

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

شایان جعفری مرندي

دانش آموخته کارشناسی ارشد مهندسی سیستم های انرژی، واحد تهران شمال، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

مسعود ترابی آزاد\*

استاد، واحد تهران شمال، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران (عهده دار مکاتبات) M\_Azad@iau-tnb.ac.ir

غلامرضا صالحی

دانشیار، واحد تهران مرکز، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

### چکیده

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

با توجه به نقش انرژی های خورشیدی و ذخیره سازهای هیبریدی انرژی الکتریکی در بهبود تامین انرژی الکتریکی، در این مطالعه، الگوریتم جدیدی بر پایه روش بهینه سازی نهنگ جهت حل مسئله بهره برداری اقتصادی انرژی خورشیدی تحت دو استراتژی مختلف اولویت تامین برق (FEL) و اولویت تامین حرارت (FTL) ارائه گردیده است. نتایج نشان می دهد که میزان صرفه جویی انرژی (PEC) در استراتژی FEL، کاهش برابر با ۱۱/۰۶ درصد 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 است. در حالیکه در استراتژی FTL کاهش برابر با ۵۴ درصد دارد. از طرفی میزان نشر دی اکسید کربن استراتژی های FTL FEL به ترتیب کاهش برابر با ۳۶/۰۵ درصد، ۲۴ درصد نسبت به حالت مرجع دارند. میزان صرفه جویی انرژی (PEC) در استراتژی FEL-peo و FTL-peo به ترتیب کاهش برابر با ۱۳/۳۵ درصد و ۹/۱۱ درصد نسبت به حالت مرجع دارند. همچنین هزینه عملکردی در استراتژی های FEL-peo و FTL-peo به ترتیب کاهش 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 و FTL-peo به ترتیب کاهش برابر با ۳۶/۲۳ درصد و ۲۶/۲۷ درصد 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. میزان صرفه جویی انرژی (PEC) در استراتژی FEL-oco و FTL-oco به ترتیب کاهش برابر با ۱۲/۸۴ درصد و ۴ درصد نسبت به حالت مرجع دارند.

## ۱ مقدمه

منابع انرژی تجدیدپذیر نظیر انرژی خورشیدی و باد، به دلیل رایگان بودن و فراوانی جغرافیایی دارای قابلیت های بالایی در تولید برق می باشند. نیروگاه های خورشیدی مناسب ترین فناوریهای تجدیدپذیر برای تولید و ذخیره الکتریسیته بوده و نصب آنها به سرعت در حال افزایش است. با توجه به روند رو به رشد استفاده از منابع انرژی های تجدیدپذیر در شبکه های توزیع، به دلیل ماهیت تصادفی و عدم قطعیت در تولید توان خروجی قابلیت اطمینان شبکه تحت تأثیر قرار می گیرد. 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 داشته باشد. عملکرد سیستم های ذخیره ساز انرژی در مواقعی که میزان عرضه برق بیشتر از تقاضا است، مازاد تولید را ذخیره می کنند و در مواقعی که میزان تقاضا از عرضه بیشتر می شود، برق ذخیره شده را برای ایجاد تعادل در شبکه عرضه می کنند.

انعطاف پذیری شبکه های توزیع، موضوعی است که با تکامل این شبکه ها 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) استفاده می کنند که بصورت متناوب می باشد و به آنها این امکان را می دهد تا نقش فعالانه و پویاتری در مصرف و تولید برق داشته باشند. در این بین، دستگاه های ذخیره انرژی الکتریکی نقش به سزایی در افزایش انعطاف پذیری شبکه خواهند داشت (Javadi et al. 2019). اصطلاح "ذخیره انرژی الکتریکی" شامل تعداد قابل توجهی از فناوری های متنوع است که هدف آنها ذخیره انرژی و سپس انتشار آن به صورت الکتریسیته می باشد (Gissey et al. 2018). دستگاه های معمولی ذخیره انرژی الکتریکی (نظیر UPS ها) در سیستم های تامین کننده انرژی الکتریکی به منظور بهبود کیفیت توان تولیدی، کمک به کنترل فرکانس اولیه و ثانویه در راستای افزایش پایداری شبکه، هموارسازی نوسانات توان در پروفایل های تولیدی و ادغام بهتر منابع انرژی تجدیدپذیر و ارتقا مشارکت کاربران در مدیریت تقاضا از طریق تغییر زمان مصرف انرژی مورد استفاده قرار می گیرند (Mazza et al. 2020). با توجه به نقش مؤثر این دستگاه ها در برقراری انعطاف پذیری شبکه، در صورتی که ظرفیت دستگاه های ذخیره انرژی الکتریکی اشتباه انتخاب شده باشد و یا در مکان اشتباهی قرار گیرد، می تواند از نظر مسائل فنی، نتایج منفی ای را به همراه داشته باشد 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، می توانند 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 سازی ترکیبی برای انرژی های تجدیدپذیر الکتریکی (HOMER) برای تعریف اندازه بهینه تجهیزات بر اساس داده های جغرافیایی و هواشناسی منطقه مورد مطالعه استفاده شد. این مطالعه دو سناریو را در نظر می گیرد که فقط توربین بادی و سیستم های هیبریدی توربین بادی/PV هستند. استفاده از توربین بادی/سیستم آرایه PV، به جای تنها توربین بادی، NPC را از ۱۴۶۲۴،۳۴۳ دلار به ۱۱،۹۶۰،۶۹۸ دلار کاهش می دهد. همچنین ظرفیت مخزن هیدروژن را به ۴۰۰ کیلوگرم کاهش می دهد.

خسروی و همکاران (۲۰۱۸) در مقاله ای به تجزیه و تحلیل انرژی، انرژی 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 انرژی PV برای بازده انرژی و انرژی به ترتیب میانگین ۱۲٪ و ۱۶٪ گزارش شده است. میانگین راندمان انرژی و انرژی 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 می شود.

کومار و همکاران (۲۰۱۹) به بررسی ادغام استراتژیک سیستم های ذخیره انرژی باتری با ارائه خدمات جانبی توزیع شده در سیستم های توزیع فعال پرداختند. در این مقاله، یک چارچوب بهینه سازی دو سطحی جهت تخصیص بهینه واحدهای تولید انرژی باد و سیستم های

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. تاملاریا و همکاران (۲۰۱۹) در پژوهشی به بررسی استراتژی کنترلی برای ریزشیکه 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 می شود.

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 می دهد. 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 می کند. همچنین از شبکه شعاعی ۳۰ با سه استاندارد جهت تجزیه و تحلیل داده ها استفاده شده است. نتایج نشان می دهد 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 در نظر گیری 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 بهبود یافته پرداختند. در این پژوهش از الگوریتم بهینه سازی نهنگ بهبود یافته استفاده شده. نتایج نشان داده که مکان یابی سیستم های ذخیره سازی انرژی و نتایج تعیین ظرفیت حل شده توسط این الگوریتم می تواند به ذخیره سازی انرژی متصل شود و در نتیجه نوسان های ولتاژ و تلفات شبکه توان فعال سیستم را کاهش دهد، اثر کاری تولید انرژی جدید را بهبود بخشد و تاثیر نوسان های برق بر روی سیستم را کمتر نماید. سان و همکاران (۲۰۲۲) در پژوهشی به طراحی چارچوب سیستم هیبریدی انرژی فوتوولتائیک-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 می شود.

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 می باشد.

خرم دل و سلیمی (۱۳۹۸) به مکان یابی بهینه ذخیره سازهای انرژی در مواجهه با عدم قطعیت های شبکه جهت کاهش هزینه های بهره برداری پرداختند. در این مقاله از روش سیستم ذخیره انرژی به منظور حفظ قابلیت اطمینان در شبکه قدرت استفاده شده است. برای اعتبار سنجی، 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.

علیزاده و همکاران (۱۳۹۸) به مدلسازی و بهینه سازی مصرف انرژی در خانه هوشمند با حضور ذخیره ساز انرژی، سلول خورشیدی، خودروی برقی و پاسخ گویی بار پرداختند. مدل پیشنهادی در برنامه GAMS پیاده سازی شده و نتایج نشان می دهد که استفاده از سیستم های 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 شبکه های توزیع فعال با در نظر گرفتن تکنولوژی های 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 جابجایی، ظرفیت و توان بهینه برای تکنولوژی های مختلف باتری بررسی شده است. نتایج بدست آمده از مقایسه تکنولوژی های 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 برنامه ریزی انرژی و ذخیره با در نظر گرفتن قیود فرکانسی در حضور نیروگاه های تجدیدپذیر و ذخیره سازهای هوای فشرده پرداختند. در مدل پیشنهادی، پس از وقوع پیشامد واحدهای ذخیره ساز به صورت خودکار توان زیادی را به شبکه تزریق می کنند تا از افت فرکانس جلوگیری نمایند. علاوه بر این، 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 تودورووا 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 ذخیره سازی انرژی هوای فشرده و تلمبه ذخیره ای پرداختند. این پژوهش نشان داد نسبت حجم هوا به حجم مخزن فشار بالا بیشترین تاثیر را بر بازدهی سیستم دارد و یک پارامتر تعیین کننده است.

نیروگاههای خورشیدی یکی از پایه ای ترین ابزار تولید انرژی از سوختهای پاک و تجدیدپذیر می باشند که می تواند در قطع استفاده از سوختهای فسیلی در نیروگاههای حرارتی مدنظر قرار گیرد. ذخیره سازی انرژی های خورشیدی به وسیله ذخیره سازها به آسانی اتفاق نمی افتد و نیازمند ارزیابی شاخص ها و عوامل بسیاری می باشد. 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 می تواند علاوه بر امکان کمی سازی شاخص ها 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 می دهد. 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. سیستم های 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 ویژگی های مناسب فناوری های مختلف در راستای ذخیره سازی انرژی های تجدیدپذیر عمل می کنند. انرژی خورشیدی را می توان مستقیماً توسط سلول فتوولتائیک که نوعی دستگاه فتووالکتریک است برداشت 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 می کند.

### ۳. روش تحقیق

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

استاندارد IEEE یعنی مشخصات شبکه ۶۹ باسه IEEE را دریافت نموده و سپس با مدلسازی ریاضی که در بردارنده اهداف اقتصادی و پایداری (فنی) شبکه می باشد، ظرفیت و مکان ذخیره سازهای انرژی را بصورت متغیرهای تصمیم در نظر گرفته و زمان استفاده ToU را به عنوان قید در شبکه در نظر گرفته شد. سپس با استفاده از الگوریتم نهنگ به بهینه سازی مدل ریاضی در نرم افزار متلب پرداخته و نتایج ارائه می شود. این پژوهش به بررسی استفاده از سیستم تلفیقی انرژی های تجدید پذیر انرژی خورشیدی-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 گلخانه ای می پردازد.

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) می باشد. قبل از ارائه مدل ریاضی، فرضیات مساله مطرح می شود. در این سیستم چنانچه توان تولیدی توسط انرژی های نو بیش تر از توان مورد تقاضای 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 می گیرد، 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 توسط سیستم هیبریدی پاسخگوی نیاز مصرف کنندگان نباشد باتری به عنوان منبع پشتیبان در کنار نیروگاه های بادی خورشیدی وظیفه تامین توان مورد نیاز را خواهد داشت. در این حالت باتری در وضعیت دشارژ قرار می گیرد؛ و در صورتی که بار تولیدی از منابع تجدید پذیر کمتر از بار مورد نیاز مصرفی باشد و انرژی باتری کافی نباشد دیزل ژنراتور روشن خواهد شد و بار مصرفی را تامین خواهد کرد. مدل فنی سیستم ترکیبی بادی خورشیدی دیزل شامل چند زیر مدل می باشد که عبارت اند از: مدل توربین بادی، مدل مازول 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 وضعیت ها و اهداف مختلف در ظرفیت ذخیره سازها با استفاده 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 تقاضای 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 است، که شامل هر دو ارزیابی استراتژی های سرمایه گذاری سنتی و بهینه است. در این پژوهش از نرم افزار متلب که نمونه ای از روش های عددی می باشد، استفاده شده است. نرم افزار متلب امکان آسان عملیات ماتریسی، محاسباتی و توبعی، 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 می گیرد. 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 هستند. در مقابل، هنگامی که عملکرد تحت عمل واحد بهینه مورد بررسی قرار گیرد، بهینه سازی استراتژی عملیاتی مبتنی بر الگوریتم نهنگ برای تعیین مدیریت بهینه واحد تولید نیاز است. این روش بهینه سازی با هدف شناسایی، برای هر یک از زمان های شبیه

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 (WOA) یک الگوریتم بهینه سازی مبتنی بر ازدحام است که توسط میرجلیلی و لوئیس در سال ۲۰۱۶ که بر اساس تکنیک مانور شکار حبابدار - نهنگ های عنبر - برای حل مسائل پیچیده بهینه سازی 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 استفاده شود. بنابراین، مساله کلی به ۸۷۶۰ مساله ریزتر تقسیم شده است که برای مساله 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 است. به این ترتیب، اندازه مسئله برای هر سال شبیه سازی شده از  $N_L \times 8760$  به  $N_L \times 7860$  کاهش می یابد، که  $N_L$  تعداد فواصل گسسته ممکن از ضریب بار (L) CGU است.

به منظور پیاده سازی روش پیشنهادی، از یک مطالعه موردی که شامل اطلاعات اولیه مساله می باشد استفاده شده است. مطالعه موردی مساله، یک منطقه مسکونی همراه با زمین های کشاورزی مجاور و یک بیمارستان ۲۰۰۰ تختخوابه است. واحد تولیدی (CGU) در این منطقه شامل یک دیزل ژنراتور، سه پنل خورشیدی و دو توربین بادی است. ظرفیتهای توان الکتریکی اسمی 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 ۱ و ۲ در نظر گرفته می شود:

$$\eta(E, CGU) = \eta(E, CGU, nom) (1.126L - 0.126) \quad (1)$$

$$\eta(H, CGU) = \eta(Q, CGU, nom) (0.8253L + 0.1747) \quad (2)$$

که ضریب بار بصورت  $L = F_{CGU} \cdot \eta_{E,CGU,nom} / P_{CGU}$  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)

$$C_{TL,CGU} = 15460 P_{CGU}^{0.7247}$$

که  $C_{TL,CGU}$  باید بر حسب یورو و توان ( $P_{CGU}$ ) بر حسب کیلووات باشد. طول عمر طراحی CGU برابر با ۲۰ سال در نظر گرفته شده است که این مقدار برای تمام اندازه های مشخص شده یکسان است. این چنین مدت زمان برای پروژه های سیستم تولید، معمولاً قابل قبول است. هزینه نگهداری موتور برای هر واحد کیلووات ساعت الکتریکی

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

$$C_{M.CGU} = \sum_{i=1}^{8760} E_{CGU}^i 0.05604 P_{CGU}^{0.1638} \quad (4)$$

که  $C_{M.CGU}$  باید برحسب یورو،  $E_{CGU}^i$  برحسب کیلووات ساعت و  $P_{CGU}$  برحسب کیلووات باشد. ظرفیت توان اسمی بویلر گاز طبیعی به منظور در نظر گرفتن هر نوع تقاضای حرارتی، برای هر پیکربندی و استراتژی عملیاتی در نظر گرفته شده است که با استفاده 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:

$$c_F = 0.04 \text{ €/kWh}$$

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:

$$c_{PEG} = 0.15 \text{ €/kWh}$$

$$c_{SEG} = 0.05 \text{ €/kWh}$$

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

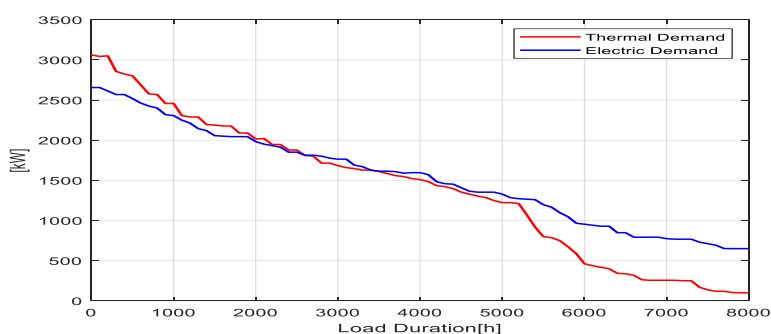
جدول (۲) انرژی الکتریکی مورد نیاز خانگی

| شماره                        | وسایل مورد نیاز | توان مصرفی (W) | تعداد | ساعات کارکرد (H) | مصرف روزانه (Wh/day) |
|------------------------------|-----------------|----------------|-------|------------------|----------------------|
| ۱                            | پنکه سقفی       | ۱۰۰            | ۱     | ۴                | ۴۰۰                  |
| ۲                            | کولر آبی        | 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               |

جدول ۳ انرژی الکتریکی خارج از خانه

| ردیف                    | وسایل کشاورزی            | توان مصرفی (W) | تعداد | زمان استفاده (H) | مصرف روزانه (Wh/day) |
|-------------------------|--------------------------|----------------|-------|------------------|----------------------|
| ۱                       | پمپ آبیاری و مصرفی       | 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  $302560 \text{ Wh/day}$  و  $1294000 \text{ Wh/day}$  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  $20\%$  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

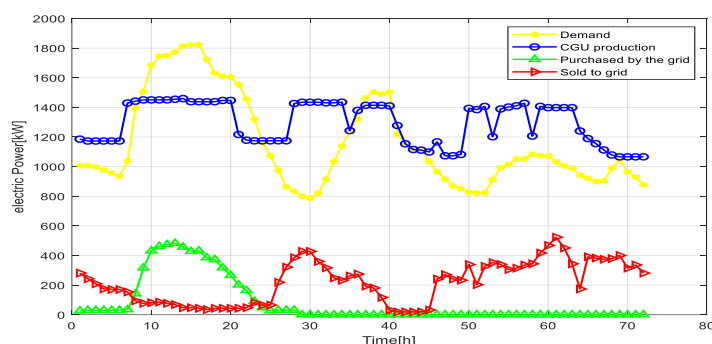


نتایج شبیه سازی برای تمام اندازه های CGU و استراتژی های عملیاتی در این بخش نشان داده شده است. همچنین از داده های اولیه ارائه شده برای مدل توربین بادی، سیستم فوتوولتائیک، ذخیره ساز باتری، و دیزل ژنراتور استفاده شده است. ۱۰۰۰۰ تکرار برای هر ترکیبی از پیکربندی طراحی و استراتژی عملیاتی انجام شد، به طوری 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.

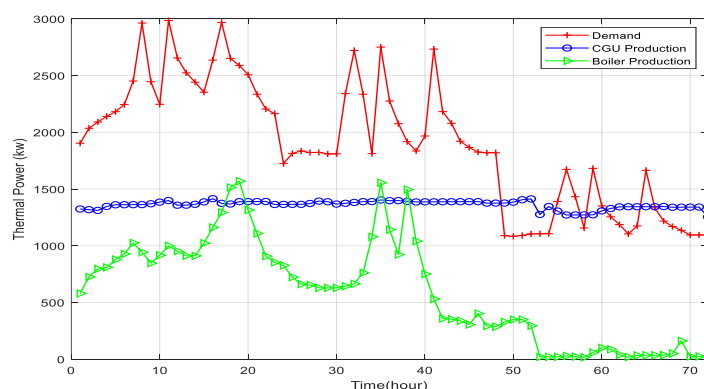
جدول ۴ مشخصات ذخیره سازهای انرژی الکتریکی

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

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 در نظر گیری 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.

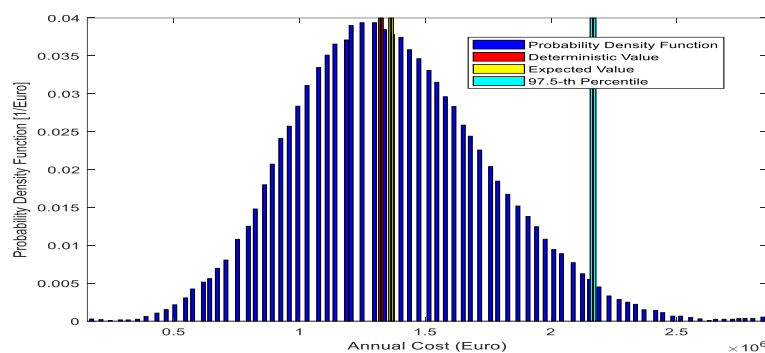


شکل ۲ خروجی توان الکتریکی شبیه سازی شده در سیستم بدون ذخیره ساز UPS و باتری های لیتیومی

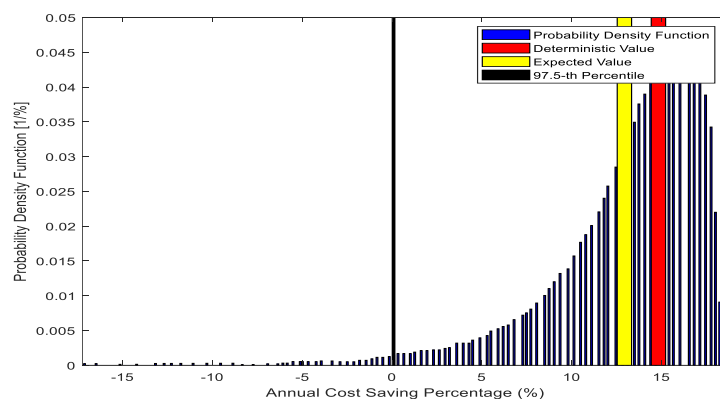


شکل ۳ توان حرارتی خروجی مساله در سیستم بدون ذخیره ساز UPS و باتری های لیتیومی

در شکل های ۴ و ۵، نمونه هایی از نتایج به دست آمده توسط اعمال روش بهینه سازی نهنگ در راستای بهینه سازی برنامه ریزی همزمان توسعه استفاده از انرژی های تجدیدپذیر خورشیدی و بادی و ذخیره سازهای ترکیبی انرژی را نمایش داده شده است. شکل ۵ نمایشی از توابع توزیع احتمال هزینه سالانه است که برای اندازه خاص شبکه انتقال و استراتژی عملیاتی بدست آمده است. در عوض، شکل ۵ نتایج مشابه را در قالب درصد صرفه جویی در هزینه سالانه برای سیستم مورد نظر با در نظرگیری 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 است. از این نمونه های کمی، اهمیت ارزیابی اثر عدم قطعیت ها و انتشار آنها به نتایج مشهود است. نکته قابل توجه دیگر این است که عدم تقارن عملکرد توزیع احتمال هزینه سالانه با وجود تقارن متغیرهای تصادفی ورودی وجود دارد. این امر به دلیل غیرخطی بودن مدل  $y = f(x)$ ، نیاز بیشتر برای یک رویکرد احتمالی را تقویت می کند.



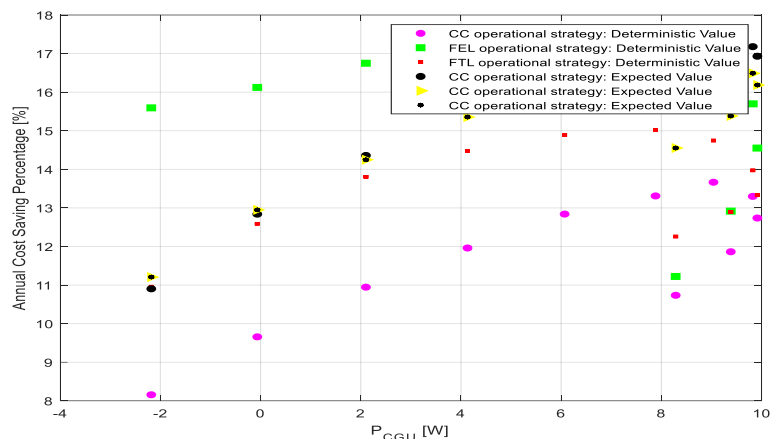
شکل ۴ تابع چگالی احتمالی هزینه های سالانه برای سیستم پیشنهادی (سیستم تجدیدپذیر و ذخیره ساز UPS و باتری های لیتیومی)



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

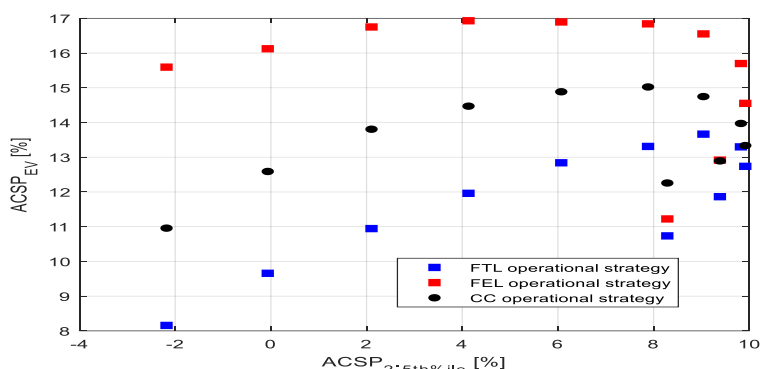
شکل ۶ مقایسه ای بین نتایج قطعی و احتمالی کلیه استراتژی های عملیاتی ارزیابی شده نشان می دهد. نتایج احتمالی با استفاده از مقدار مورد انتظار برای هر پیکربندی نشان داده شده است. ذخیره هزینه سالانه انرژی به عنوان تابعی از اندازه CGU بیان شده است. همانطور که قبلاً اشاره شد، نتیجه اصلی اختلاف عددی بین مقادیر قطعی و مورد انتظار برای سیستمی است که متشکل از ذخیره ساز انرژی و شبکه انتقال است. علاوه بر این، در این مطالعه موردی، برای هر سه استراتژی عملیاتی، مقدار مورد انتظار ذخیره هزینه سالانه انرژی همیشه پایین تر از مقدار قطعی است و با افزایش اندازه تقاضا از شبکه، فاصله بین این دو شاخص افزایش می یابد. این روش به وضوح نشان می دهد که چگونه عدم قطعیت تقاضا می تواند به طور قابل توجهی ارزیابی عملکرد سیستم انتقال را تحت تأثیر قرار دهد. به طور

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



شکل ۷ درصد ذخیره هزینه سالانه انرژی برای تمام اندازه های CGU و استراتژی های عملیاتی

شکل ۷ 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  $\sigma$  انحراف استاندارد،  $\bar{X}$  نمونه ای از اندازه  $N$  یک متغیر تصادفی (یعنی  $ACSP_{EV}$  و  $ACSP_{2.5th\%lie}$ ) مقدار توزیع  $t$  با  $N$  درجه آزادی برای ۰/۰۲۵ احتمال دم راست است. حداکثر حاشیه 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 سازه های 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 استفاده به عمل آمد. طبق رابطه ۵ پرداخت بابت سوخت مصرفی را معادل ۱۷۵ ریال به ازای یک متر مکعب برق مصرفی در نظر گرفته می شود.

$$F_e^{sp} = \frac{E_{grid}^{sp}}{\eta_e^{sp} \eta_{grid}} \quad (5)$$

که  $F_e^{sp}$  مصرف انرژی سوخت واحد برق بیمارستان (kwh) و  $\eta_e^{sp}$  و  $\eta_{grid}$  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 <sup>۲</sup> (KWh/years) | COST (Rials/years) | PFI <sup>۱</sup> |
|------------------|------------------------------|--------------------|------------------|
| مرجع             | $3.46 \times 10^6$           | $2.12 \times 10^8$ | -                |
| FEL <sup>۳</sup> | $3.07 \times 10^6$           | $2.03 \times 10^8$ | 2.48             |
| FTL <sup>۴</sup> | $3.32 \times 10^6$           | $9.7 \times 10^7$  | 2.17             |
| FEL – peo        | $2.99 \times 10^6$           | $1.98 \times 10^8$ | 2.42             |
| FTL – peo        | $3.14 \times 10^6$           | $1.26 \times 10^8$ | 2.23             |
| FEL – oco        | $3.01 \times 10^6$           | $1.95 \times 10^8$ | 2.48             |
| FTL – oco        | $3.32 \times 10^6$           | $9.7 \times 10^8$  | 2.17             |
| FEL – ero        | $2.99 \times 10^6$           | $1.98 \times 10^8$ | 2.42             |
| FTL – ero        | $3.14 \times 10^6$           | $1.26 \times 10^8$ | 2.23             |

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

|                  | CDE <sup>۵</sup> (tons/years) |
|------------------|-------------------------------|
| مرجع             | 1058                          |
| FEL <sup>۶</sup> | 670                           |
| FTL <sup>۷</sup> | 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 استراتژی 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

<sup>1</sup> performance factor indicator

<sup>2</sup> primary energy consumption

<sup>3</sup> following the electric load

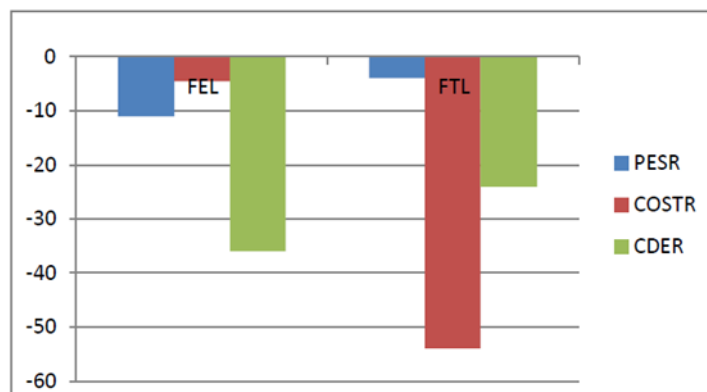
<sup>4</sup> following the thermal load

<sup>5</sup> carbon dioxide emissions

<sup>6</sup> following the electric load

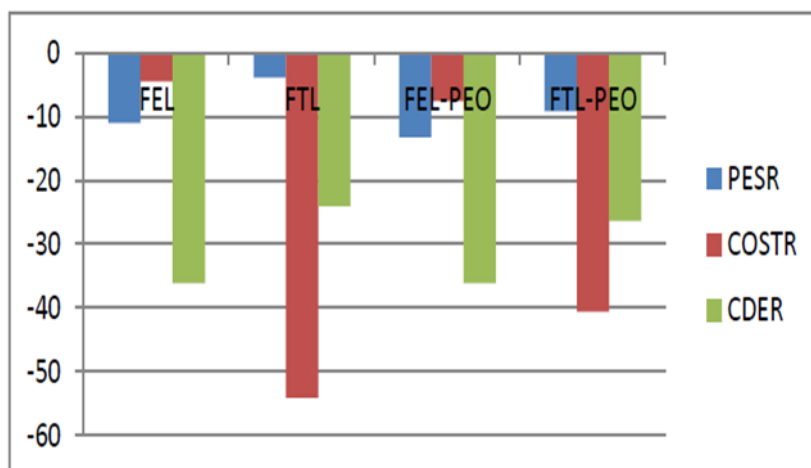
<sup>7</sup> following the thermal load

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 FEL و FTL

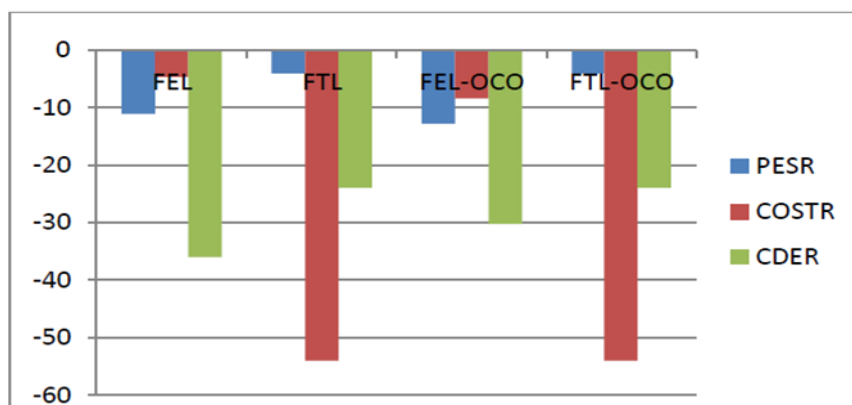
از شکل ۸ مشاهده می شود که میزان صرفه جویی انرژی (PEC در استراتژی FEL، کاهش برابر با ۱۱/۰۶ درصد نسبت به حالت مرجع دارند و در استراتژی FTL به میزان ۴ درصد نسبت به حالت مرجع افزایش یافته است. همچنین هزینه عملکردی در استراتژی های FEL، ۴/۶ درصد نسبت به حالت مرجع کاهش یافته است. در حالیکه در استراتژی FTL کاهش برابر با ۵۴ درصد دارد. از طرفی میزان نشر دی اکسید کربن استراتژی های FEL و FTL به ترتیب کاهش برابر با ۳۶/۰۵ درصد، ۲۴ درصد نسبت به حالت مرجع دارند. در کل برای منطقه مورد مطالعه استراتژی FTL عملکرد بهتری نسبت به استراتژی FEL دارد و همچنین برق فروخته شده به شبکه 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.



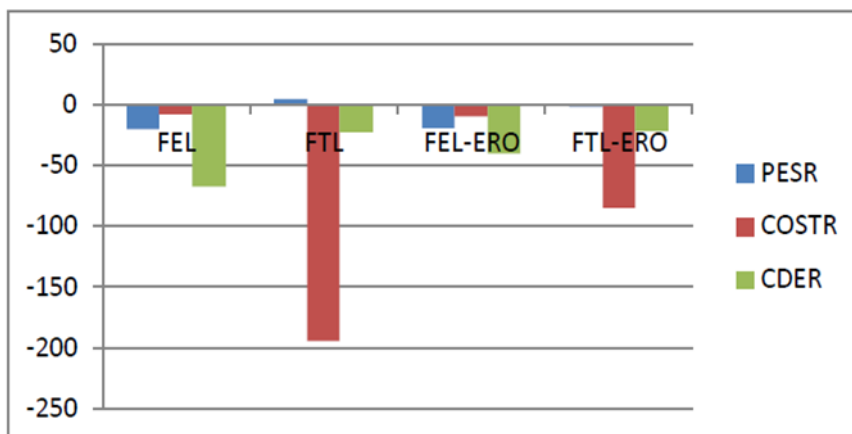
شکل ۹ تغییرات PEC، COST و CDE نسبت به حالت مرجع در استراتژی های FEL و FTL با هدف حداقل کردن انرژی مصرفی

شکل ۹ تغییرات متغیرهای PEC، COST و CDE را نسبت به حالت مرجع در استراتژی های FEL و FTL با هدف حداقل نمودن انرژی مصرفی نشان می دهد. همچنین میزان صرفه جویی انرژی (PEC در استراتژی FEL-PEO و FTL-PEO به ترتیب کاهش برابر با ۱۳/۳۵ درصد و ۹/۱۱ درصد نسبت به حالت مرجع دارند. همچنین هزینه عملکردی در استراتژی های FEL-PEO و FTL-PEO به ترتیب کاهش برابر با ۱۳/۳۵ درصد و ۹/۱۱ درصد نسبت به حالت مرجع دارند. از طرف دیگر میزان نشر دی اکسید کربن استراتژی های FEL-PEO

و FTL-peo به ترتیب کاهش‌ی برابر با ۳۶/۲۳ در صد و ۲۶/۲۷ 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 PESR، COST و CDE نسبت به حالت مرجع در استراتژی‌های FEL و FTL با هدف حداقل کردن هزینه سرمایه گذاری و انتشار الاینده شکل ۱۰ تغییرات متغیرهای PESR، COST و CDE را نسبت به حالت مرجع در استراتژی‌های FEL و FTL با هدف حداقل نمودن هزینه سرمایه گذاری را نشان می‌دهد. میزان صرفه جویی انرژی (PESR) در 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 استراتژی‌های FEL-OCO و FTL-OCO به ترتیب کاهش‌ی برابر با ۸،۴۲ درصد 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 PESR، COST و CDE نسبت به حالت مرجع در استراتژی‌های FEL و FTL با هدف حداقل کردن انتشار دی اکسید کربن شکل ۱۱ تغییرات متغیرهای PESR، Cost و CDE را نسبت به حالت مرجع در استراتژی‌های FEL و FTL با هدف حداقل نمودن نشر دی اکسید کربن نشان می‌دهد.

#### ۴- نتیجه گیری و پیشنهادات

در این مطالعه، الگوریتم جدیدی بر پایه روش بهینه سازی نهنک جهت حل مسئله بهره برداری اقتصادی انرژی خورشیدی ارائه گردیده است. براساس روابط پخش انرژی در سیستم انرژی های تجدیدپذیر ظرفیت و شرایط عملکرد بهینه آن توسط الگوریتم بهینه سازی نهنک 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 محرک های اولیه در استراتژی های مختلف FEL و FTL تعیین گردید. نتایج نشان دهنده آن است که سیستم با محرک اولیه موتور گاز سوز و ذخیره ساز انرژی خورشیدی، اقتصادی 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 استراتژی FTL به میزان ۴ درصد نسبت به حالت مرجع افزایش یافته است. همچنین هزینه عملکردی در استراتژی های 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 FEL و FTL به ترتیب کاهشی برابر با ۳۶/۰۵ درصد، ۲۴ درصد نسبت 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 استراتژی 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 استراتژی های FEL-peo و FTL-peo به ترتیب کاهشی برابر با ۳۶/۲۳ درصد و ۲۶/۲۷ درصد 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. میزان صرفه جویی انرژی (PEC) در استراتژی FEL-oco و FTL-oco به ترتیب کاهشی برابر با ۱۲/۸۴ درصد و ۴ درصد نسبت به حالت مرجع دارند. هزینه عملکردی در استراتژی های FEL-oco و FTL-oco به ترتیب کاهشی برابر با ۸,۴۲ درصد و ۵۴ درصد نسبت به حالت مرجع دارند. همچنین میزان نشر دی اکسید کربن استراتژی های FEL-oco و FTL-oco به ترتیب کاهشی برابر با ۳۰/۱۴ درصد، 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، می توان 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 مشارکت کاربران بالاتر در مدیریت تقاضا از طریق تغییر زمان مصرف انرژی مورد استفاده قرار می گیرند. با توجه به نقش موثر این دستگاهها در برقراری انعطاف پذیری شبکه، بخصوص در شرایط بحران، میتوان در صورت قطعی برق و یا قطع ارتباط با شبکه اصلی، تقاضای بار را از طریق این دستگاه ها تامین نمود. بطور کلی، عدم قطعیت ناشی از تابش و نوسانات قدرت در سیستم های انرژی 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، مدل ها یک تغییر سریع در مقدار میانگین را برای تقلید از رویدادهای دنیای واقعی که در آن این پارامترها به طور قابل توجهی متفاوت هستند، فراهم می کنند. به دلیل تغییر غیرمنتظره در مقدار پایه همراه با نوسانات تصادفی، منشاء چنین رفتار ناشناخته ای در تولید و تقاضای برق را می توان در قالب یکسان با پارامترهای متفاوت طراحی کرد. استفاده از دستگاه های ذخیره هیبریدی این امکان را فراهم میکند تا سیستم مدیریت انرژی 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 انرژی 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

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 بهره‌گیری از الگوریتم‌های فراابتکاری و بر اساس پروفیل تقاضای بار و ولتاژ، میتوان مکان دقیقی برای این دستگاه‌ها در نظر گرفت. همانطور که نتایج نشان داد، میزان صرفه جویی انرژی (PEC) در استراتژی FEL، کاهش‌ی برابر با ۱۱/۰۶ درصد 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 است. در حالیکه در استراتژی FTL کاهش‌ی برابر با ۵۴ درصد دارد. از طرفی میزان نشر دی اکسید کربن استراتژی‌های FTL و FEL به ترتیب کاهش‌ی برابر با ۳۶/۰۵ درصد و ۲۴ درصد نسبت به حالت مرجع دارند. الگوریتم نهنگ یک الگوریتم کامل و برگرفته از طبیعت است. این الگوریتم با تعیین توابع هدف و محدودیت‌های آن قادر است مکان و ظرفیت ذخیره‌سازها 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 شاخص‌های قابلیت اطمینان انرژی‌های 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 بررسی تغییرات ظرفیت بهینه با در نظر گرفتن شاخص‌های کیفیت توان و تلفات دقیق شبکه و یا بررسی همزمان جایابی بهینه و ظرفیت بهینه در ساختار شبکه مورد مطالعه حرکت به سوی مدل سازی شبکه هوشمند و مطالعه ظرفیت بهینه در حضور مدل‌های مختلف بار مانند بارهای قابل قطع و سایر المان‌ها و ویژگی‌های شبکه هوشمند

## منابع

- [۱] شکرزاده، رضا، سخاوتی، آیدین، مرادزاده، آرشد، ۱۳۹۷، بررسی ایجاد سیستم ذخیره‌کننده انرژی باتری - ابرخانز (HESS) برای ذخیره انرژی تولید شده توسط سیستم‌های تجدیدپذیر در مناطق دور، دومین کنفرانس ملی پژوهش‌های 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، ناصر و حاتمی، حجت، ۱۳۹۹، برنامه ریزی بهینه ذخیره سازهای انرژی و تولیدات 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 سیستم‌های 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



- [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] Gisse, 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] Hajiaghahi, S., Salemi, 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. In *2015 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. *Energies* 13(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.

## Analysis and investigation of solar energy with hybrid storage

Shayan Jafarimarandi<sup>1</sup>, Masoud Torabi Azad<sup>2\*</sup>, Gholamreza Salehi<sup>3</sup>

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

2\*-Prof., NT.C., Islamic Azad University, Tehran, Iran(Corresponding 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