، تنها از یک مدل تک هدفه برای تعیین مکان سیستم های ذخیره ساز انرژی استفاده شده و به تعیین ظرفیت و بررسی زمان استفاده(ToU) پرداخته نشده است.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-24]

علیزاده و همکاران (۱۳۹۸) به مدلسازی و بهینه سازی مصرف انرژی در خانه هوشمند با حضور ذخیره‌ساز انرژی، سلول خورشیدی، خودروی برقی و پاسخ‌گویی بار پرداختند. مدل پیشنهادی در برنامه GAMS پیاده‌سازی شده و نتایج نشان می‌دهد که استفاده از سیستم‌های اضافی برای تأمین انرژی بطور قابل توجهی موجب کاهش هزینه برق خانه هوشمند خواهد شد. کریم زاد و همکاران (۱۳۹۹) به برنامه ریزی بهینه ذخیره سازهای انرژی و تولیدات پراکنده در شبکه‌های توزیع فعال با در نظر گرفتن تکنولوژی‌های مختلف باتری پرداختند. یک برنامه ریزی بلند مدت با روش بهینه سازی الگوریتم ژنتیک در یک سیستم توزیع فعال ۳۳ با سه استاندارد (IEEE) شبیه سازی شده و مسائل مربوط به جایابی، ظرفیت و توان بهینه برای تکنولوژی‌های مختلف باتری بررسی شده است. نتایج بدست آمده از مقایسه تکنولوژی‌های مختلف باتری حاکی است، که باتری لیتیوم-یون با کمترین هزینه سرمایه گذاری و بهره برداری، دارای برتری اقتصادی است. موسوی تقی آبادی و همکاران (۱۳۹۹) به ارائه یک مدل جدید برنامه‌ریزی انرژی و ذخیره با در نظرگرفتن قیود فرکانسی در حضور نیروگاه‌های تجدیدپذیر و ذخیره‌سازهای هوای فشرده پرداختند. در مدل پیشنهادی، پس از وقوع پیشامد واحدهای ذخیره ساز به صورت خودکار توان زیادی را به شبکه تزریق می‌کنند تا از افت فرکانس جلوگیری نمایند. علاوه براین، عدم قطعیت واحدهای بادی موجود در شبکه به کمک یک مدل احتمالاتی در برنامه ریزی تولید و ذخیره لحاظ شده است. در این مقاله به بررسی هیچکدام از مسائل مربوط به ظرفیت، مکان و کاربردهای زمان استفاده پرداخته نشده است.

کریمی و همکاران در سال ۱۴۰۰، در پژوهشی به بررسی سنجش ظرفیت جذب تکنولوژی ذخیره سازی انرژی خورشیدی به کمک نظریه سیستم های خاکستری پرداختند. در این پژوهش ظرفیت جذب تکنولوژی های موجود جهت ذخیره سازی انرژی خورشیدی با استفاده از مدل تودوروا و دوریسین بررسی شده و به کمک تحلیل رابطه خاکستری تکنولوژی دارای اولویت بالاتر جهت انتقال انتخاب شد.

خزعلی و همکاران در سال ۱۴۰۱، در پژوهشی به بررسی تحلیل انرژی و ارزیابی سیستم نوین ترکیبی ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده و تلمبه ذخیره‌ای پرداختند. این پژوهش نشان داد نسبت حجم هوا به حجم مخزن فشاربالا بیش‌ترین تاثیر را بر بازدهی سیستم دارد و یک پارامتر تعیین‌کننده است.

نیروگاههای خورشیدی یکی از پایه ای ترین ابزار تولید انرژی از سوختهای پاک و تجدیدپذیر می باشند که می‌تواند در قطع استفاده از سوختهای فسیلی در نیروگاههای حرارتی مدنظر قرار گیرد. ذخیره سازی انرژی های خورشیدی به وسیله ذخیره سازها به آسانی اتفاق نمی‌افتد و نیازمند ارزیابی شاخص ها و عوامل بسیاری می‌باشد. لذا، لزوم استفاده از روشی که بتواند با کمترین بروز اغتشاش در شبکه، میزان ذخیره سازی انرژی خورشیدی را در شبکه افزایش دهد، حیاتی است. از سوی دیگر مدلسازی برای اینگونه مسائل می‌تواند علاوه بر امکان کمّی سازی شاخص‌ها سرعت حل مسائل را نیز بالاتر ببرد. لذا بررسی این مساله از دو جنبه زیست محیطی و اقتصادی از اهمیت بالایی برخوردار است و ضرورت انجام این پژوهش را نشان می‌دهد. هدف از این تحقیق، تحلیل و بررسی انرژی خورشیدی همراه با ذخیره ساز هیبریدی، بهبود عملکرد فنی و اقتصادی شبکه، کاهش تلفات ولتاژ و توان شبکه و پاسخگویی سریع و مناسب به تقاضای بار است. سیستم‌های ذخیره سازی انرژی ترکیبی (HESS) که با جفت شدن دو یا چند فناوری ذخیره سازی انرژی مشخص می شوند، به عنوان راه‌حلی برای دستیابی به عملکرد مطلوب با ترکیب ویژگی‌های مناسب فناوری‌های مختلف در راستای ذخیره سازی انرژی های تجدیدپذیر عمل می کنند. انرژی خورشیدی را می‌توان مستقیماً توسط سلول فتوولتائیک که نوعی دستگاه فوتوالکتریک است بردا شت و به انرژی الکتریکی تبدیل کرد که خواص الکتریکی آن مانند جریان، مقاومت ولتاژ یا ولتاژ پس از قرار گرفتن در معرض تابش خورشید تغییر می‌کند.

۳. روش تحقیق

با توجه به نقش انرژی های خورشیدی و ذخیره سازهای هیبریدی انرژی در بهبود تامین انرژی الکتریکی، اطلاعات مورد نیاز این پژوهش از طریق مطالعه منابع کتابخانه‌ای و بررسی مقالات معتبر در حوزه موضوع جمع آوری شده است. در مرحله بعد، ابتدا اطلاعات یک شبکه

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-24]

ا ستاندارد IEEE یعنی مشخصات شبکه ۶۹ با سه IEEE را دریافت نموده و سپس با مدلسازی ریا ضی که در بردارنده اهداف اقتصادی و پایداری (فنی) شبکه می‌باشد، ظرفیت و مکان ذخیره سازهای انرژی را بصورت متغیرهای تصمیم درنظر گرفته و زمان استفاده ToU را به عنوان قید در شبکه درنظر گرفته شد. سپس با ا ستفاده از الگوریتم نهنگ به بهینه سازی مدل ریا ضی در نرم افزار متلب پرداخته و نتایج ارائه می شود. این پژوهش به بررسی ا ستفاده از سیستم تلفیقی انرژی‌های تجدید پذیر انرژی خور شیدی-بادی به همراه باتری به عنوان ذخیره ساز انرژی الکتریکی و بهره گیری از دیزل ژنراتور در شبکه در راستای صرفه جویی در مصرف انرژی و کاهش آلاینده های گلخانه‌ای می‌پردازد.

به منظور حل مساله به یک مدل ریاضی چندهدفه نیاز است. مدل پیشنهادی ناشی از بکارگیری و استفاده از مدل های ارائه شده در مقالات جوادی و همکاران (۲۰۲۰)، جومات و همکاران (۲۰۱۱)، گیسی و همکاران (۲۰۱۸) و الزهرانی و همکاران (۲۰۲۰) می‌باشد. قبل از ارائه مدل ریا ضی، فر ضیات م ساله مطرح می شود. در این سیستم چنانچه توان تولیدی تو سط انرژی های نو بیش تر از توان مورد تقا ضای مصرف کنندگان باشد و میزان شارژ باتری ها در حداکثر مقدار خود نباشد انرژی مازاد تولید شده به جای هدر رفت، در باتری پشتیبان ذخیره می گردد و بدین ترتیب باتری در حالت شارژ قرار می‌گیرد، در این حالت کنترلر شارژ باتری وارد عمل شده و از شارژ بیش از حد باتری جلوگیری می کند. در حالت عکس اگر توان تولیدی تو سط سیستم هیبریدی پا سخگوی نیاز م صرف کنندگان نبا شد باتری به عنوان منبع پشتیبان در کنار نیروگاه های بادی خور شیدی وظیفه تامین توان مورد نیاز را خواهد دا شت. در این حالت باتری در و ضعیت د شارژ قرار می گیرد؛ و در صورتی که بار تولیدی از منابع تجدید پذیر کمتر از بار مورد نیاز م صرفی با شد و انرژی باتری کافی نبا شد دیزل ژنراتور رو شن خواهد شد و بار مصرفی را تامین خواهد کرد. مدل فنی سیستم ترکیبی بادی خورشیدی دیزل شامل چند زیر مدل می باشد که عبارت اتند از؛ مدل توربین بادی، مدل ماژول خورشیدی، مدل باتری، مدل converter، مدل دیزل ژنراتور، مدل احتمال از بین رفتن عرضه انرژی (LPSP) برنامه ریزی همزمان توسعه استفاده از انرژی خورشیدی و ذخیره سازهای انرژی هیبریدی با در نظر گرفتن دو سناریو و بررسی تاثیر و ضعیت ها و اهداف مختلف در ظرفیت ذخیره سازها با ا ستفاده از روش بهینه سازی با روش های احتمالاتی حل و تحلیل می گردد. به عبارت دیگر یک رویکرد بهینه سازی برای اندازه گیری بهینه سیستم های تولید همزمان تحت عدم قطعیت طولانی مدت در تقا ضای انرژی و از بین رفتن بار بر اساس میزان تقاضای بار مصرفی با استفاده از مدل LPSP ارائه شده است. یک چارچوب شبیه سازی پویا برای مدل سازی دقیق سیستم انرژی تعریف شده ا ست، که شامل هر دو ارزیابی ا ستراتژی های سرمایه گذاری سنتی و بهینه ا ست. در این پژوهش از نرم افزار متلب که نمونه ای از روش های عددی می با شد، ا ستفاده شده ا ست. نرم افزار متلب امکان آ سان عملیات ماتریسی، محاسباتی و توابعی، استفاده از الگوریتم های مختلف و همچنین امکان ارتباط آسان با زبان های مختلف برنامه نویسی را به کاربر می دهد. در این پژوهش از ورژن ۲۰۲۱ متلب استفاده شده و شبیه سازی بروی سیستمی با قدرت پردازنده ۵ هسته ای و میزان رم ۸ گیگابایت انجام شده است. با توجه به نقش مهم تعیین ظرفیت بهینه واحد تولید توان در عملکرد فنی، اقتصادی و زیست محیطی سیستم های تولید همزمان، این مسئله بسیار مورد توجه قرار می‌گیرد. استفاده از واحدهای تولید همزمان مزایای زیادی برای مالکین واحدهای صنعتی و صاحبان کارخانه ها به همراه دارد. اما کارایی این واحدها وابستگی زیادی به تعیین پارامترهای آن دارد. برای حل این مساله، یک بهینه سازی دو مرحله ای در نرم افزار متلب پیاده سازی شد. مرحله ۱: بهینه سازی برنامه ریزی توسعه شبکه انتقال و در مرحله ۲: بهینه سازی استراتژی عملیاتی (برای تعیین اندازه ظرفیت ذخیره ساز انرژی).

بهینه سازی برنامه ریزی توسعه شبکه انتقال شامل هر یک از استراتژی های عملیاتی شبیه سازی پویا از واحدهای تولیدی احتمالی موجود با اندازه های گسسته است. مقایسه بین صرفه جویی در هزینه سالانه در چندین اندازه ، سبب یک طراحی بهینه می گردد. در صورتی که استراتژی عملیاتی شبیه سازی شده FEL یا FTL باشد، نیازی به الگوریتم های بهینه سازی بیشتر نیست، زیرا این استراتژی ها به راحتی قابل اجرا ه ستند. در مقابل، هنگامی که عملکرد تحت عمل واحد بهینه مورد برر سی قرار گیرد، بهینه سازی ا ستراتژی عملیاتی مبتنی بر الگوریتم نهنگ برای تعیین مدیریت بهینه واحد تولید نیاز ا ست. این روش بهینه سازی با هدف شناسایی، برای هر یک از زمان های شبیه

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-24]

سازی شده، عامل بار بهینه برنامه ریزی است که موجب صرفه جویی در هزینه کلی سالانه می شود. برای این منظور، چندین روش بهینه سازی در طول سالها مورد استفاده قرار گرفته است. الگوریتم بهینه سازی نهنگ ((WOAیک الگوریتم بهینه سازی مبتنی بر ازدحام است که توسط میرجلیلی و لوئیس در سال ۲۰۱۶ که بر اساس تکنیک مانور شکار حباب‌دار – نهنگ‌های عنبر – برای حل مسائل پیچیده بهینه‌سازی توسعه یافته است(Gharehchopogh & Gholizadeh ,2019).

برای سیستم انرژی مورد نظر، بهینه کلی با مجموع بهینه های هر زمان واحد همزمان است. می توان از رویکرد به اصطلاح حریصانه ا ستفاده شود. بنابراین ، م ساله کلی به ۸۷۶۰ م ساله ریزتر تق سیم شده ا ست که برای م ساله زمانبندی برای هر گام زمانی، و الگوریتم محاسباتی کم هزینه تر، و سازگار با تعداد بالای شبیه سازی های مورد نیاز برای روش بهینه سازی نهنگ (WOA)، به طور خاص نوشته شده ا ست. به این ترتیب، اندازه م سئله برای هر سال شبیه سازی شده از $N_L \times 8760$ به$N_L \times 7860$ کاهش می‌یابد، که N_L تعداد فواصل گسسته ممکن از ضریب بار CGU (L) است.

به منظور پیاده سازی روش پی شنهادی، از یک مطالعه موردی که شامل اطلاعات اولیه م ساله می با شد ا ستفاده شده ا ست. مطالعه مورد م ساله، یک منطقه م سکونی همراه با زمین های ک شارزی مجاور و یک بیمار ستان ۲۰۰۰ تختخوابه ا ست. واحد تولیدی (CGU) در این منطقه شامل یک دیزل ژنراتور، سه پنل خورشیدی و دو توربین بادی است. ظرفیتهای توان الکتریکی ا سمی در نظر گرفته شده برای این سیستم از ۶۰۰ کیلو وات تا ۱۶۰۰ کیلو وات، با فواصل گسسته ۱۰۰ کیلو واتی می باشد. بنابراین، ظرفیت پایین تر توان برابر ۵۰٪ ظرفیت توان اسمی است و راندمان بار بخشی با توجه به روابط ۱و ۲ در نظر گرفته می‌شود:

$$\eta\,(E,CGU)=\eta\,(E,CGU,nom)\,(1.126L-0.126) \quad (۱)$$

$$\eta\,(H,CGU)=\eta\,(Q,cguCGU,nom)\,(0.8253L+0.1747) \quad (۲)$$

که ضریب بار بصورت $\mathbf{L = F_{CGU} \cdot \eta_{E.CGU.nom}/P_{CGU}}$ تعریف می شود. همچنین راندمان اسمی و نرخ گرما به توان **CGU** در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱ مشخصات اصلی واحد تولید

پارامتر	مقدار
$\eta_{E.CGU.nom}$	38.5%
$\eta_{Q.CGU.nom}$	34.4 %
HPR_{nom}	0.894

هزینه سرمایه گذاری واحدهای احتراق به طور قابل توجهی تحت تأثیر اثر مقیاس قرار دارد. به همین دلیل ، رابطه هزینه CGU با توجه به اندازه آن بصورت رابطه در نظر گرفته می شود:

(۳)

$$C_{TI.CGU} = 15460P_{CGU}^{0.7247}$$

که $C_{TI.CGU}$ باید بر حسب یورو و توان (P_{cgu}) بر حسب کیلووات باشد.

طول عمر طراحی CGU برابر با ۲۰ سال در نظر گرفته شده ا ست که این مقدار برای تمام اندازه های م شخص شده یک سان ا ست. این چنین مدت زمان برای پروژه های سیستم تولید، معمولا قابل قبول ا ست. هزینه نگهداری موتور برای هر واحد کیلووات ساعت الکتریکی

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-24]

تولید شـده ، به عنوان تابعی از ظرفیت توان اسـمی، بر اسـاس مقاله (Dong, et al. 2013) در نظر گرفته شـده اسـت. بنابراین ، هزینه نگهداری سالانه به صورت زیر است:

$$C_{M.CGU} = \sum_{i=1}^{8760} E_{CGU}^{i} 0.05604 P_{CGU}^{0.1638} \quad (۴)$$

که $C_{M.CGU}$ باید برحسب یورو، E_{CGU}^{i} برحسب کیلوات ساعت و P_{CGU} بر حسب کیلووات با شد. ظرفیت توان ا سمی بویلر گاز طبیعی به منظور در نظر گرفتن هر نوع تقا ضای حرارتی ، برای هر پیکربندی و ا ستراتژی عملیاتی در نظر گرفته شده ا ست که با ا ستفاده از راندمان ثابت مدل سازی شده است:

$$\eta_{boi} = 0.9$$

هزینه سوخت برای هر واحد انرژی حرارتی ، بر اساس مقدار گرمایش پایین تر برابر است با:

$$c_F = 0.04\ €/kWh$$

شبکه الکتریکی امکان فروش و خرید انرژی الکتریکی را نیز فراهم می کند. قیمت خرید و فروش برق، به عنوان مقادیر ثابت در نظر گرفته شده است:

$$c_{PEG} = 0.15€/kWh$$
$$c_{SEG} = 0.05\ €/kWh$$

همانطور که در بالا بیان داده شده ا ست، مقادیر متوسط ساعتی برای نشان دادن تقا ضای بار انرژی اتخاذ گردید. میزان بار مصرفی نیز بر اساس مقادیر ارائه شده در جدول های ۲ و ۳ می باشد.

جدول (۲) انرژی الکتریکی مورد نیاز خانگی

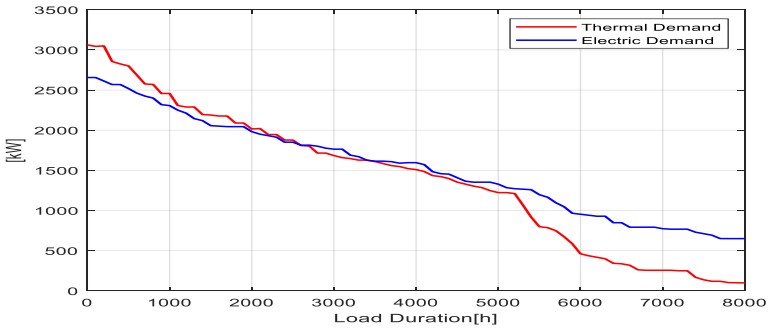
شماره	وسایل موردنیاز	توان مصرفی (W)	تعداد	ساعات کارکرد (H)	مصرف روزانه (Wh/ day)
۱	پنکه سقفی	۱۰۰	۱	۴	۴۰۰
۲	کولر ابی	۴۰۰	۱	۸	۳۲۰۰
۳	لامپ	۲۴	۴	۹	۸۶۴
۴	تلویزیون	۱۷۵	۱	۴	۷۰۰
۵	یخچال	۱۵۰	۱	۱۲	۱۸۰۰
۶	اتو	۱۲۰۰	۱	۰/۵	۶۰۰
مجموع انرژی مصرفی یک خانواده					**۷۵۶۴**
مجموع انرژی مصرفی ۴۰ خانواده					**۳۰۲۵۶۰**

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-24]

جدول ۳ انرژی الکتریکی خارج از خانه

ردیف	وسایل کشاورزی	توان مصرفی (W)	تعداد	زمان استفاده (H)	مصرف روزانه (Wh/ day)
۱	پمپ آبیاری ومصرفی	۱۲۰۰۰	۱	۱۶-۶	۱۲۰۰۰۰
۲	تجهیزات عمومی برقی روستا	۱۰۰۰	۱	۱۷-۱۰	۷۰۰۰
۳	لامپ و روشنایی	۲۵	۸	۶-۱۸	۲۴۰۰
مجموع انرژی در بخش شهری					**۱۲۹۴۰۰**

انرژی مورد نیاز در بخش مسکونی و شهری روزانه برابر با ۳۰۲۵۶۰ wh/day و ۱۲۹۴۰۰۰ wh/day است. شکل ۱ منحنی های طول بار خواسته های الکتریکی و حرارتی بیمارستان را نشان می دهد. این داده ها از ۱۲ روز معمولی، مربوط به ۴ هفته معمولی بدست آمده است. برای هر هفته ، به نمایندگی از دوره های هوای فصلی، یک روز هفته و دو روز آخر هفته (شنبه و یکشنبه) در نظر گرفته شده است. عدم قطعیت در تقاضای بار سالانه انرژی از طریق توزیع های عادی در نظر گرفته شده است. لذا ۲۰٪ انحراف معیار نسبی برای هر دو مورد نیاز الکتریکی و حرارتی به کار رفته است. چنین مقدار مطابق با داده های ۸ ساله متوالی تقاضای انرژی است که در بیمارستان مورد آزمایش اندازه گیری شده است.



شکل ۱ منحنی طول بار تقاضای الکتریکی و حرارتی

همانطور که اشاره شد، استفاده از ذخیره سازهای انرژی در کنار شبکه انتقال و با تعیین برنامه ریزی بهینه در دو بازار انرژی و رزرو از نوآوری این پژوهش می باشد که با استفاده از الگوریتم بهینه سازی نهنگ حل شده است.

۳- نتایج و بحث

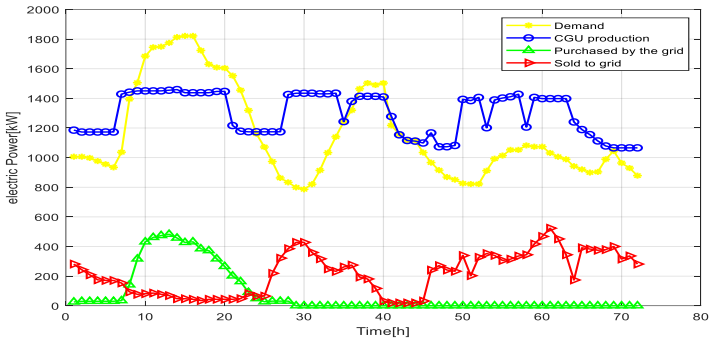
[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-24]

نتایج شبیه سازی برای تمام اندازه های CGU و استراتژی های عملیاتی در این بخش نشان داده شده است. همچنین از داده های اولیه ارائه شده برای مدل توربین بادی، سیستم فوتوولتائیک، ذخیره ساز باتری، و دیزل ژنراتور استفاده شده است. ۱۰۰۰۰ تکرار برای هر ترکیبی از پیکربندی طراحی و استراتژی عملیاتی انجام شد، به طوری که می توان نتایج قابل اعتماد و عدم اطمینان محدود در شاخص های خروجی را بدست آورد. از طرفی، در جدول ۴، مشخصات سیستم ذخیره ساز انرژی الکتریکی به منظور دریافت انرژی تجدیدپذیر، ذخیره نمودن آن، و فروش به شبکه ارائه شده است.

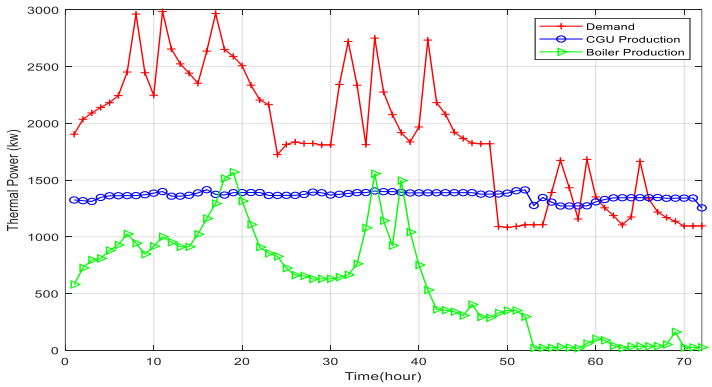
جدول ۴ مشخصات ذخیره سازهای انرژی الکتریکی

پارامتر	مقدار
ظرفیت	۱۰۰ کیلووات ساعت
توان شارژ	۵۰ کیلووات
توان دِشارژ	۵۰ کیلووات
کارایی شارژ	۰/۸۵ درصد
کارایی دشارژ	۰/۸۵درصد

شکل های ۲ و ۳ نمونه های معمولی از نحوه عملکرد سیستم انرژی شبیه سازی شده و خروجی های تفصیلی از شبیه سازی ها را با درنظرگیری ذخیره سازهای انرژی در برنامه ریزی تقاضای بار در بیمارستان مورد مطالعه را نشان می دهد. شکل ۲ نحوه تقاضای برق در ۷۲ ساعت متوالی را نشان می دهد. شکل ۳ برای تقاضای حرارتی همان نوع نتیجه را نشان می دهد.



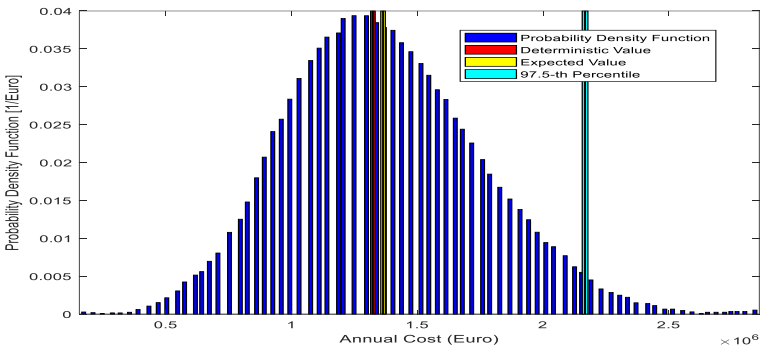
شکل ۲ خروجی توان الکتریکی شبیه سازی شده در سیستم بدون ذخیره ساز UPS و باتری های لیتیومی



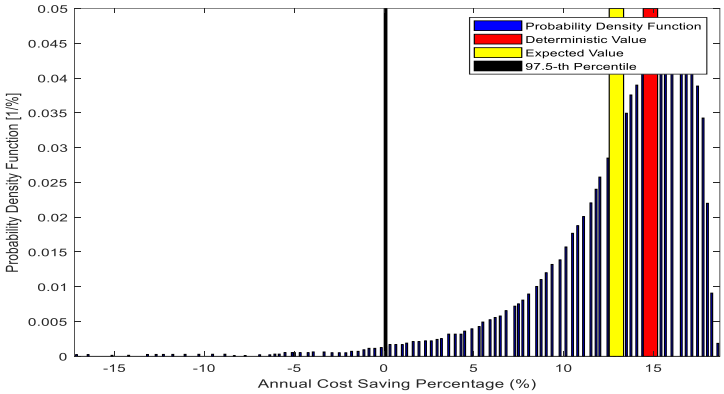
شکل۳ توان حرارتی خروجی مساله در سیستم بدون ذخیره ساز UPS و باتری های لیتیومی

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-24]

در شـکل های ۴ و ۵، نمونه هایی از نتایج به دسـت آمده توسـط اعمال روش بهینه سـازی نهنگ در راسـتای بهینه سـازی برنامه ریزی همزمان تو سعه ا ستفاده از انرژی های تجدیدپذیر خور شیدی و بادی و ذخیره سازهای ترکیبی انرژی را نمایش داده شده ا ست. شکل ۵ نمایـشی از توابع توزیع احتمال هزینه سالانه ا ست که برای اندازه خاص شبکه انتقال و ا ستراتژی عملیاتی بد ست آمده ا ست. در عوض ، شکل ۵ نتایج مشابه را در قالب درصد صرفه جویی در هزینه سالانه برای سیستم مورد نظر با درنظرگیری ذخیره سازهای انرژی را نشان می دهد. در هر دو شکل ، خط نقطه عمودی نشان دهنده مقدار قطعی این شاخص است ، که مطابق با نتیجه شبیه سازی به دست آمده با محتمل ترین حالت (یعنی قطعی) از داده های ورودی اسـت. از این نمونه های کمّی، اهمیت ارزیابی اثر عدم قطعیت ها و انتشـار آنها به نتایج م شهود ا ست. نکته قابل توجه دیگر این ا ست که عدم تقارن عملکرد توزیع احتمال هزینه سالانه با وجود تقارن متغیرهای ت صادفی ورودی وجود دارد. این امر به دلیل غیرخطی بودن مدل $y = f(x)$ ، نیاز بیشتر برای یک رویکرد احتمالی را تقویت می کند.



شکل ۴ تابع چگالی احتمالی هزینه های سالانه برای سیستم پیشنهادی (سیستم تجدیدپذیر و ذخیره ساز UPS و باتری های لیتیومی)

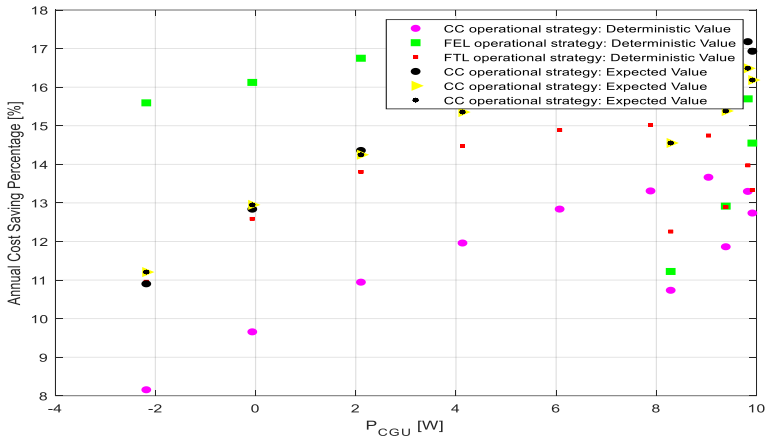


شکل ۵ تابع چگالی احتمالی درصد صرفه جویی هزینه های سالانه برای سیستم پیشنهادی

شکل۶ مقایسه ای بین نتایج قطعی و احتمالی کلیه ا ستراتژی های عملیاتی ارزیابی شده نشان می‌دهد. نتایج احتمالی با ا ستفاده از مقدار مورد انتظار برای هر پیکربندی نشان داده شده است. ذخیره هزینه سالانه انرژی به عنوان تابعی از اندازه CGU بیان شده است. همانطور که قبلاً ا شاره شد ، نتیجه ا صلی اختلاف عددی بین مقادیر قطعی و مورد انتظار برای سیستمی ا ست که متشکل از ذخیره ساز انرژی و شبکه انتقال ا ست. علاوه بر این ، در این مطالعه موردی ، برای هر سه ا ستراتژی عملیاتی، مقدار مورد انتظار ذخیره هزینه سالانه انرژی همیشه پایین تر از مقدار قطعی ا ست و با افزایش اندازه تقا ضا از شبکه، فا صله بین این دو شاخص افزایش می یابد. این روش به و ضوح نشان می دهد که چگونه عدم قطعیت تقا ضا می تواند به طور قابل توجهی ارزیابی عملکرد سیستم انتقال را تحت تأثیر قرار دهد. به طور

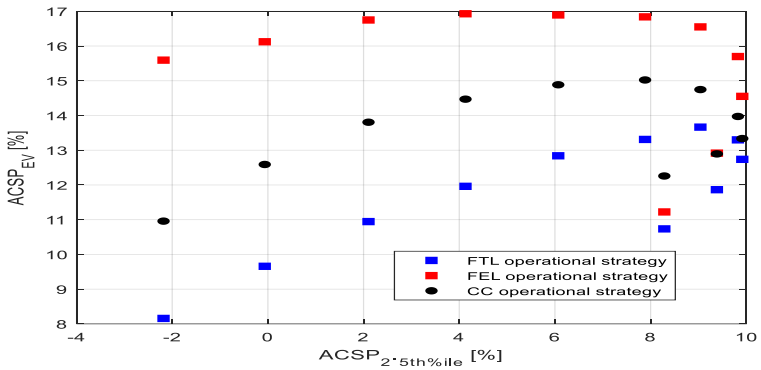
[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-24]

خاص، این نتایج نشان می دهد که رویکردهای قطعی سنتی تمایل به بالا بردن درصد صرفه جویی در هزینه سالانه را دارند. در حقیقت، برای هر سه استراتژی عملیاتی شبیه‌سازی شده، بهترین درصد صرفه جویی در هزینه سالانه، که با استفاده از روش قطعی محاسبه می‌شود، در حدود ۱۰٪ در مقایسه با ارزش مورد انتظار توابع تراکم احتمال بیش از حد ارزیابی می‌شود.



شکل ۶درصد ذخیره هزینه سالانه انرژی برای تمام اندازه های CGU و استراتژی های عملیاتی

شکل۷ مقدار $ACSP_{EV}$ را نسبت به مقادیر $ACSP_{2.5th\%lie}$ برای کلیه اندازه های CGU ارزیابی شده و استراتژی های عملیاتی نشان می دهد. از این نمودار مشخص می شود که برخی جواب ها به وضوح بر سایر جواب های مطلوب تر تسلط دارند و به همین دلیل رد می شوند. همچنین باید توجه داشت که برخی از تنظیمات حتی می توانند در بدترین حالت (صرفه جویی ۲/۵ درصدی) موجب صرفه جویی در هزینه منفی شوند. حاشیه خطا در $ACSP_{EV}$و در مقادیر $ACSP_{2.5th\%lie}$ با سطح اطمینان ۹۵٪ ، به صورت $t_{0.025N}\frac{\sigma(\bar{X})}{\sqrt{N}}$ ارزیابی شده است که σ انحراف اســـتاندارد ، $\bar{X}$نمونه ای از اندازه N یک متغیر تصـــادفی (یعنی $ACSP_{EV}$و $ACSP_{2.5th\%lie}$) و $t_{0.025,N}$، مقدار توزیع t با N درجه آزادی برای ۰/۰۲۵۰احتمال دم را ست ا ست. حداکثر حا شیه مطلق خطا در مقادیر $ACSP_{EV}$و در $ACSP_{2.5th\%lie}$به ترتیب برابر ۰/۰۲۵٪ و ۰/۱۴۱٪ است.



شکل ۷ مقادیر $ACSP_{EV}$ و $ACSP_{2.5th\%lie}$ برای تمام اندازه های CGU و استراتژی های عملیاتی

در این بخش جهت تولید توان از ذخیره ســازهای انرژی در کنار محرکه های انرژی تجدیدپذیر با توان خروجی ۳۵۰ کیلووات و بازدهی ۳۱ در صد و توان خروجی ۱۰۰ کیلووات با بازدهی ۲۹ در صد ا ستفاده به‌عمل آمد. طبق رابطه ۵ پرداخت بابت سوخت م صرفی را معادل ۱۷۵ ریال به ازای یک متر مکعب برق مصرفی در نظر گرفته می‌شود.

$$F_e^{sp} = \frac{E_{grid}^{sp}}{\eta_e^{sp}\eta_{grid}} \quad (۵)$$

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-24]

که F_e^{sp} مصرف انرژی سوخت واحد برق بیمارستان (kwh) و η_e^{sp} و η_{grid} به ترتیب بازدهی تولید برق و بازدهی شبکه توزیع می باشد.

جدول ۵ مقادیر هزینه (Cost)، صرفه جویی انرژی(PEC) و فاکتور عملکردی(PFI) مربوط به تبادل انرژی های تجدیدپذیر و ذخیره سازهای ترکیبی

	PEC[۲] (KWh/years)	COST (Rials/years)	PFI[۱]
مرجع	3.46×10^6	2.12×10^8	-
FEL[۳]	3.07×10^6	2.03×10^8	2.48
FTL[۴]	3.32×10^6	9.7×10^7	2.17
FEL − peo	2.99×10^6	1.98×10^8	2.42
FTL − peo	3.14×10^6	1.26×10^8	2.23
FEL − oco	3.01×10^6	1.95×10^8	2.48
FTL − oco	3.32×10^6	9.7×10^8	2.17
FEL − ero	2.99×10^6	1.98×10^8	2.42
FTL − ero	3.14×10^6	1.26×10^8	2.23

جدول ۶ میزان انتشار آلاینده (CDE) در سال مربوط به تبادل انرژی های تجدیدپذیر و ذخیره سازهای ترکیبی

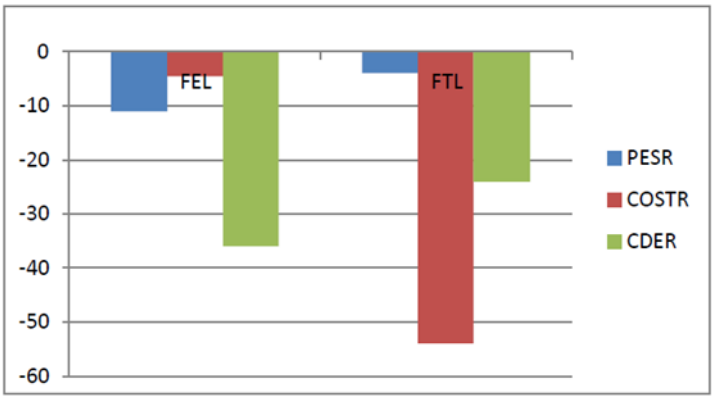
	CDE[۵] (tons/years)
مرجع	1058
FEL[۶]	670
FTL[۷]	804
FEL − peo	675
FTL − peo	780
FEL − oco	739
FTL − oco	804
FEL − ero	675
FTL − ero	780

در ادامه در شکل های ۸ تا ۱۱ نتایج تغییرات PEC، COST و CDE نسبت به حالت مرجع در ا ستراتژی های FTL و FEL ارائه شده است. لازم به ذکر است که به منظور مقایسه دقیق تر و قابل درک تر، از نمودارهای میله ای اکسل استفاده شده است. برای این کار نتایج

[1] performance factor indicator
[2] primary energy consumption
[3] following the electric load
[4] following the thermal load
[5] carbon dioxide emissions
[6] following the electric load
[7] following the thermal load

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-24]

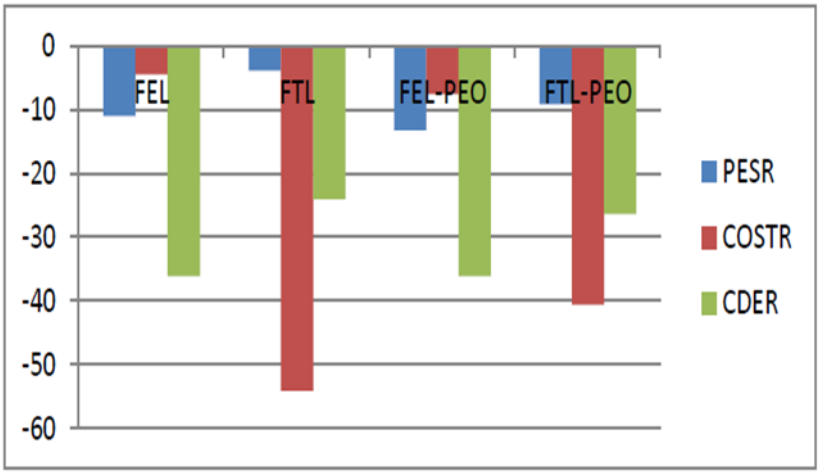
حاصل از شبیه سازی در نرم افزار متلب در قالب ماتریس های خروجی، وارد نرم افزار اکسل شده و در آنجا به کمک نمودار میله ای ترسیم شده اند.



شکل ۸ تغییرات PEC، COST و CDE نسبت به حالت مرجع در استراتژی های FTL و FEL

از شکل ۸ مشاهده می شود که میزان صرفه جویی انرژی (PECدر استراتژی FEL ، کاهشی برابر با۱۱/۰۶درصد نسبت به حالت مرجع دارند و در ا ستراتژی FTL به میزان ۴ در صد نسبت به حالت مرجع افزایش یافته ا ست. همچنین هزینه عملکردی در ا ستراتژیهای FEL، ۴/۶ درصد نسبت به حالت مرجع کاهش یافته است. در حالیکه در استراتژی FTL کاهشی برابر با ۵۴ درصد دارد. از طرفی میزان نشر دی اکسید کربن استراتژی های FTL FEL به ترتیب کاهشی برابر با ۳۶/۰۵ درصد، ۲۴ درصد نسبت به حالت مرجع دارند.

در کل برای منطقه مورد مطالعه اسـتراتژی FTL عملکرد بهتری نسـبت به اسـتراتژی FEL دارد و همچنین برق فروخته شـده به شـبکه درآمدی معادل با ۹۲/۵ میلیون ریال را در پی دارد که این میزان برق فروخته شده به شبکه ۲۸ درصد میزان PEC را افزایش داده است.

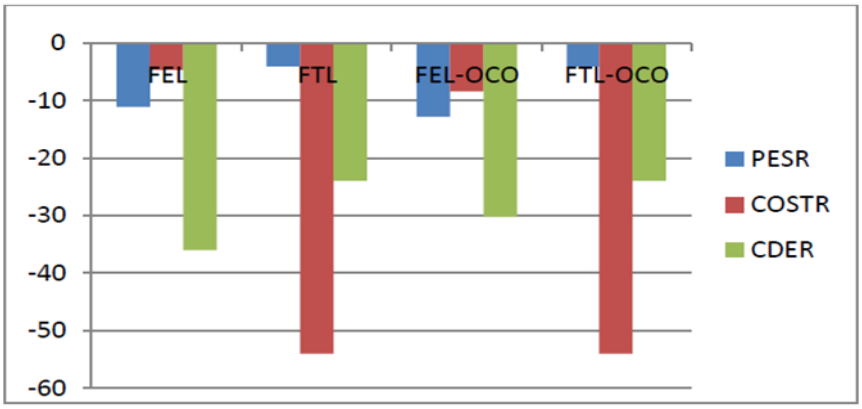


شکل ۹ تغییرات PEC، COST و CDE نسبت به حالت مرجع در استراتژی های FTL و FEL با هدف حداقل کردن انرژی مصرفی

شـکل ۹ تغییرات متغیرهای PEC، COST و CDE را نسـبت به حالت مرجع در اسـتراتژیهای FTL وFEL با هدف حداقل نمودن انرژی مصـرفی نشـان میدهد. همچنین میزان صـرفه جویی انرژی (PECدر اسـتراتژی FEL- peo و FTL -peo به ترتیب کاهشـی برابر با ۱۳/۳۵در صد و ۹/۱۱ در صد نسبت به حالت مرجع دارند. همچنین هزینه عملکردی در ا ستراتژی های FEL-peo و FTL-peo به ترتیب کاهشی برابر با ۱۳/۳۵ درصد و ۹/۱۱ درصد نسبت به حالت مرجع دارند. از طرف دیگر میزان نشر دی اکسید کربن استراتژیهای FEL-peo

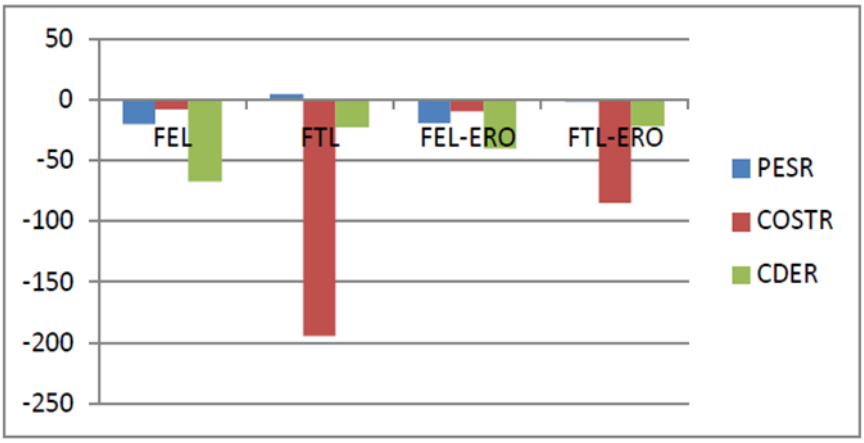
[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-24]

و FTL-peo به ترتیب کاهشی برابر با ۳۶/۲۳ در صد و۲۶/۲۷ در صد نسبت به حالت مرجع دارند. استراتژی FEL با هدف حداقل نمودن سوخت مصرفی اولیه، عملکرد بهتری نسبت به استراتژی FEL به دلیل کاهش سوخت مصرفی، هزینه عملکردی و نشر دی اکسید کربن دارند.



شکل ۱۰ تغییرات PEC، COST و CDE نسبت به حالت مرجع در استراتژی های FTL و FEL با هدف حداقل کردن هزینه سرمایه گذاری و انتشار الاینده

شکل ۱۰ تغییرات متغیرهای PEC، COST و CDE را نسبت به حالت مرجع در استراتژیهای FTL و FEL با هدف حداقل نمودن هزینه سرمایه گذاری را نشان میدهد. میزان صرفه جویی انرژی (PECدر استراتژی FEL- oco و FTL -oco به ترتیب کاهشی برابر با ۱۲/۸۴ در صد و ۴ در صد نسبت به حالت مرجع دارند. هزینه عملکردی در استراتژی های FEL- oco و FTL - oco به ترتیب کاهشی برابر با ۸,۴۲درصد و ۵۴ درصد نسبت به درصد مرجع دارند. همچنین میزان نشر دی اکسید کربن استراتژیهای FEL-oco و FTL-oco به ترتیب کاهشی برابر با ۳۰/۱۴ درصد، و ۲۴ درصد نسبت به حالت مرجع دارند.



شکل ۱۱ تغییرات PEC، COST و CDE نسبت به حالت مرجع در استراتژی های FTL و FEL با هدف حداقل کردن انتشار دی اکسید کربن

شکل ۱۱تغییرات متغیرهای PEC، Cost و CDE را نسبت به حالت مرجع در استراتژیهای FTL و FEL با هدف حداقل نمودن نشر دی اکسید کربن نشان میدهد.

۴- نتیجه گیری و پیشنهادات

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-24]

در این مطالعه، الگوریتم جدیدی بر پایه روش بهینه سازی نهنگ جهت حل م سئله بهره برداری اقت صادی انرژی خور شیدی ارائه گردیده است. براساس روابط پخش انرژی در سیستم انرژی های تجدیدپذیر ظرفیت و شرایط عملکرد بهینه آن توسط الگوریتم بهینه سازی نهنگ تعیین گردید. به دلیل حساسیت طرح به قیمت حامل های انرژی، عملکرد طرح در برابر تغییرات قیمت گاز، قیمت خرید برق از شبکه، قیمت فروش برق به شبکه و تغییرات همزمان قیمت گاز و قیمت خرید برق از شبکه مورد بررسی قرار گرفت. همچنین سیستم انرژی های تجدیدپذیر می تواند به صورت تامین انرژی با اولویت تامین برق (FEL)یا به صورت تامین انرژی با اولویت تامین حرارت (FTL) یا به صورت تامین انرژی بصورت ترکیبی از تامین برق و تامین حرارت مورد بهره برداری قرار گیرد. مطالعه موردی برای بیمارستان نمونه و تانک ذخیره انرژی انجام گردید. سپس با ارزیابی اقتصادی، قیمت تمام شده تولید برق محرکهای اولیه در استراتژی های مختلف FEL وFTL تعیین گردید . نتایج ن شان دهنده آن ا ست که سی ستم با محرک اولیه موتور گاز سوز و ذخیره ساز انرژی خور شیدی، اقت صادی تر است. نتایج نشان می دهد که میزان صرفه جویی انرژی (PEC) در استراتژی FEL ، کاهشی برابر با ۱۱/۰۶ درصد نسبت به حالت مرجع دارند و در ا ستراتژی FTL به میزان ۴ در صد ن سبت به حالت مرجع افزایش یافته ا ست. همچنین هزینه عملکردی در ا ستراتژیهای FEL، ۴/۶ درصد نسبت به حالت مرجع کاهش یافته است. در حالیکه در استراتژی FTL کاهشی برابر با ۵۴ درصد دارد. از طرفی میزان نشر دی اکسید کربن ا ستراتژی های FTL FEL به ترتیب کاهشی برابر با ۳۶/۰۵ در صد، ۲۴ در صد ن سبت به حالت مرجع دارند. همچنین میزان صرفه جویی انرژی (PEC) در استراتژی FEL- peo و FTL -peo به ترتیب کاهشی برابر با ۱۳/۳۵ درصد و ۹/۱۱ درصد نسبت به حالت مرجع دارند. همچنین هزینه عملکردی در ا ستراتژی های FEL-peo و FTL-peo به ترتیب کاهشی برابر با ۱۳/۳۵ در صد و ۹/۱۱ در صد ن سبت به حالت مرجع دارند. از طرف دیگر میزان ن شر دی اک سید کربن ا ستراتژیهای FEL-peo و FTL-peo به ترتیب کاه شی برابر با ۳۶/۲۳ در صد و ۲۶/۲۷در صد ن سبت به حالت مرجع دارند. ا ستراتژی FEL با هدف حداقل نمودن سوخت م صرفی اولیه، عملکرد بهتری ن سبت به ا ستراتژی FEL به دلیل کاهش سوخت م صرفی، هزینه عملکردی و ن شر دی اک سید کربن دارند. . میزان صرفه جویی انرژی (PEC) در ا ستراتژی FEL- oco و FTL -oco به ترتیب کاه شی برابر با ۱۲/۸۴ در صد و ۴ در صد ن سبت به حالت مرجع دارند. هزینه عملکردی در ا ستراتژی های FEL- oco و FTL - oco به ترتیب کاه شی برابر با ۸,۴۲در صد و ۵۴ در صد ن سبت به حالت مرجع دارند. همچنین میزان نشر دی درصددد کربن استراتژیهای FEL-oco و FTL-oco به ترتیب کاهشی برابر با ۳۰/۱۴ درصد، و ۲۴ درصد نسبت به حالت مرجع دارند. با توجه به اینکه نتایج حاصل از این مدل هم در زمینه مصرف انرژی، هم در زمینه هزینه سرمایه گذاری و هم کاهش آلاینده کارایی دارد، می‌توان در صنایع مختلف از آن بطور عملی استفاده نمود، و این مدل از کاربرد بالایی برخوردار است.

دستگاه های ذخیره سازی انرژی الکتریکی برای سیستم های انرژی به منظور بهبود کیفیت خدمات ، کمک به کنترل فرکانس اولیه و ثانویه برای افزایش پایداری شبکه ، هموار سازی نوسانات توان در پروفایل های تولید برای ادغام بهتر منابع انرژی تجدیدپذیر (RES) و ارتقا م شارکت کاربران بالاتر در مدیریت تقا ضا از طریق تغییر زمان م صرف انرژی مورد ا ستفاده قرار می گیرند. با توجه به نقش موثر این د ستگاهها در برقراری انعطاف پذیری شبکه، بخ صوص در شرایط بحران، میتوان در صورت قطعی برق و یا قطع ارتباط با شبکه ا صلی، تقاضای بار را از طریق این دستگاه ها تامین نمود. بطور کلی، عدم قطعیت ناشی از تابش و نوسانات قدرت در سیستم های انرزی خورشیدی امری بدیهی است. این نوع چارچوب یک سری زمانی با تغییرات تصادفی جزئی حول میانگین یا توان تقاضا تولید می کند. علاوه بر این، مدل‌ها یک تغییر سریع در مقدار میانگین را برای تقلید از رویدادهای دنیای واقعی که در آن این پارامترها به طور قابل‌توجهی متفاوت هستند، فراهم می‌کنند. به دلیل تغییر غیرمنتظره در مقدار پایه همراه با نوسانات تصادفی، منشاء چنین رفتار ناشناخته ای در تولید و تقا ضای برق را می توان در قالب یک سان با پارامترهای متفاوت طراحی کرد. ا ستفاده از د ستگاه های ذخیره هیبریدی این امکان را فراهم میکند تا سیستم مدیریت انرزی به راحتی تصمیم بگیرد انرژی را به ذخیره ساز بفرستد و یا تقاضای بار را پاسخ دهد. بر این اساس استفاده از این ذخیره سازها در شرایط غیرقطعی بودن میزان انرزی خورشیدی میتواند کمک شایانی در زمینه بهبود کیفیت توان و ولتاژ داشته باشد. با توجه به نقش مؤثر دستگاه های ذخیره¬سازی انرژی الکتریکی در برقراری انعطاف پذیری شبکه، در صورتی که ظرفیت و مکان

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-24]

دستگاه‌های ذخیره انرژی الکتریکی اشتباه انتخاب شده باشد و یا در مکان اشتباهی قرار گیرد ، می‌تواند از نظر مسائل فنی، نتایج منفی‌ای را به همراه داشته باشد و حتی منجر به پیامدهای اقتصادی و فنی نامطلوبی برای شبکه شود. لذا با بهره گیری از الگوریتم های فراابتکاری و بر اساس پروفیل تقاضای بار و ولتاژ، میتوان مکان دقیقی برای این دستگاه ها درنظر گرفت. همانطور که نتایج نشان داد، میزان صرفه جویی انرژی (PEC) در استراتژی FEL ، کاهشی برابر با ۱۱/۰۶درصد نسبت به حالت مرجع دارند و در استراتژی FTL به میزان ۴ درصد نسبت به حالت مرجع افزایش یافته است. همچنین هزینه عملکردی در استراتژیهای FEL، ۴/۶ درصد نسبت به حالت مرجع کاهش یافته ا ست. در حالیکه در ا ستراتژی FTL کاه شی برابر با ۵۴ در صد دارد. از طرفی میزان ن شر دی اک سید کربن ا ستراتژی های FTL و FEL به ترتیب کاه شی برابر با ۳۶/۰۵ در صد و ۲۴ در صد ن سبت به حالت مرجع دارند. الگوریتم نهنگ یک الگوریتم کامل و بر گرفته از طبیعت است. این الگوریتم با تعیین توابع هدف و محدودیت های آن قادر است مکان و ظرفیت ذخیره سازها را بهینه نماید. با توجه به مطالعات و تحقیقات صورت گرفته و شناخت مسائل موجود در زمینه تخصیص بهینه ظرفیت باتری ذخیره انرژی خورشیدی، برای ادامه کار پیشنهاداتی در نظر گرفته شده است.

افزودن قیود دیگر از قبیل نرخ افزایش و کاهش توان و یا تعریف شاخص های قابلیت اطمینان انرژی های تجدیدپذیر

بهبود و توسعه مدل منابع تولید پراکنده به خصوص توربین بادی و سلول خورشیدی و افزودن عوامل موثر به آنها.

افزودن توپولوژی شبکه و برر سی تغییرات ظرفیت بهینه با در نظر گرفتن شاخص های کیفیت توان و تلفات دقیق شبکه و یا برر سی همزمان جایابی بهینه و ظرفیت بهینه در ساختار شبکه مورد مطالعه

حرکت به سوی مدل سازی شبکه هو شمند و مطالعه ظرفیت بهینه در ح ضور مدل های مختلف بار مانند بارهای قابل قطع و سایر المان ها و ویژگی های شبکه هوشمند

منابع

[۱] شکرزاده، رضا، سخاوتی، آیدین، مرادزاده، آرش، ۱۳۹۷، بررسی ایجاد سیستم ذخیره کننده انرژی باتری – ابرخازن (HESS) برای ذخیره انرژی تولید شده توسط سیستم های تجدیدپذیر در مناطق دور، دومین کنفرانس ملی پژوهش های نوین در برق، کامپیوتر و مهندسی پزشکی

[۲] خرم دل، مهرداد و سلیمی، احد،۱۳۹۸، مکان یابی بهینه ذخیره سازهای انرژی در مواجهه با عدم قطعیت‌های شبکه جهت کاهش هزینه‌های بهره برداری، سومین همایش ملی دانش و فناوری مهندسی برق، کامپیوتر و مکانیک ایران

[۳] خزعلی، مجید، آذرسینا، فرهود، ملاعلی کنی، علیرضا، ۱۴۰۱، بررسی تحلیل انرژی و ارزیابی سیستم نوین ترکیبی ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده و تلمبه ذخیره‌ای، ماهنامه علمی مهندسی مکانیک مدرس، دوره ۲۲، شماره ۰۴، فروردین ۱۴۰۱.

[۴] علیزاده، محمد و جعفری نوکندی، میثم و سلطان مرادی، یامین، ۱۳۹۸، مدلسازی و بهینه سازی مصرف انرژی در خانه هوشمند با حضور ذخیره‌ساز انرژی، سلول خورشیدی، خودروی برقی و پاسخ‌گویی بار، فصلنامه مدلسازی در مهندسی، دوره: ۱۷، شماره: ۵۷

[۵] کریم زاد بارنج، علی و مهدوی طباطبایی، نا صر و حاتمی، حجت،۱۳۹۹، برنامه ریزی بهینه ذخیره سازهای انرژی وتولیدات پراکنده در شبکه‌های توزیع فعال با در نظر گرفتن تکنولوژی‌های مختلف باتری، ششمین کنفرانس ملی پژوهش‌های کاربردی در مهندسی برق، مکانیک و مکاترونیک، تهران

[۶] کریمی، تورج، شهسواری، زهرا، بهرامی، مجتبی، ۱۴۰۰، بررسی سنجش ظرفیت جذب تکنولوژی ذخیره سازی انرژی خورشیدی به کمک نظریه سیستم های خاکستری، فصلنامه مطالعات اقتصاد انرژی، سال هفدهم، شماره ۶۸، بهار ۱۴۰۰، صفحات ۲۲۷-۲۵۳.

[۷] موسوی تقی آبادی، محمدرضا و پورحسین، جواد و قره شیر، حسین،۱۳۹۹، ارائه یک مدل جدید برنامه ریزی انرژی و ذخیره با در نظر گرفتن قیود فرکانسی در حضور نیروگاه‌های تجدید پذیر و ذخیره سازهای هوای فشرده، هفتمین کنگره ملی تازه یافته‌های مهندسی برق ایران، تهران

[8] Alzahrani, A., Alharthi, H., & Khalid, M. (2020). Minimization of Power Losses through Optimal Battery Placement in a Distributed Network with High Penetration of Photovoltaics. Energies, 13(1), 140.

[9] Das, C. K., Bass, O., Kothapalli, G., Mahmoud, T. S., & Habibi, D. (2018). Overview of energy storage systems in distribution networks: Placement, sizing, operation, and power quality. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 91,1205-1230

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-24]

[10] Dong, C., Huang, G. H., Cai, Y. P., & Liu, Y. (2013). Robust planning of energy management systems with environmental and constraint-conservative considerations under multiple uncertainties. Energy Conversion and Management, 65, 471-486.

[11]Gharehchopogh, F. S., & Gholizadeh, H. (2019). A comprehensive survey: Whale Optimization Algorithm and its applications. Swarm and Evolutionary Computation, 48, 1-24.

[12]Gissey, G. C., Dodds, P. E., & Radcliffe, J. (2018). Market and regulatory barriers to electrical energy storage innovation. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 82, 781-790.

[13] Hajiaghasi, S., Salemnia, A., & Hamzeh, M. (2019). Hybrid energy storage system for microgrids applications: A review. Journal of Energy Storage, 21, 543-570.

[14]Javadi, M. S., Firuzi, K., Rezanejad, M., Lotfi, M., Gough, M., & Catalão, J. P. (2020, October). Optimal Sizing and Siting of Electrical Energy Storage Devices for Smart Grids Considering Time-of-Use Programs. In IECON 2020-45th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (Vol. 1, pp. 4157-4162). IEEE.

[15]Jumaat, S. A., Musirin, I., Murtadha, O. M., & Mokhlis, H. (2011, June). PSO based technique for loss minimization considering voltage profile and cost function. In 2011 5th International Power Engineering and Optimization Conference (pp. 36-41). IEEE

[16]Kalinci, Y., Hepbasli, A., & Dincer, I. (2015). Techno-economic analysis of a stand-alone hybrid renewable energy system with hydrogen production and storage options. International Journal of Hydrogen Energy, 40(24), 7652-7664.

[17]Khosravi, A., Koury, R. N. N., Machado, L., & Pabon, J. J. G. (2018). Energy, exergy and economic analysis of a hybrid renewable energy with hydrogen storage system. Energy, 148, 1087-1102.

[18]Kumar, A., Meena, N. K., Singh, A. R., Deng, Y., He, X., Bansal, R. C., & Kumar, P. (2019). Strategic integration of battery energy storage systems with the provision of distributed ancillary services in active distribution systems. Applied Energy, 253, 113503.

[19]Kumar D, Samantaray SR. Optimal integral planning of primary-secondary distribution networks via MOEA. In2015 IEEE Power, Communication and Information Technology Conference (PCITC) 2015 Oct 15 (pp. 95-100). IEEE.

[20]Lata, P., & Vadhera, S. (2020). Reliability Improvement of Radial Distribution System by Optimal Placement and Sizing of Energy Storage System using TLBO. Journal of Energy Storage, 30, 101492.

[21]Livera, A., Theristis, M., Makrides, G., & Georghiou, G. E. (2019). Recent advances in failure diagnosis techniques based on performance data analysis for grid-connected photovoltaic systems. Renewable energy, 133, 126-143.

[22]]Liu, X. K., Li, P. Q., Zhang, Z. K., & Zen, J. J. (2023). Location and Capacity Determination of Energy Storage System Based on Improved Whale Optimization Algorithm. J. Netw. Intell, 8, 35-46.

[23]Mazza, A., Mirtaheri, H., Chicco, G., Russo, A., & Fantino, M. (2020). Location and Sizing of Battery Energy Storage Units in Low Voltage Distribution Networks. Energies13(1), 52.

[24]]Sun, H., Ebadi, A. G., Toughani, M., Nowdeh, S. A., Naderipour, A., & Abdullah, A. (2022). Designing framework of hybrid photovoltaic-biowaste energy system with hydrogen storage considering economic and technical indices using whale optimization algorithm. Energy, 238, 121555.

[25]Tummuru, N. R., Manandhar, U., Ukil, A., Gooi, H. B., Kollimalla, S. K., & Naidu, S. (2019). Control strategy for AC-DC microgrid with hybrid energy storage under different operating modes. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 104, 807-816.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-24]

نشریه علمی (فصلنامه) «انرژی ایران»
دوره ۲۸، شماره۲، تابستان ۱۴۰۴، صفحه ۱۰-۲۷

Analysis and investigation of solar energy with hybrid storage

Shayan Jafarimarandi[1], Masoud Torabi Azad[2*], Gholamreza Salehi[3]

1-M.Sc Energy System Engineering Department, NT.C., Islamic Azad University, Tehran, Iran

2*-Prof., NT.C., Islamic Azad University, Tehran, Iran(Correspnding Author M_Azad@Iau.ac.ir)

3-Mechanical Engineering Department, CT.C., Islamic Azad University, Tehran, Iran

Abstract:

Considering the role of solar energy and hybrid energy storage systems in improving electrical energy supply, this study introduces a new algorithm based on the whale optimization algorithm to solve the economic dispatch problem of solar energy under two different priority strategies: First Electric Load (FEL) and First Thermal Load (FTL). The results show that the energy savings (PEC) in the FEL strategy have decreased by 11.06% compared to the reference case, and in the FTL strategy, it has increased by 4%. Furthermore, the operational cost in the FEL strategies has decreased by 4.6% compared to the reference case, while in the FTL strategy, it has decreased by 54%. Additionally, the carbon dioxide emissions in the FTL and FEL strategies have decreased by 36.05% and 24%, respectively, compared to the reference case. Moreover, the energy savings (PEC) in the FTL and FEL strategies have decreased by 13.35% and 9.11%, respectively, compared to the reference case. Furthermore, the operational cost in the FTL and FEL strategies has decreased by 13.35% and 9.11%, respectively, compared to the reference case. On the other hand, the carbon dioxide emissions in the FTL and FEL strategies have decreased by 36.23% and 26.27%, respectively, compared to the reference case. The FEL strategy, aiming to minimize initial fuel consumption, has better performance than the FTL strategy due to reduced fuel consumption, operational cost, and carbon dioxide emissions. The energy savings (PEC) in the FTL and FEL strategies have decreased by 12.84% and 4%, respectively, compared to the reference case. The operational cost in the FTL and FEL strategies has decreased by 8.42% and 54%, respectively, compared to the reference case. Additionally, the carbon dioxide emissions in the FTL and FEL strategies have decreased by 30.14% and 24%, respectively, compared to the reference case.

Keywords: Energy storage, Energy management system, Renewable Energy, Solar Energy, Whale optimization algorithm

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-24]