تاریخ دریافت: ۱۷ فروردین ۱۴۰۱ تاریخ پذیرش: ۲۷ خرداد ۱۴۰۱ صفحات ۳۱ الی ۵۹

بررسی تاثیر زنجیره تامین برق سه‌سطحی با حضور ذخیره‌ساز انرژی به عنوان واسطه بر توان اکتیو و راکتیو و دیماند مصرفی شبکه با استفاده از الگوریتم ژنتیک

زهره فرمانی

دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی صنایع، دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه الزهرا

z.farmani@student.alzahra.ac.ir

غلامرضا زندش

استاد مشاور،گروه مهندسی برق، دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه الزهرا

g.zandesh@gmail.com

غلامرضا نصیری

استادیار، گروه مهندسی صنایع، دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه الزهرا

grnasiri@alzahra.ac.ir

چکیده :در این مقاله با استفاده از شبکه ۳۳ باسه استاندارد IEEE، سناریوهای مختلف اعم از اینکه تنها از تولیدکننده‌های تجدیدپذیر پراکنده یا از ذخیره‌ساز انرژی به صورت متمرکز یا پراکنده استفاده شود مورد مطالعه و تحلیل قرار گرفته است. مساله با استفاده از الگوریتم ژنتیک و لحاظ کردن محدودیت‌های مختلف توان اکتیو، راکتیو، تقاضا، انحراف ولتاژ و میزان خرید برق از شبکه بالادستی با یکدیگر مقایسه شده است. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که حضور ذخیره‌ساز در شبکه به‌صورت متمرکز مولفه‌های فوق را نسبت به حالت استفاده تنها از تجدیدپذیرهای پراکنده بهبود می‌بخشد. استفاده از ذخیره‌سازها به‌عنوان واسطه در زنجیره تامین انرژی الکتریکی بعنوان یکی از راهکارهای بهینه‌سازی شبکه پیشنهاد شده است.

کلمات کلیدی: زنجیره تامین سه سطحی، زنجیره تامین برق، ذخیره‌ساز متمرکز، ذخیره‌ساز پراکنده، تولید کننده تجدیدپذیر پراکنده

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-11]

۱- مقدمه

هدف اصلی در فرایند تولید انرژی الکتریکی در زنجیره‌تامین برق، برآوردن نیازمندی‌های مصرف‌کننده گان نهایی است به‌طوری که انرژی با کیفیت مطلوب، با قابلیت اطمینان بالا و قیمت مناسب به مصرف کننده تحویل گردد. این فرآیند نیازمند برنامه‌ریزی دقیق، اجرا و کنترل عملیات مستقیم و معکوس مانند خدمات و اطلاعات از تولید برق تا مصرف توسط مشترکین است. از دیدگاه سیستم قدرت یک شبکه مشتمل بر سه سطح تولید، انتقال و توزیع است. اما از دیدگاه زنجیره‌تامین این شبکه دارای دو سطح (رده[۱]) تولیدکننده و مصرف‌کننده می‌باشد و این سیستم نزدیک‌ترین سطح به مصرف‌کننده نهایی بوده و هر خطای آن تاثیر مستقیمی بر مصرف‌کننده نهایی دارد.

در این پژوهش انرژی الکتریکی به عنوان کالا درنظرگرفته شده بنابراین یک بازیگر جدید در سطح زنجیره تامین وارد می‌شود که نقش انبار این محصول را برعهده دارد و ذخیره‌سازها در یک سطح جدیدی نقش اصلی را ایفا می‌کنند. پس سطوح زنجیره تامین از دو سطح تولیدکننده و مصرف کننده به سه سطح تولیدکننده، ذخیره کننده و مصرف کننده تغییر می‌کند و تاثیرات وجود و یا عدم وجود این سطح مستقل جدید که بصورت پراکنده نیز می‌تواند وجود داشته باشد بر توان اکتیو و راکتیو و همچنین دیماند مصرفی شبکه در قالب سناریوهای مختلف در یک ریز شبکه مورد بررسی و مقایسه قرار می‌گیرد.

هدف این مقاله مقایسه استفاده از ذخیره سازهای پراکنده با ذخیره سازهای متمرکز و نیروگاه خورشیدی پراکنده است. از این رو سه سناریوی مختلف طراحی شده است و نتایج شبیه‌سازی

[۱] Echelon

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-11]

بر اساس میزان تلفات شبکه، انحراف ولتاژ و میزان پاسخگویی بار، که از مهمترین شاخص‌های ارزیابی عملکرد هستند، مقایسه شده‌اند.

علاوه بر انجام مطالعات گسترده در این زمینه و بررسی مقالات مختلفی که به بعضی ازآنها اشاره خواهد شد، موارد متعددی در اسناد بالادستی کشور ذکر گردیده است که لزوم تحقیق را تبیین می‌نماید:

- در بخش دوم (اولویت‌های پژوهش و فناوری کشور در بازهٔ زمانی ۱۴۰۰-۱۳۹۶) در زمینه انرژی موضوعاتی شامل: ۱) فناوری‌های ذخیره‌سازی برق و انرژی، تولید پراکنده و همزمان برق و حرارت و سرمایش؛ ۲) فناوری‌های بهینه‌سازی و هوشمندسازی شبکه‌های انتقال، توزیع و مصرف برق مورد توجه قرار گرفته‌اند.
- طبق (سند ملی راهبرد انرژی کشور، ۱۳۹۶) در بخش اهداف کلان بخش انرژی باید به مواردی شامل ۱) افزایش ظرفیت‌های جدید و استفاده بهینه از منابع و ظرفیت‌های بخش انرژی برای حداکثرسازی ارزش افزوده در زنجیره تولید کشور؛ ۲) ارتقای امنیت عرضه انرژی مطمئن، پایدار و با کیفیت مناسب و ۳) تنوع بخشی اقتصادی سبد انرژی کشور پرداخته شود.

ساختار مقاله حاضر بدین شرح است: در بخش دوم به مرور مقالات پیشین اختصاص داده شده و پس از آن در بخش سوم شبکه مورد مطالعه معرفی و مفروضات و پارامترها و سناریوهای مختلف شرح داده می شود. در پایان به جمع‌بندی و نتیجه گیری مقاله پرداخته می‌شود.

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-11]

۲- مرور تحقیقات پیشین

در شبکهٔ توزیع سنتی فاصلهٔ زیاد بین بار و شبکه اصلی باعث افت ولتاژ و تلفات زیاد در شبکه می‌شود. بکارگیری منابع انرژی تجدیدپذیر و سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی قابلیت اطمینان شبکه را ارتقا داده و فاصله بین بار و تولیدکننده کاهش می‌یابد (سیفی، مرادی، عابدینی و جهانگیری، ۱۴۰۰). در شبکه‌های توزیع امروزی، هدف اولیه شرکت‌های مدیریت توزیع، کاهش هزینه‌های بهره‌برداری، نگهداری و تعمیرات، ساخت شبکه و ارتقاء شاخص‌های فنی شبکه می‌باشد. یکی از موثرترین راه‌ها برای پاسخگویی به رشد بار استفاده از منابع تولید پراکنده و سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی است. بهبود شاخص‌های فنی شبکه مانند پروفیل ولتاژ و تلفات شبکه از مهم‌ترین ویژگی‌های ذخیره‌سازهاست. در تحقیق (تقی زادگان، میرزایی و فنونی، ۱۳۹۸) فرض شده است که باتری‌ها در اختیار بخش خصوصی است و صاحبان باتری در صورت سوددهی برق به شبکه می‌فروشند و در ساعات غیرپیک انرژی را از شبکه خریداری می‌کنند، همچنین از استراتژی پاسخگویی بار[۱] استفاده کرده است. در شبکه‌های توزیع فعال برخلاف شبکه‌های شعاعی معمول، شارش توان در هر دوجهت امکان پذیر بوده و شبکه دارای انعطاف‌پذیری بیشتری است و بارها قابلیت کنترل و پاسخگویی دارند. باتری‌های ذخیره‌ساز انرژی[۲] در آینده نقش مهمی را در شبکه‌های توزیع فعال خواهند داشت. در تحقیق (داغی، صدقی و علی اکبرگلکار، ۱۳۹۵) مسئله برنامه‌ریزی باتری‌ها در شبکه توزیع در افق بلندمدت شامل مکان‌یابی بهینه، تعیین ظرفیت، توان نامی و نوع تکنولوژی باتری است. اهداف مدنظر، کمینه‌کردن هزینه‌های سرمایه‌گذاری و نصب، بهره‌برداری و قابلیت اطمینان شبکه درنظرگرفته شده و برای حل مسئله از الگوریتم انجماد تدریجی استفاده شده است. BESS ها نسبت به منابع

[۱] Demand Response (DR)
[۲] Battery Energy Storage System (BESS)

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-11]

انرژی متداول مزایای مختلفی دارند که شامل پاسخگویی سریع و پایدار، تطبیق پذیری، قابلیت کنترل، دوستدار محیط زیست و استقلال جغرافیایی است که یک راه حل موثر برای مسئله گرمایش زمین است (حنان و همکاران، ۲۰۲۱). عوامل مختلفی مانند خصوصی‌سازی بازارهای برق، تلاش برای افزایش سوددهی سیستم و کاهش نگرانی‌های محیطی، توجه محققان و تصمیم‌گیرندگان را به سمت منابع ذخیره انرژی جلب کرده است. استفاده از فناوری‌های مختلف ذخیره‌سازی انرژی می‌تواند در کنار انرژی‌های تجدیدپذیر که خروجی آنها قابل کنترل نیستند برای ایجاد خروجی صاف و قابل انتقال موثر باشند (شارما، یاداو، جوشی ۲۰۱۰). از دیدگاه مدیریت بار، ذخیره‌سازها با ذخیره توان در ساعات غیرپیک و ارائه آن در زمان پیک بار باعث عدم بروز کمبود توان در شبکه می‌شوند. از دیدگاه اقتصادی نیز ذخیره‌سازها با خرید انرژی از شبکه بالادست در زمانی که قیمت برق پایین است و فروش آن در ساعاتی که قیمت برق در بالاترین میزان خود است می‌توانند سود قابل توجهی برای سیستم ایجاد کنند (کارانکی و خو، ۲۰۱۶). با استفاده از شبکه‌های هوشمند جدید و در نظرگرفتن ذخیره‌سازها به‌عنوان خرده‌فروشان سیستم و یکپارچه‌سازی تولیدکننده‌های تجدیدپذیر و خودروهای الکتریکی می‌توان به‌گونه‌ای مدیریت و برنامه‌ریزی کرد که نه‌تنها خودروها به عنوان یک بار تلقی نشوند بلکه به‌عنوان یک ذخیره‌ساز بتوانند انرژی را در زمان کم‌باری ذخیره و در زمان پرباری و قیمت بالا به شبکه تحویل دهند (تیموری و زین الدینی میمند، ۱۳۹۹). در مقاله (سیفی و همکاران، ۱۴۰۰) مقایسه‌ای میان سیستم سنتی و سیستمی که در آن منابع تجدیدپذیر و ذخیره‌سازها نصب شده‌اند صورت گرفته است. کارایی سیستم در چند سطح باردهی جهت حصول تحلیل عددی ارزیابی شده و از دو روش الگوریتم بهینه‌سازی گرگ خاکستری[۱] و

[۱] Gray Wolf Optimization (GWO)

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-11]

بویایی کوسه[۱] برای حل مسئله بهینه‌سازی استفاده شده است. در پژوهش (ستوده، قنبریان و فاتحی دینداراو، ۱۴۰۰) هدف تحقیق کمینه‌سازی هزینه انرژی تامین نشده و هزینه تامین انرژی می‌باشد تا قابلیت اطمینان و اهداف اقتصادی برآورده گردد. در مقاله دیگری (کرمی، توفیقی و کیا، ۱۳۹۸) با پنج سناریو شامل ذخیره‌سازها در زنجیره‌تامین استفاده و نشان داده شده در ساعات پیک مصرف، هزینه‌ها کاهش چشم‌گیری داشته‌است. هدف (ژو و وی، ۲۰۱۸) حداقل‌سازی هزینه زنجیره‌تامین برق تحت محدودیت‌های عملیاتی شبکه برق و دستگاه‌های ذخیره‌ساز پراکنده سمت مشتری است. این تحقیق از دیدگاه مدیریت زنجیره‌تامین برق برای مدل بهینه قیمت زمان- مصرف ارائه شده است.

ریزشبکه‌ها یک ساختار و سیستم مدیریتی نسبتاً جدید هستند که بخشی از یک سیستم توزیع شامل منابع تولید پراکنده و ذخیره‌سازهای انرژی الکتریکی را تشکیل داده‌اند. مجموعه‌ای از بارهای الکتریکی تغذیه شده که یا به صورت متصل به شبکه و یا منفصل از آن طراحی می‌شوند. ریزشبکهٔ مورد مطالعه توسط (ساردو و ایرانمنش، ۱۳۹۷) متشکل از شبکه استاندارد توزیع ۳۳ باسه شامل دو DG[۲] بادی و دو DG فتوولتاییک مجهز به سیستم ذخیره‌ساز است. تابع هدف مسئله کمینه‌کردن هزینه‌های بهره‌برداری ریزشبکه در طول یک شبانه روز می‌باشد و از الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات[۳] جهت حل مسئله استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از DG ها مجموع توان تولیدی شبکه بالادست، تلفات شبکه و هزینهٔ کل را کاهش می‌دهد و همچنین با استفاده از باتری‌ها، انرژی الکتریکی با هزینهٔ کمتر تولید می شود. در مقاله (قربانی، کسائیان، توپ‌شکن، بهرامی و مقامی، ۲۰۱۸) یک ریزشبکه منفصل از شبکه

[۱] Shark Smell Optimization (SSO)
[۲] Distributed Generation (DG)
[۳] Particle Swarm Optimization (PSO)

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-11]

درنظرگرفته شده است که با استفاده از الگوریتم ترکیبی ازدحام ذرات و ژنتیک و بصورت چندهدفه[۱] مسئله حداقل سازی هزینه و حداکثر قابلیت اطمینان را حل کرده و نتایج آن دو را با هم مقایسه نموده است.

همانطور که ذکر گردید ذخیره‌سازی انرژی پراکنده[۲] یک راه‌حل موثر برای اصلاح تغییرات انرژی‌های تجدیدپذیر است. در تحقیق (ذاکری، گیسی، دودس و سوبخانکولوا، ۲۰۲۱) فرض شده است که ساختمان‌های مسکونی برای تامین برق خود از سیستم فتوولتایک به همراه باتری استفاده کرده و در صورت نیاز، از برق شبکه نیز استفاده می‌کنند. دو حالت فرض شده است: ۱) عدم ارتباط سیستم ذخیره‌ساز با شبکه برق؛ ۲) هماهنگی باتری‌ها توسط ساختمان کنترل و فروش به شبکه برق. مالکان از مقایسه این دو حالت متوجه شدند که متمرکزکردن باتری‌ها و هماهنگی آنها منجر به سودآوری و کاهش هزینه آنها خواهد شد.

در پژوهش (محمدی، گلدانی و فلقی، ۱۳۹۸) تاثیر نوع بهره‌برداری از سیستم ذخیره‌سازی انرژی بر سود به دست آمده از آربیتراژ انرژی در بازار برق توسط یک ذخیره‌ساز موردبررسی قرارگرفته است. همچنین جهت تشویق سرمایه‌گذاران برای سرمایه‌گذاری اولیه، استفاده از تسهیلات بانکی پیشنهاد شده است.

از طرفی دیگر از لحاظ امنیت انرژی همانطور که در مقاله (جدی، غفارپور و رنجبر، ۱۳۹۷) آمده‌است، شبکه‌های تولید و توزیع هوشمند توان الکتریکی دارای نواقص شبکه‌های سنتی نبوده و هم‌راستا با اهداف پدافندغیرعامل می‌باشند. در ساختار این شبکه‌ها، منابع پراکنده تولید نیرو وجود دارد.

---

[۱] Multi Objective Particle Swarm Optimization (MOPSO)
[۲] Distributed Energy Storage

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-11]

فشار تشکل‌های زیست محیطی در برابر رشد بیش از حد استفاده از نیروگاه‌های فسیلی، باعث کاهش تمایل به سرمایه‌گذاری در توسعه این نیروگاه‌ها شده است و همچنین ایجاد رقابت در بازار به همراه اعمال برنامه‌های حمایتی از برق تجدیدپذیر، موجب توسعه استفاده از برق تجدیدپذیر می‌شود (دیانت و همکاران، ۱۴۰۰).

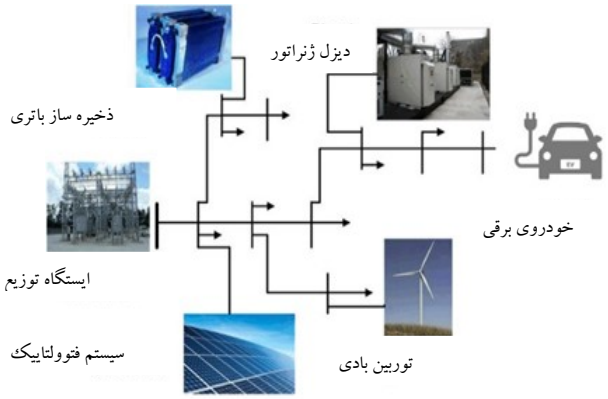
یکی از نگرانی‌های روزافزون در خصوص کیفیت توان که عملکرد سیستم‌های توان را تضعیف می‌کند، اعوجاج هارمونیک‌ها است. این اعوجاجات می‌توانند دراتلاف توان، پروفیل ولتاژ، جریان اتصال کوتاه و قابلیت اطمینان سیستم قدرت، با توجه به درجه نفوذ آن‌ها در شبکه، بسیار تاثیرگذار باشند. با افزایش درصد نفوذ نیروگاه‌های تجدیدپذیر در شبکه برق که خود به‌عنوان یکی از منابع مهم تولید این اعوجاجات هارمونیکی می‌باشند، ممکن است منجر به بروز خطا و اشکالاتی در سیستم توزیع گردند.

۳- شبکه مطالعه شده

شبکه مورد مطالعه یک ریزشبکه **۳۳** باسه استاندارد IEEE[۱] شامل انواع بارهای سرمایشی، گرمایشی، روشنایی و ایستگاه شارژ خودروهای برقی است. البته ایستگاه‌های شارژ در بعضی ساعات در نقش مصرف‌کننده توان هستند و در بعضی ساعات تولیدکننده و به شبکه برق تزریق می‌کنند (شکل ۱).

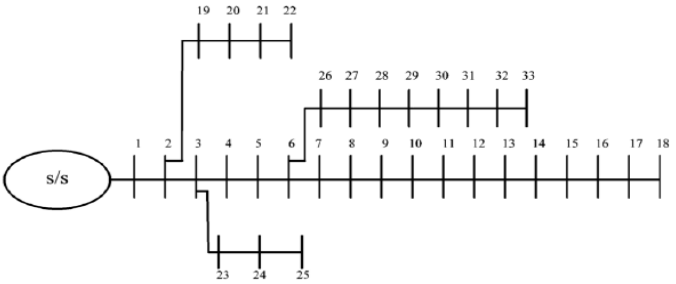
[۱] Institute of Electrical and Electronics Engineers Standard Association

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-11]



شکل۱. نمای شماتیک شبکه مورد مطالعه

منابع تولید پراکنده شامل توربین‌های بادی، فتوولتاییک، میکروتوربین و دیزل ژنراتور می‌باشند (شکل۲). از باتری جهت توازن تولید و مصرف استفاده شده است تا در ساعاتی برق به شبکه تزریق کند و در ساعاتی در حالت شارژ قرار گیرد که این مهم بستگی به قیمت برق دارد. در این مسئله از استراتژی پاسخگویی بار استفاده شده است. همچنین در صورت کمبود توان تولیدی می‌توان از برق شبکه بالادستی هم استفاده نمود.



شکل۲. دیاگرام تک خطی ۳۳ باسه سیستم نمونه

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-11]

پاسخگویی بار اقداماتی هستند که برای تغییر الگوی مصرف برق به منظور بهبود قابلیت اطمینان شبکه و جلوگیری از جهش قیمت‌ها خصوصاً در ساعات پیک مصرف اجرا می‌شوند. همچنین به تصمیم‌گیرندگان کمک می‌کند تا بتوانند با تغییر الگوی مصرف، بهره‌وری شبکه را بهبود دهند. پاسخگویی بار سبب می‌شود که پروفایل شبکه یکنواخت‌تر و تلفات شبکه کمتر شود. در برنامه پاسخگویی بار می‌توان سیاست تشویقی برای مصرف‌کنندگانی که صرفه‌جویی کرده‌اند یا سیاست تنبیهی برای مشترکین پرمصرف، درنظر گرفت.

در این مسئله، توزیع بهینه تولید با توجه به هزینه تولیدکنندگان و بار موجود جهت بررسی توان اکتیو و راکتیو در شبکه انجام شده است. همچنین برای حل مسئله از الگوریتم ژنتیک برای ۲۴ساعت شبانه روز استفاده شده است.

در این مسئله سه سناریو طراحی گردیده است و هدف از آن مقایسه بین حالات استفاده از پنل‌های خورشیدی پراکنده، باتری متمرکز و باتری پراکنده و بررسی تاثیر آنها بر روی میزان تلفات اکتیو و راکتیو شبکه و دیماند مصرفی ذخیره‌سازهاست.

۳-۱- مفروضات مسأله مورد بررسی

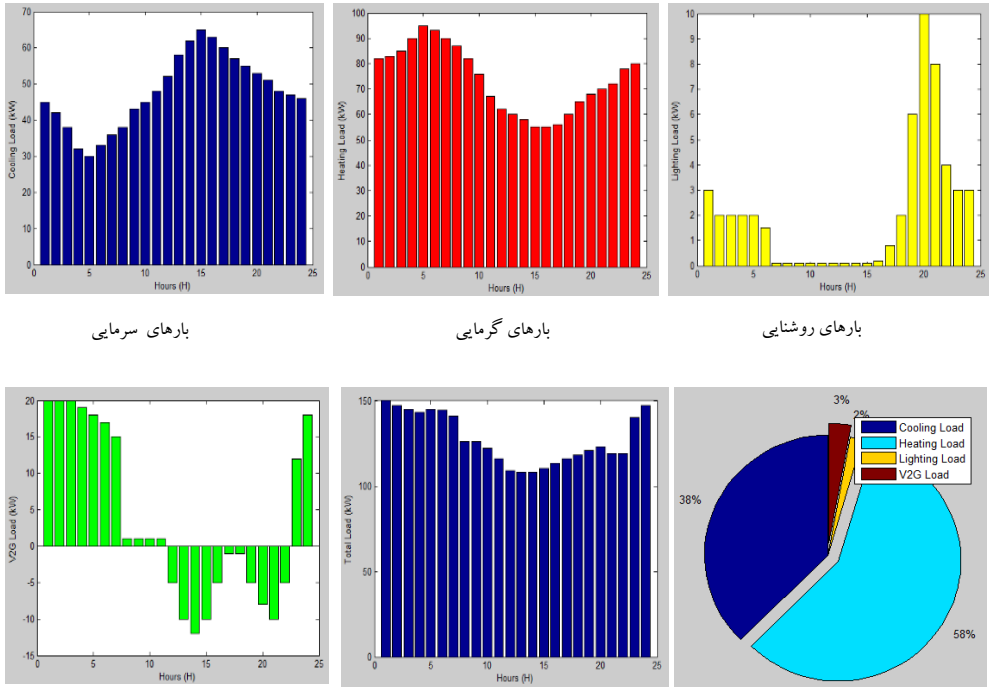
در جدول پیوست علائم اختصاری و پارامترهای مسئله تعریف شده‌اند. مفروضات مسئله به شرح زیر می‌باشد:

منظور از بار سرمایشی (C-load)، مصرف تجهیزات سرمایشی شبکه است که با برق کار می‌کنند.

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-11]

منظور از بار گرمایشی (H-load)، میزان مصرف تجهیزات گرمایشی است که با برق کار می‌کنند. منظور از بارهای روشنایی (L-load) هم میزان مصرفی است که برای روشنایی محیط استفاده می‌شود.

خودروی برقی[1] در ساعاتی از شبانه روز می‌تواند به عنوان بار تلقی گردد و در ساعاتی ممکن است به عنوان تولیدکننده درنظر گرفته شود. میزان بار سرمایشی، گرمایشی، روشنایی و خودروی برقی در مسئله نمونه به صورت نمودارهای میله‌ای در شکل۳ مشخص است.



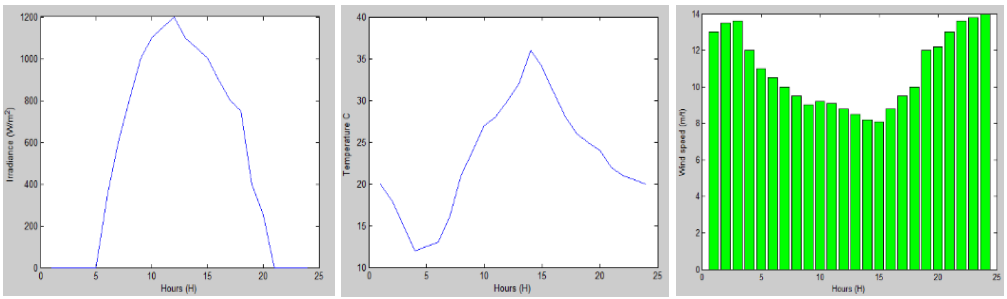
بارهای سرمایی — بارهای گرمایی — بارهای روشنایی

خودروهای برقی — مجموع بارها — نمودار دایره ای

شکل۳. بارهای مصرفی شبکه

[1] Vehicle- to- Grid

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-11]



تشعشع خورشید　　دمای محیط　　سرعت باد

شکل ٤. مشخصات محیط

۳-۲- پارامترهای شبکه

میزان مصرف بار در بعضی ساعات بیشینه است و بیانگر حداکثر بار مصرفی است. با توجه به محیط استاندارد در نظر گرفته شده، میزان تشعشع خورشید، دمای محیط و سرعت باد با توجه به نوع محیط انتخابی، در نمودارهای شکل۴ درج شده است. مشخصات بار شبکه و همچنین مشخصات خطوط شبکه مطابق جداول ۱ و۲ می‌باشد.

جدول۱. مشخصات بار شبکه

bus	P	Q	bus	P	Q
۱	۰	۰	۱۸	۹۰	٤۰
۲	۱۰۰	٦۰	۱۹	۹۰	٤۰
۳	۹۰	٤۰	۲۰	۹۰	٤۰
٤	۱۲۰	۸۰	۲۱	۹۰	٤۰
٥	٦۰	۳۰	۲۲	۹۰	٤۰
٦	٦۰	۲۰	۲۳	۹۰	٥۰
۷	۲۰۰	۱۰۰	۲٤	٤۲۰	۲۰۰
۸	۲۰۰	۱۰۰	۲٥	٤۲۰	۲۰۰
۹	٦۰	۲۰	۲٦	٦۰	۲٥
۱۰	٦۰	۲۰	۲۷	٦۰	۲٥
۱۱	٤٥	۳۰	۲۸	٦۰	۲۰

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-11]

۱۲	۶۰	۳۵	۲۹	۱۲۰	۷۰
۱۳	۶۰	۳۵	۳۰	۲۰۰	۶۰۰
۱۴	۱۲۰	۸۰	۳۱	۱۵۰	۷۰
۱۵	۶۰	۱۰	۳۲	۲۱۰	۱۰۰
۱۶	۶۰	۲۰	۳۳	۶۰	۴۰
۱۷	۶۰	۲۰			

جدول۲. اطلاعات خطوط شبکه ۳۳ باسه IEEE

line	resist	react	line	resist	React
۱-۲	۰,۰۹۹۲	۰,۰۴۷۰	۱۷-۱۸	۰,۷۳۲۰	۰,۵۷۴۰
۲-۳	۰,۴۹۳۰	۰,۲۵۱۱	۱۸-۱۹	۰,۱۶۴۰	۰,۱۵۶۵
۳-۴	۰,۳۶۶۰	۰,۱۸۶۴	۱۹-۲۰	۱,۵۰۴۲	۱,۳۵۵۴
۴-۵	۰,۳۸۱۱	۰,۱۹۴۱	۲۰-۲۱	۰,۴۰۹۵	۰,۴۷۸۴
۵-۶	۰,۸۱۹۰	۰,۷۰۷۰	۲۱-۲۲	۰,۷۰۸۹	۰,۹۳۷۳
۶-۷	۰,۱۸۷۲	۰,۶۱۸۸	۲۲-۲۳	۰,۴۵۱۲	۰,۳۰۸۳
۷-۸	۰,۷۱۱۴	۰,۲۳۵۱	۲۳-۲۴	۰,۸۹۸۰	۰,۷۰۹۱
۸-۹	۱,۰۳۰۰	۰,۷۴۰۰	۲۴-۲۵	۰,۸۹۶۰	۰,۷۰۱۱
۹-۱۰	۱,۰۴۴۰	۰,۷۴۰۰	۲۵-۲۶	۰,۲۰۳۰	۰,۱۰۳۴
۱۰-۱۱	۰,۱۹۶۶	۰,۰۶۵۰	۲۶-۲۷	۰,۲۸۴۲	۰,۱۴۴۷
۱۱-۱۲	۰,۳۷۴۴	۰,۱۲۳۸	۲۷-۲۸	۱,۰۵۹۰	۰,۹۳۳۷
۱۲-۱۳	۱,۴۶۸۰	۱,۱۵۵۰	۲۸-۲۹	۰,۸۰۴۲	۰,۷۰۰۶
۱۳-۱۴	۰,۵۴۱۶	۰,۷۱۲۹	۲۹-۳۰	۰,۵۰۷۵	۰,۲۵۸۵

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-11]

۱۴-۱۵	۰,۵۹۱۰	۰,۵۲۶۰	۳۰-۳۱	۰,۹۷۴۴	۰,۹۶۳۰
۱۵-۱۶	۰,۷۴۶۳	۰,۵۴۵۰	۳۱-۳۲	۰,۳۱۰۵	۰,۳۶۱۹
۱۶-۱۷	۱,۲۸۹۰	۱,۷۲۱۰	۳۲-۳۳	۰,۳۴۱۰	۰,۵۳۰۲

۳-۳- قیود مسأله

در طول ۲۴ ساعت شبانه‌روز در ساعاتی تابش خورشید نداریم و در نتیجه سیستم فتوولتاییک تولید ندارد. هر تولیدکننده حداقل و حداکثر میزان تولید دارد:

$$P_{Gen}^{\min} \le P_{Gen} \le P_{Gen}^{\max} \qquad (1)$$

هر مصرف‌کننده نیز حداکثر می‌تواند تا حدی از میزان مصرف خود بکاهد و بیشتر از آن مقدار صرفه اقتصادی ندارد و نیز تجهیزاتی مانند یخچال نمی‌توانند بدون برق کار کنند.

شرط مهمی که در حل مسائل توزیع بهینه انرژی لحاظ می‌شود این است که توازن میان میزان تولید و مصرف برقرار باشد تا خاموشی حذف شود.

$$P_{Gen1} + P_{Gen2} + ... + P_{Geni} = P_{Load} \qquad (2)$$

توان خروجی آرایه‌های فتوولتائیک به دمای سلول‌ها و شدت تابش خورشید در نقطه توان ماکزیمم وابسته است که طبق رابطه زیر مشخص می‌شود:

$$P_{pv}(t) = P_{pv}^{Rated} \left(\frac{R(t)}{R_{s\,\tan dard}}\right)[1 + \alpha_p (T_{amp-}T_{ref})] \qquad (3)$$

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-11]

توان تولیدی توربین‌های بادی به سرعت باد بستگی دارد. تغییرات سرعت باد می‌تواند به صورت لحظه‌ای، ساعتی، روزانه و فصلی باشد. از این‌رو برای مدل‌سازی توان حقیقی تولید شده توسط توربین بادی از رابطه زیر استفاده می‌شود:

$$P_{wt}(V)=\begin{cases}0 & \text{if } 0\le V\le V_{ci}\\ P_R\left(\frac{V-V_{ci}}{V_r-V_{ci}}\right) & \text{if } V_{ci}\le V\le V_r\\ P_R & \text{if } V_r\le V\le V_{co}\\ 0 & \text{if } V_{co}\le V\end{cases} \qquad (4)$$

که در رابطه بالا ، V_{ci}، V_{co} ، V_r و P_R به ترتیب قطع پایین و بالا، سرعت نامی توربین بادی، توان نامی توربین بادی هستند. ضمناً توان باتری ثابت درنظرگرفته شده است. روابط هزینه‌ها و هزینه کل با روابط زیر مشخص شده است. هزینه پنل خورشیدی:

$$C_{pv} = C_{pv}^{invest} + C_{pv}^{operation} \times P_{pv} \qquad (5)$$

هزینه توربین بادی:

$$C_{wt} = C_{wt}^{invest} + C_{wt}^{operation} \times P_{wt} \qquad (6)$$

هزینه دیزل ژنراتور که شامل ۲ بخش هزینه سوخت و هزینه آلایندگی است:

$$C_{dg} = C_{fuel-dg} + C_{EMI-dg} \qquad (7)$$

$$C_{EMI-dg} = (C_{co2} + C_{so2} + C_{no2}) \times P_{dg} \qquad (8)$$

هزینه میکروتوربین نیز مانند دیزل ژنراتور شامل ۲ بخش است:

$$C_{EMI-mt} = (C_{co2} + C_{so2} + C_{no2}) \times P_{mt} \qquad (9)$$

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-11]

$$C_{mt} = C_{fuel-mt} + C_{EMI-mt} \qquad (10)$$

هزینه باتری:

$$C_{battery} = C_{battery}^{invest} + C_{battery}^{connection} + (\frac{P_{bat}}{\theta}) \times C_{ch} \qquad (11)$$

هزینه پاسخگویی بار:

$$C_{dr} = C_{dr}^{reward} \times P_{dr} \qquad (12)$$

هزینه خرید از شبکه بالادستی:

$$C_{utility} = C_{connect} + C_{buy} \times P_{utility} \qquad (13)$$

در نهایت هزینه کل به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$total\ cost = C_{pv} + C_{wt} + C_{dg} + C_{mt} + C_{battery} + C_{dr} + C_{utility} \qquad (14)$$

۳-٤- تشریح سناریوهای مختلف مسأله

مسأله در حالات مختلف حل و از لحاظ پارامترهای شبکه با یکدیگر مقایسه شده است. در سه حالت ذکرشده در زیر، منابع تولیدی توربین بادی، دیزل ژنراتور، میکروتوربین، DR و برق شبکه بالادستی و مزرعه خورشیدی متمرکز مشترک هستند و تنها تفاوت در نحوهٔ ارائهٔ باتری و پنل خورشیدی است.

۱) در حالت اول از مزرعه خورشیدی پراکنده استفاده شده است؛

۲) در حالت دوم از باتری متمرکز استفاده می‌کنیم؛

۳) در حالت سوم از باتری پراکنده استفاده می‌کنیم.

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-11]

۳-۵- الگوریتم ژنتیک

الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک یک حلقه تکرار را برای هر ساعت از ۲۴ ساعت شبانه‌روز حل می‌کند. یعنی با توجه به میزان تابش خورشید، وزش باد، حداکثر میزان تولید میکروتوربین و دیزل ژنراتور، باتری و برنامه پاسخگویی بار و تابع هزینه هر کدام از آنها، تعیین می‌کند که هر تولیدکننده چه میزان برق به شبکه تزریق کند که به‌صرفه باشد و میزان تلفات حداقل باشد.

حداقل میزان تولید در الگوریتم، LB[۱] می باشد و برای همه صفر درنظر گرفته شده و حداکثر میزان تولید UB[۲] است. مسئله متغیر غیرخطی ندارد و تمامی متغیرها خطی هستند. در هر سناریو تعداد پارامترهایی که داریم و تعداد متغیرها و ماتریس LB و UB متفاوت است.

در این مسأله ۴ پارامتر شامل هزینه، تلفات اکتیو، تلفات راکتیو و انحراف ولتاژ در تصمیم‌گیری میزان توان تولیدی بهینه به یک میزان تاثیرگذار هستند.

٤- معرفی و تحلیل سناریوهای طراحی شده مسأله

در این بخش سناریوهای طراحی شده معرفی و تحلیل می‌شود.

۴-۱- سناریوی اول

همانطور که گفته شد در این حالت علاوه بر تولیدکنندگان مشترک، از پنل‌های خورشیدی با ظرفیت ۰.۲ توان تولیدی مزرعه خورشیدی (یعنی به ۵ قسمت مساوی تقسیم شده است) استفاده می‌شود و نحوهٔ اتصال به باس‌ها مطابق جدول۳ است.

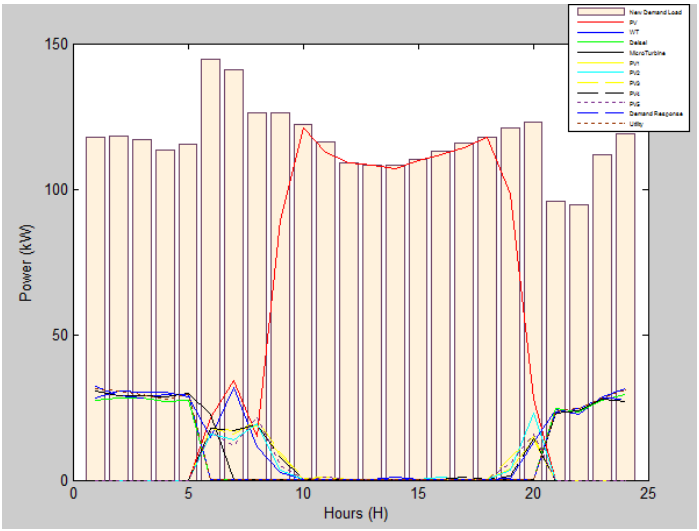
[۱] Lower Bound
[۲] Upper Bound

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-11]

جدول۳. نحوهٔ اتصال به باس ها در سناریوی اول

شینه	تولید کنندگان
۱۷	P_{pv} , P_{wt} , P_{dr} , $P_{utility}$
۳۲	P_{dg} , P_{mt} , $P_{pv\,2}$, $P_{pv\,3}$
۲۲	$P_{pv\,1}$
۳۰	$P_{pv\,4}$, $P_{pv\,5}$

همانطور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، جهت بهینه‌سازی پارامترهای شبکه و هزینه‌ها در برخی ساعات از مزرعه خورشیدی به‌تنهایی استفاده شده است و پاسخگوی میزان بار مصرفی است ولی در ساعاتی که میزان تشعشع خورشیدی کمتر از میزان مورد نیاز بوده است از حداکثر توان فتوولتاییک استفاده شده است.



شکل ۵. توان تولیدی و مصرفی در سناریوی اول

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-11]

۴-۲- سناریوی دوم

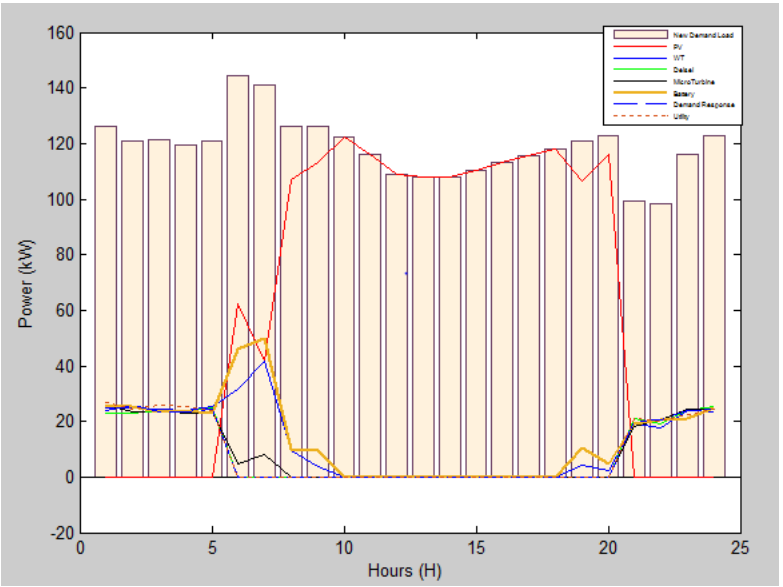
در این حالت به جای پنل‌های خورشیدی پراکنده از باتری متمرکز با ظرفیت ۵۰کیلووات استفاده می‌شود تا در ساعاتی که میزان مصرف کمتر از میزان تولید است، برق را ذخیره کند و در ساعاتی که میزان مصرف بیشتر از میزان تولید برق را به شبکه بفروشد. نحوهٔ اتصال تولیدکننده‌ها به باس‌ها مطابق جدول ۴ است.

جدول ٤. نحوهٔ اتصال به باس ها در سناریوی دوم

شینه	تولیدکنندگان
۱۷	P_{pv} , P_{wt} , P_{dr} , $P_{utility}$
۳۲	P_{dg} , P_{mt} , P_{bat}

شکل ۶ نشان می‌دهد که در ساعات اوج مصرف و زمان‌هایی که پنل خورشیدی پاسخگوی بار نیست، باتری وارد شبکه شده است و از طریق فروش برق به شبکه کسب سود کرده است.

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-11]



شکل ٦. توان مصرفی و تولیدی در سناریوی دوم

۴-۳- سناریوی سوم

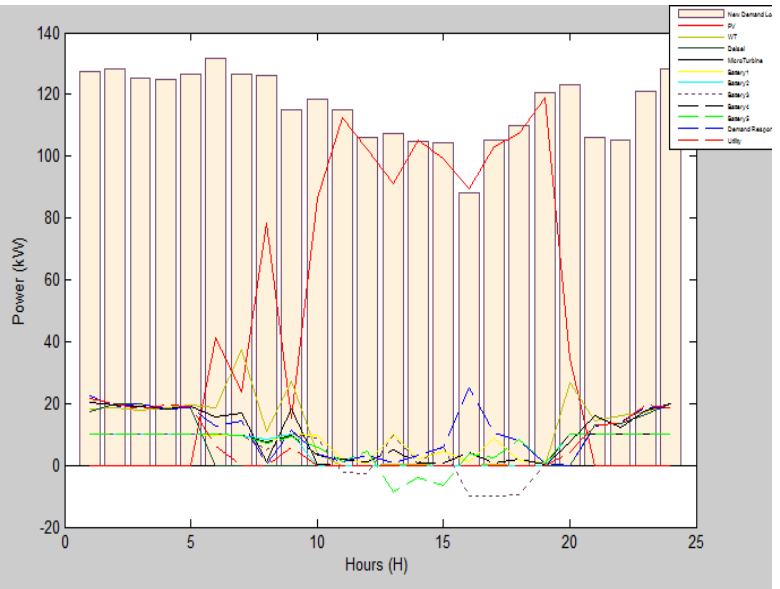
در این حالت به جای اینکه از باتری متمرکز استفاده شود، از باتری پراکنده استفاده شده است. یعنی به جای یک عدد باتری با ظرفیت ۵۰ کیلووات، از ۵ عدد باتری با ظرفیت ۱۰ کیلووات استفاده شده و در همان باس‌هایی که پنل خورشیدی پراکنده قرار دارد، باتری‌ها متصل شد. نحوهٔ اتصال تولیدکننده‌ها به باس‌ها مطابق جدول۵ است.

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-11]

جدول ۵. نحوهٔ اتصال به باس ها در سناریوی سوم

شینه	تولیدکنندگان
۱۷	P_{pv} , P_{wt} , P_{dr} , $P_{utility}$
۳۲	P_{dg} , P_{mt} , $P_{bat\,2}$, $P_{bat\,3}$
۲۲	$P_{bat\,1}$
۳۰	$P_{bat\,4}$, $P_{bat\,5}$

همانطور که درشکل۷ ملاحظه می‌شود میزان توان مصرفی (دیماند) نسبت به شکل۶ بهینه‌تر شده است.

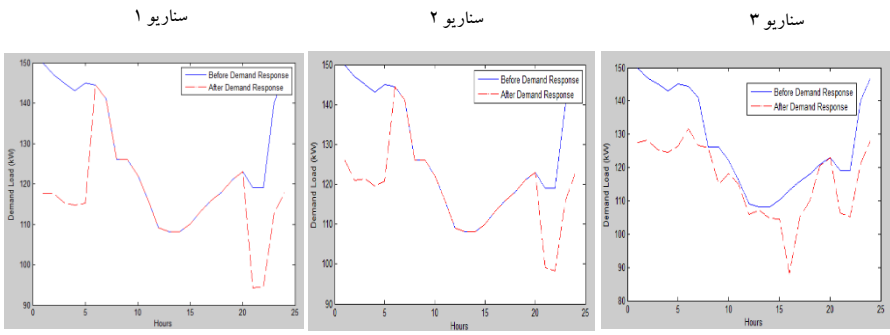


شکل ۷. توان تولیدی و مصرفی در سناریوی سوم

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-11]

٤-٤- مقایسه و تحلیل سناریوها

در ادامه نتایج به دست آمده از هر سناریو مقایسه شده است. همانطور که در شکل۸ مشاهده می‌گردد میزان تقاضا پس از اعمال سیاست DR کاهش یافته است یعنی مشترکین متقاعد شده‌اند در ازای صرفه‌جویی در مصرف برق پاداش دریافت کنند.

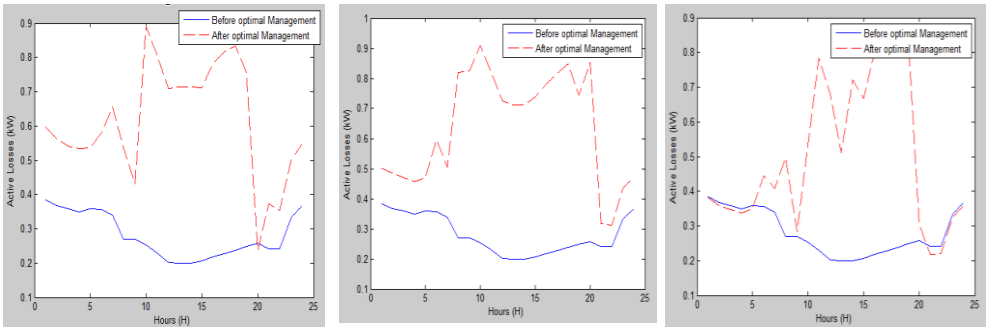


شکل ۸. مقایسه میزان تقاضا

از مقایسهٔ سه سناریوی فوق، نتیجه می‌شود که میزان صرفه‌جویی در سناریوی سوم بیشتر بوده است. در شکل ۹ و۱۰ میزان تلفات اکتیو و راکتیو در سه سناریو بررسی گردیده و همانطور که در بخش مرور ادبیات اشاره شد استفاده از نیروگاه‌های تجدیدپذیر در شبکه برق و اعوجاج هارمونیکی حاصل از عملکرد آنها باعث افت کیفیت توان و اتلاف توان‌های اکتیو و راکتیو می‌گردد. اما همانطور که ملاحظه می‌گردد استفاده از آرایش سناریوی سوم باعث تعدیل و کاهش اتلاف نسبت به دو سناریوی دیگر شده است.

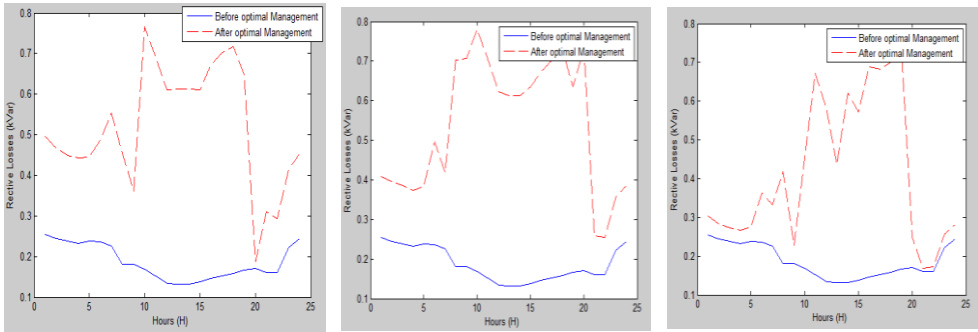
[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-11]

سناریو ۱ سناریو ۲ سناریو ۳



شکل ۹. مقایسه تلفات اکتیو شبکه

سناریو ۱ سناریو ۲ سناریو ۳

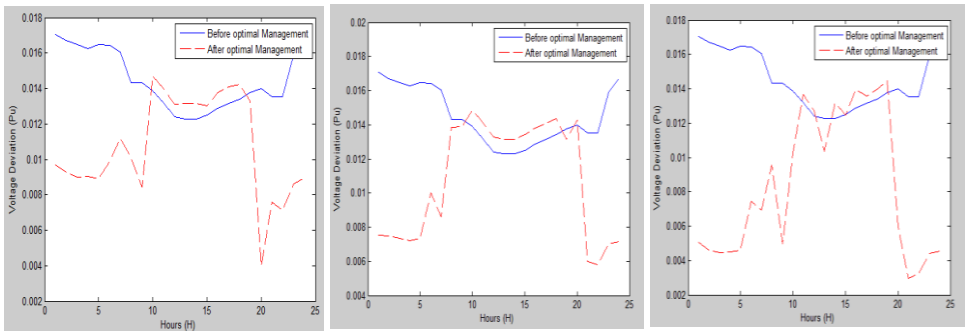


شکل ۱۰. مقایسه تلفات راکتیو شبکه

همچنین درشکل ۱۱ مقایسه میزان انحراف ولتاژ خطوط شبکه بررسی شده که نتیجه می‌گیریم استفاده از باتری پراکنده باعث بهبود انحراف ولتاژ می‌گردد.

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-11]

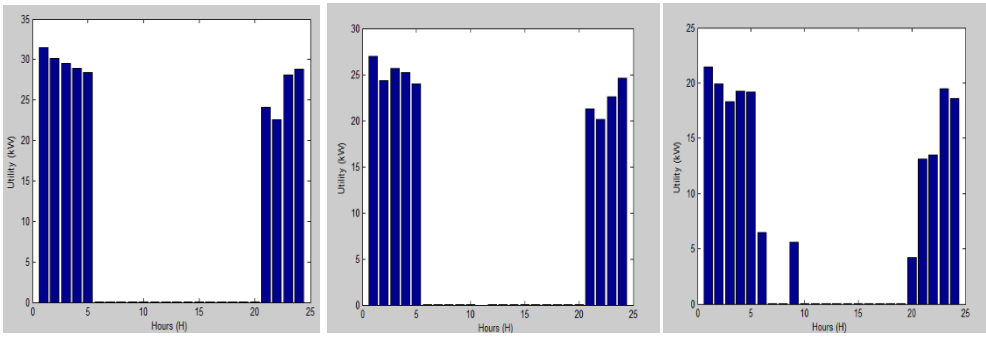
سناریو ۱ سناریو ۲ سناریو ۳



شکل ۱۱. مقایسه انحراف ولتاژ خطوط

در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود که در سناریوی ۳ با استفاده از ذخیره‌سازها، میزان خرید از شبکه بالادستی نیز درکمترین مقدار خود است.

سناریو ۱ سناریو ۲ سناریو ۳

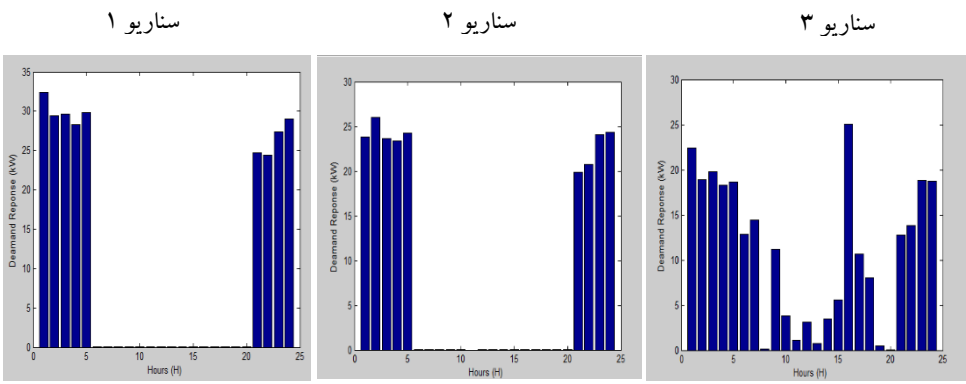


شکل ۱۲. مقایسه میزان خرید از شبکه بالادستی

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-11]

در شکل ۱۳ میزان پاسخگویی بار نشان داده شده است و بیانگر این است که سیاست تشویقی در سناریوی ۳ بیشترین تاثیر را داشته و مشترکین در میزان مصرف خود بیشترین صرفه‌جویی را داشته‌اند و در ساعات بیشتری این اتفاق افتاده است.

تحلیل‌های به‌دست آمده از مقایسه‌ها در فوق این نتیجه را تبیین می‌نماید که یکی از راه‌های بهینه‌سازی شبکه می‌تواند ارتقا سطوح زنجیره‌تامین انرژی الکتریکی از دو سطح تولیدکننده و مصرف‌کننده به سه سطح تولیدکننده، ذخیره‌ساز به‌عنوان واسطه و مصرف‌کننده باشد.



شکل۱۳. سیاست تشویقی DR

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-11]

۵- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

با افزایش روزافزون مصرف برق، کمبود سوخت فسیلی به علاوه مشکلات زیست‌محیطی سوخت‌های فسیلی، همچنین با استناد به سیاست‌ها و اولویت‌های پژوهشی و سند راهبرد انرژی کشور، نیروگاه‌های تجدیدپذیر و به خصوص باتری‌های ذخیره‌ساز انرژی نقش مهمی را در تولید برق آینده کشور برعهده دارند. باتوجه به نتایج به‌دست آمده از تحلیل سناریوهای طراحی شده و شبیه‌سازی‌های صورت گرفته، استفاده از ذخیره‌سازهای پراکنده (سناریو سه) نسبت به دو سناریوی دیگر می‌تواند مولفه‌های میزان تقاضا، تلفات توان اکتیو و راکتیو، انحراف ولتاژ، پاسخگویی بار و میزان خرید از شبکه بالادستی را بهبود بخشد.

در این مقاله به تصمیم‌گیرندگان پیشنهاد می‌شود به جای احداث نیروگاه‌های بزرگ و حتی تولیدات تجدیدپذیر، از رویکرد ذخیره‌سازی پراکنده استفاده کنند. علاوه براینکه از هزینه سرمایه‌گذاری می‌کاهد، به مشترکین این امکان را می‌دهد که از خرید و فروش برق به شبکه در ساعات مشخص کسب سود کنند. تعیین ملاحظات مکان‌یابی و ویژگی آنها همچنین تعیین قیمت خرید و فروش، می‌تواند بعنوان موضوعات تحقیقات آتی مطرح باشد.

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-11]

منابع

Ghorbani, N., Kasaeian, A., Toopshekan, A., Bahrami, L., & Maghami, A. (۲۰۱۸). Optimizing a hybrid wind-PV-battery system using GA-PSO and MOPSO for reducing cost and increasing reliability. Energy, ۱۵٤, ۵۸۱-۵۹۱.

Hannan, M. A., Wali, S. B., Ker, P. J., Rahman, M. S. A., Mansor, M., Ramachandaramurthy, V. K.,Dong, Z. Y. (۲۰۲۱). Battery energy-storage system: A review of technologies, optimization objectives, constraints, approaches, and outstanding issues. Journal of Energy Storage, ٤۲, ۱۰۳۰۲۳

Karanki, S. B., & Xu, D. (۲۰۱٦). Optimal capacity and placement of battery energy storage systems for integrating renewable energy sources in distribution system. Paper presented at the ۲۰۱٦ National Power Systems Conference (NPSC).

Sharma, S., Yadav, V., & R.R.Joshi. (۲۰۱۰). An Overview on Energy Storage Options for Renewable Energy Systems.

Zakeri, B., Gissey, G., Dodds, P., & Subkhankulova, D. (۲۰۲۱). Centralized vs. distributed energy storage systems: The case of residential solar PV-battery. Energy, ۲۳٦, ۱۲۱٤٤۳.

Zhou, K., & Wei, S. (۲۰۱۸). Time-of-use price model for user-side micro-grid based on power supply chain management. Energy Procedia, ۱۵۲, ۵۱-۵٦.

تقی زادگان, ن., میرزایی, ع. و فنونی, ی. (۱۳۹۸). طراحی بهینه سیستم های ذخیره ساز انرژی در شبکه های توزیع هوشمند به منظور بهبود شاخص های فنی و اقتصادی. ششمین کنگره ملی تازه های مهندسی برق و کامپیوتر ایران با نگاه کاربردی بر انرژی های نو.

تیموری, ا., و زین الدینی میمند, ح. (۱۳۹۹). مشارکت خودروهای الکتریکی در برنامه ریزی ریزشبکه هوشمند شامل تولید کننده تجدیدپذیر به صورت ذخیره ساز. کنفرانس ملی صنعت برق و الکترونیک.

جدی, ب., غفارپور, ر. و رنجبر, ع. م. (۱۳۹۷). ارتقاء شاخصهای پدافند غیرعامل با استفاده از برنامه ریزی بهینه منابع تجدیدپذیر انرژی در شبکه های هوشمند توزیع برق مجله انجمن مهندسی برق و الکترونیک ایران, سال پانزدهم شماره اول.

داغی, م., صدقی, م., و علی اکبر گلکار, م. (۱۳۹۵). برنامه ریزی بهینه ی باتری ها در شبکه توزیع فعال با در نظر گرفتن تکنولوژی های مختلف در شرایط فنی و اقتصادی غیرقطعی. کیفیت و بهره وری در صنعت برق ایران, ۵(۱۰)

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-11]

ساردو, ا. گ. و ایرانمنش, ا. (۱۳۹۷). بهره برداری بهینه ریز شبکه درحضور ذخیرهسازهای انرژی. ۳۳مین کنفرانس بین المللی برق.

ستوده, ح., قنبریان, م. و فاتحی دینداارلو, م. (۱۴۰۰). مدیریت انرژی در سیستم های توزیع با جایابی بهینه نیروگاه های خورشیدی و منابع ذخیره ساز انرژی در شبکه. دومین کنفرانس بین المللی پژوهش های نوین در مهندسی برق، کامپیوتر، مکانیک و مکاترونیک در ایران و جهان اسلام.

سیفی, ا., مرادی, م. ح., عابدینی, م. و جهانگیری, ع. (۱۴۰۰). ارزیابی تأثیر پاسخگویی بار در ریزشبکه‌ها با هدف افزایش قابلیت اطمینان و پایداری ولتاژ شبکه با بررسی‌کردن عدم قطعیت در تولید منابع تجدیدپذیر. هوش محاسباتی در مهندسی برق, شماره اول.

کرمی, س., توفیقی, ع. و کیا, م. (۱۳۹۸). بازآرایی بهینه در شبکه توزیع هوشمند با حضور منابع تولید پراکنده و در نظر گرفتن عدم قطعیت ها. پژوهش های سیاست گذاری و برنامه ریزی انرژی.۵(۱۶)

دیانت.ف، خداکرمی. و، حسینی. س. ح، شکوری گنجوی. ح. (۱۴۰۰). مدل‌سازی سیستمی برنامه‌ریزی توسعه برق تجدیدپذیر در رقابت با برق فسیلی. پژوهش‌های سیاست‌گذاری و برنامه‌ریزی انرژی ۷ (۲۲)

محمدی, ج., گلدانی, س. و فلقی, ح. (۱۳۹۸). ارزیابی اقتصادی آربیتراژ انرژی سیستم ذخیره ساز انرژی باتری با توجه به نوع بهره برداری آن. مهندسی برق دانشگاه تبریز ۴۹(۳)

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-11]

پیوست

علائم اختصاری و پارامترهای مسئله

پارامتر	تعریف	پارامتر	تعریف
$(\mathrm{C}-\mathrm{load})$	بار سرمایشی	$P_{pv}(t)$	توان خروجی فتوولتاییک در زمان t
$(\mathrm{H}-\mathrm{load})$	بار گرمایشی	$R(t)$	میزان تابش در زمان t
$(\mathrm{L}-\mathrm{load})$	بارهای روشنایی	$R_{standard}$	میزان تابش در شرایط استاندارد
$(V2G)$	خودروی برقی	α_P	ضریب دمایی توان در نقطه ماکزیمم توان
P_{Gen}^{min}	حداقل تولید	P_{wt}	توان خروجی توربین بادی
P_{Gen}^{max}	حداکثر تولید	V_{ci}	توان قطع پایین
P_{Gen}	میزان تولید	V_{co}	توان قطع بالا
$C_{battery}$	هزینه باتری	$C_{battery}^{connection}$	هزینه وصل باتری
$C_{utility}$	هزینه خرید از شبکه بالادستی	C_{buy}	قیمت خرید برق
T_{amp}	دمای سلول های خورشیدی	$C_{PV}^{operation}$	هزینه متغیر عملیاتی سیستم فتوولتاییک
T_{ref}	دمای سلول های خورشیدی در شرایط استاندارد	C_{wt}	هزینه توربین بادی
P_{pv}^{rated}	توان نامی PV در نقطه ماکزیمم توان و شرایط استاندارد	C_{dg}	هزینه دیزل ژنراتور
V_r	سرعت نامی توربین بادی	$C_{\mathrm{Fuel_dg}}$	هزینه سوخت دیزل ژنراتور
P_R	توان نامی توربین بادی	C_{EMI-mt}	هزینه آلایندگی دیزل ژنراتور
C_{pv}	هزینه پنل خورشیدی	θ	بازدهی باتری
C_{PV}^{invest}	هزینه ثابت سرمایه گذاری پنل خورشیدی	$\boldsymbol{C_{mt}}$	هزینه میکروتوربین
$\boldsymbol{C_{dr}}$	هزینه پاسخگویی بار	$\boldsymbol{C_{dr}^{reward}}$	هزینه پاداش در ازای صرفه جویی مشترکین
DR	پاسخگویی بار		

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-11-11]