

ارائه مدلی جدید برای مدیریت بهینه انرژی یک ریزشکه مسکونی با هدف بهبود شاخص‌های تاب آوری و انعطاف‌پذیری

گلنام کریمی^۱ و احمد قاسمی^{۲*}

| اطلاعات مقاله | چکیده |
|---|--|
| <p>نوع مقاله: پژوهشی دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۰۸/۱۱ بازنگری مقاله: ۱۴۰۰/۱۱/۲۵ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۰۱/۱۵</p> | <p>در این پژوهش، مدل‌سازی مدیریت بهینه یک ریزشکه مسکونی با هدف بهبود تاب‌آوری و انعطاف‌پذیری با در نظر گرفتن مسائل اقتصادی ارائه شده است. بر این اساس، یک ریزشکه مسکونی شامل یک نیروگاه خورشیدی کوچک همراه با ذخیره‌ساز انرژی در نظر گرفته شده است که در آن خانه‌ها دارای خودروی الکتریکی می‌باشند. این ریزشکه به شبکه برق سراسری متصل است و دارای زیرساخت شبکه هوشمند است. قطعی شبکه‌ی برق سراسری سبب قطع بارهای الکتریکی و عدم تأمین تقاضای مصرف‌کنندگان و در نتیجه کاهش تاب‌آوری می‌شود. بنابراین، حفظ امنیت سیستم تأمین توان مشترکین در شرایط وقوع این‌گونه اغتشاشات ضروری است. به این منظور در این مقاله یک مدل جدید بهره‌برداری از ریزشکه مبتنی بر نیروگاه خورشیدی و ذخیره‌سازهای انرژی پیشنهاد شده است. کارایی مدل و بهره‌برداری پیشنهادی از طریق محاسبه عددی تاب‌آوری با استفاده از شاخص پیشنهادی در این مقاله ارزیابی می‌شود. علاوه بر این، مدل پیشنهادی سبب بهبود انعطاف‌پذیری سیستم می‌شود. میزان این بهبود با استفاده از شاخص‌های کاربردی و دقیق خودمصرفی و بهره‌وری ذخیره‌سازی ارزیابی می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که مدل پیشنهادی علاوه بر تأمین اهداف اقتصادی، باعث می‌شود تاب‌آوری در ساعات کم‌مصرف و پرمصرف به ترتیب ۴/۷٪ و ۹/۷۵٪ بهبود یابد. همچنین دو شاخص انعطاف‌پذیری شامل خودمصرفی و بهره‌وری ذخیره‌سازی به ترتیب ۹/۱٪ و ۲/۲٪ بهبود می‌یابد.</p> |
| <p>واژگان کلیدی: ریزشکه مسکونی، خودرو الکتریکی، ذخیره‌ساز انرژی، فتوولتائیک، تاب‌آوری، انعطاف‌پذیری.</p> | |

۱- مقدمه

اخیراً با توجه به توسعه شبکه‌های هوشمند و شهرهای هوشمند، مناطق مسکونی به دلیل توسعه کنتورهای هوشمند، به یکی از شرکت‌کنندگان مهم معاملات انرژی در شبکه‌های آینده تبدیل شده‌اند. بخش مسکونی سهم زیادی از کل انرژی مورد نیاز در اکثر کشورها را به خود اختصاص داده است. با توجه به این موضوع ساختمان‌ها این پتانسیل را دارند که نقش کلیدی در شبکه هوشمند آتی برق ایفا کنند؛ زیرا آن‌ها تقریباً ۴۰ درصد مصرف برق را در جهان شامل می‌شوند [۱]. پاسخ به تقاضا براساس ملاحظات

شبکه‌های اطراف و در دسترس بودن منابع انرژی پراکنده امکان‌پذیر می‌شود [۲]. همچنین بهره‌برداری بهینه از سیستم‌های انرژی ترکیبی با در نظر گرفتن اهداف مختلفی نظیر هزینه بهره‌برداری، میزان آلودگی و استفاده گسترده از منابع تجدیدپذیر در این حوزه، مورد توجه بسیاری از جوامع پیشرفته قرار گرفته است [۳]. مرجع [۴]، تصمیماتی را راجع به ترکیب بهینه از منابع فتوولتائیک، سیستم ذخیره‌سازی انرژی مبتنی بر باتری و استراتژی‌های شارژ خودروهای الکتریکی اتخاذ می‌کند. در مرجع [۵]، تقاضای توان وسایل هوشمند خانگی، همچون ماشین‌های

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: aghasemi@jsu.ac.ir

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی جندی شاپور دزفول

۲. استادیار، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی جندی شاپور دزفول

لباس‌شویی و ظرف‌شویی، از طریق جابه‌جایی زمان شروع به کار کنترل می‌شود. مرجع [۶]، به ارائه راهبرد کنترلی در مورد تمامی بارهای قابل کنترل در یک خانه بر اساس تعرفه‌های مبتنی بر زمان استفاده می‌پردازد. آن‌ها را برای کامل ساختن مدل پاسخ‌گویی بار یک ساختمان با هم ترکیب می‌کنند. همچنین مراجع [۷-۹]، هر کدام در مورد برنامه‌ریزی متمرکز پاسخ‌گویی بار برای یک دسته خاص از کاربردها به بحث می‌پردازند. مرجع [۱۰]، به طراحی و ارائه نتایج مدلی با استفاده از داده‌های کنترلهای هوشمند خانگی پرداخته است. در سیستم‌های قدرت، قابلیت اطمینان اغلب مترادف با تاب‌آوری در نظر گرفته می‌شود. اما تفاوت عمده‌ای با تاب‌آوری دارد. توانایی و تحمل یک سیستم قدرت در صورت وقوع قطعی برق معمولی، به‌عنوان قابلیت اطمینان تعریف می‌شود. در صورت قطع برق، معمولاً یک یا دو خطای تصادفی باعث قطع برق می‌شود. برای این منظور چند تکنیک ترمیم بار برای قطع سیستم برق معمولی ارائه شده است [۱۱]. در مواقع بحرانی، قطعی‌های مکرر و طولانی رخ می‌دهند و ممکن است شبکه انتقال و توزیع آسیب ببیند. این امر باعث می‌شود که فرآیند بازسازی در طی بلاهای طبیعی چالش برانگیزتر شود. در مرجع [۱۲]، تکنیک‌های قطع برق معمولی توسعه داده شده است که ممکن است مؤثر نباشد. در مرجع [۱۳]، یک روش جدید همراه با دو شاخص برای ارزیابی تاب‌آوری سیستم قدرت ارائه شده است. مرجع [۱۴]، مدل‌سازی تاب‌آوری انرژی را برای یک خانه هوشمند مورد بررسی قرار می‌دهد. در این مرجع یک مدل برای خانه هوشمند با یک واحد ذخیره‌سازی محلی ارائه شده است و تأثیر استراتژی‌های مختلف استفاده از باتری بر خاصیت تاب‌آوری برای الگوهای مختلف تولید و مصرف بررسی شده است. همچنین در این مرجع از یک مفهوم به‌عنوان "قابلیت باز زیستی" استفاده شده است که از نظر مهندسی برق به معنای احتمال ادامه برق‌رسانی می‌باشد که خود نمودی از تاب‌آور کردن سیستم است؛ این مفهوم وابسته به تولید، تقاضا، ساعت روز و مدت زمان قطعی برق است [۱۴]. مرجع [۱۵]، یک چارچوب بازبازی سرویس توزیع با استفاده از یک مدل بهینه‌سازی پویای چند مرحله‌ای برای دست‌یابی به یک شبکه توزیع تاب‌آور در حضور برنامه پاسخ‌گویی بار به منظور تغییر تقاضا برای بهبود بازبازی سیستم پیشنهاد کرده است. در این مدل بهینه‌سازی مدیریت ریزشبه‌های

مسکونی با در نظر گرفتن سطح آسایش مصرف‌کنندگان و مدیریت بارهای قابل کنترل مانند دستگاه‌های تهویه هوا، خشک‌کن، ذخیره‌ساز انرژی و خودروی الکتریکی انجام شده و با کنترل بار و تغییر تقاضا تأثیر برنامه‌های پاسخ‌گویی بار بر تاب‌آوری شبکه نشان داده شده است [۱۵]. البته در مرجع ذکر شده با وجود استفاده از ذخیره‌ساز برق در ریزشبه‌های مورد نظر، تأثیر وجود ذخیره‌ساز بر بهبود تاب‌آوری مورد بررسی قرار نگرفته، که در صورت در نظر گرفتن این مسئله ارزیابی کامل‌تری می‌توان برای تاب‌آوری شبکه توزیع مورد نظر ارائه داد [۱۵]. با توجه به مرجع [۱۶]، بهبود تاب‌آوری یکی از محرک‌های اصلی برای تغییر شبکه‌های توزیع پسیو به اکتیو است؛ برای پشتیبانی از این تغییر، مرجع ذکر شده یک مدل بهینه‌سازی ریاضی را ارائه می‌کند که به ترکیب مسائل فنی، انعطاف‌پذیری و تاب‌آوری می‌پردازد. تا به امروز، ارزیابی انعطاف‌پذیری سیستم‌های برقی چند مولفه‌ای در ساختمان‌های مسکونی، به دلیل فقدان شاخص‌های مناسب و وجود تفسیرها، ویژگی‌ها و ملاحظات مختلف که توصیف‌کننده یک ساختمان از نظر انرژی انعطاف‌پذیر هستند، دچار وقفه شده است؛ مرجع [۱۷]، به این شکاف علمی می‌پردازد و یک چارچوب پایه برای اندازه‌گیری انعطاف‌پذیری انرژی معرفی می‌کند. عدم شباهت بین تعاریف مختلف از انعطاف‌پذیری ساختمان، در کنار چارچوب‌های مختلف سنجش آن، تنوع در تفاسیر این مفاهیم را به دنبال دارد. در مرجع ذکر شده، انعطاف‌پذیری ساختمان به قابلیت ساختمان برای تغییر تقاضا، استراتژی‌های بعدی و شاخص‌های به‌کار رفته برای سنجش انعطاف‌پذیری ربط داده شده است [۱۷]. به‌عبارت دیگر توانایی مدیریت تولید و تقاضا مطابق شرایط جوی محلی، نیازهای کاربر و ملاحظات شبکه است [۱۷]. لذا انعطاف‌پذیری انرژی ساختمان امکان کنترل بار و مدیریت سمت تقاضا را فراهم می‌سازد [۱۷]. اما نکته‌ی حائز اهمیت این است که در پژوهش‌های ارزشمند ذکر شده، محاسبه‌ی میزان بهبود تاب‌آوری و انعطاف‌پذیری با استفاده از شاخص‌های دقیق و عددی انجام نشده است. با توجه به مسئله استفاده از انرژی‌های نو محاسبه دقیق این شاخص‌ها در استراتژی‌های مختلف و ارائه یک مدل مناسب برای اندازه‌گیری آن‌ها اهمیت زیادی دارد. لذا در این مقاله هدف این است که شاخص‌های تاب‌آوری و انعطاف‌پذیری

۲- مفهوم تاب‌آوری و انعطاف‌پذیری

هر گروه تحقیقاتی با توجه به زمینه‌ی مورد مطالعه تعریف‌های مختلفی برای تاب‌آوری و انعطاف‌پذیری ارائه داده است که در ادامه به مهم‌ترین آن‌ها پرداخته شده است.

۲-۱- تاب‌آوری^۱

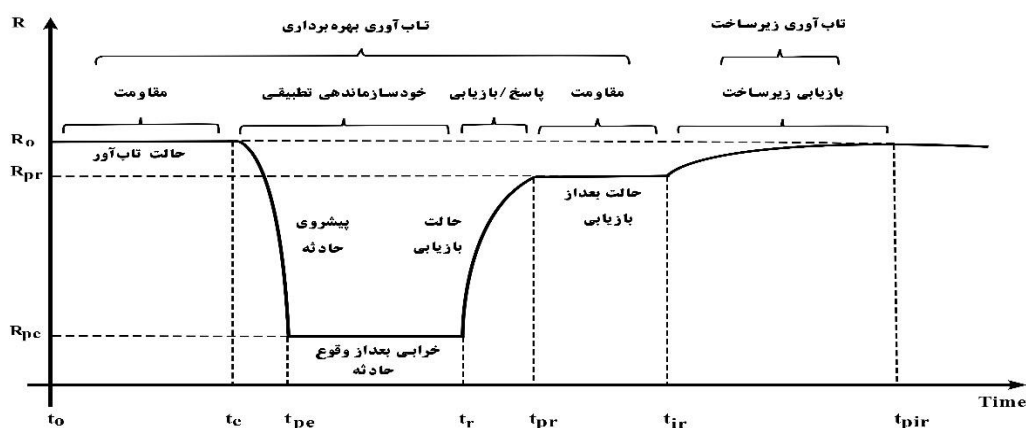
طبق تعریفی از مرکز تحقیقات انرژی بریتانیا، تاب‌آوری عبارت است از ظرفیت یک سیستم انرژی برای تحمل کردن اغتشاشات و ادامه فرآیند تحویل انرژی به مصرف‌کنندگان، به طوری که یک سیستم انرژی تاب‌آور می‌تواند به سرعت از اغتشاشات بازگشته و ابزارهای جایگزینی را به منظور تأمین خدمات انرژی در شرایط وقوع رویداد و تغییر وضعیت فراهم کند [۱۸].

به منظور تشریح مفهوم تاب‌آوری، منحنی تاب‌آوری در شکل (۱) نشان داده شده است. همان‌طور که مشخص است سطح تاب‌آوری در مقابل یک پدیده غیرمترقبه تابعی از زمان می‌باشد. مطابق شکل، قبل از وقوع حادثه در زمان t_e سیستم قدرت باید تاب‌آوری کافی برای ایستادگی در برابر اغتشاشات اولیه را داشته باشد که در اینجا با R_0 نشان داده شده است. R معیاری مناسب جهت ارزیابی تاب‌آوری می‌باشد [۱۲].

به صورت دقیق با در نظر گرفتن مسائل اقتصادی بهره‌برداری از ریزشبکه مسکونی انجام پذیرد. بنابراین نوآوری‌های این مقاله به شرح زیر است.

- ارائه یک مدل جدید بهره‌برداری از ریزشبکه مسکونی شامل خانه‌های با پروفیل بار متفاوت دارای خودروی الکتریکی و امکان مبادله‌ی دوطرفه برق خانه‌ها با یکدیگر و با شبکه‌ی بالا دست.
- محاسبه دقیق و عددی میزان بهبود شاخص‌های تاب‌آوری و انعطاف‌پذیری در شرایط بهره‌برداری مختلف و ارائه یک مدل مناسب برای محاسبه‌ی آن‌ها با در نظر گرفتن مسائل اقتصادی.

مدل‌سازی ارائه شده در این مقاله به یک مسئله MILP منجر شده است که با استفاده از نرم افزار GAMS حل شده است. ادامه مقاله به شرح زیر می‌باشد: در بخش ۲، مفهوم تاب‌آوری و انعطاف‌پذیری بیان شده است. در بخش ۳، معماری ریزشبکه مسکونی پیشنهادی ارائه شده است. در بخش ۴، فرمول‌بندی مسئله پیشنهادی بررسی شده است. در بخش ۵، شبیه‌سازی و نتایج در شرایط مختلف بهره‌برداری ریزشبکه مسکونی، با استفاده از شاخص‌های تاب‌آوری و انعطاف‌پذیری به تفصیل بررسی و مقایسه شده است. در پایان، نتیجه‌گیر نهایی و پیشنهادات، ارائه شده است.



شکل ۱ - منحنی مفهومی تاب‌آوری سیستم قدرت در برابر یک حادثه غیرمترقبه [۱۲]

مرحله از حادثه می‌باشد. این مشخصه انعطاف‌پذیری بهره‌برداری که برای تطبیق پیدا کردن سیستم با شرایط پیش آمده ضروری است، را فراهم می‌کند. علاوه بر این، این مشخصه به حداقل رساندن خرابی بعد از وقوع حادثه

هنگام وقوع حادثه غیرمترقبه، سیستم وارد حالت خرابی بعد از وقوع حادثه می‌شود، به طوری که تاب‌آوری سیستم در این مرحله به شدت کاهش می‌یابد (R_{pe}). خودسازمان‌دهی تطبیقی مشخصه‌ی تاب‌آوری در این

¹ Resiliency

بازیابی اولیه می‌باشد، یعنی $(t_{pr} - t_r) > (t_{pir} - t_{pr})$. این مسئله می‌تواند وابسته به شدت حادثه یا مشخصه‌های تاب‌آوری که سیستم قبل، در حین و بعد از حادثه نشان می‌دهد، باشد [۱۲].

به‌منظور مقایسه‌ای بین پژوهش‌ها در زمینه تاب‌آوری جدول ۱ ارائه شده است که به‌طور مختصر جنبه‌های نوآوری مقاله حاضر در زمینه تاب‌آوری با پژوهش‌های پیشین تحلیل و بررسی شده است.

$(R_0 - R_{pe})$ ، قبل از شروع فرآیند بازیابی در زمان t_r کمک می‌کند. سیستم در ادامه وارد حالت بازیابی می‌شود، که در آن باید ظرفیت ضروری برای پاسخ و بازیابی اولیه صورت گیرد، و سیستم وارد حالت بعد از بازیابی می‌شود. سطح تاب‌آوری بعد از بازیابی اولیه (R_{pr}) می‌تواند کم‌تر یا مساوی سطح تاب‌آوری قبل از حادثه باشد، یعنی $R_{pr} \leq R_0$. از سوی دیگر زمان مورد نیاز سیستم برای بازیابی کامل به حالت بهره‌برداری قبل از وقوع حادثه، بیشتر از زمان

جدول ۱- مقایسه‌ای بین پژوهش‌ها در زمینه تاب‌آوری

| روش و ملاحظات | بررسی شاخص‌های تاب‌آوری | برنامه‌ریزی تاب‌آور | محاسبه عددی تاب‌آوری | معیارهای اقتصادی | بررسی انعطاف‌پذیری | سال انتشار | مرجع |
|--|-------------------------|---------------------|----------------------|------------------|--------------------|------------|------------|
| تحلیل و بررسی مفهوم تاب‌آوری | ✓ | - | - | - | - | ۲۰۱۶ | [۱۹] |
| معیار تاب‌آوری برای کاهش بارهای تأمین نشده | ✓ | - | - | ✓ | - | ۲۰۱۸ | [۲۰] |
| تاثیر سیستم‌های ذخیره‌ساز بر افزایش تاب‌آوری | ✓ | - | - | - | - | ۲۰۲۰ | [۲۱] |
| برنامه‌ریزی تولید تاب‌آور منابع انرژی تجدیدپذیر | ✓ | ✓ | - | - | - | ۲۰۲۰ | [۲۲] |
| شاخص‌های احتمالاتی برای ارزیابی تاب‌آوری | ✓ | - | - | - | - | ۲۰۲۰ | [۲۳] |
| تاب‌آوری در برابر حمله‌های سایبری | ✓ | - | - | - | - | ۲۰۲۰ | [۲۴] |
| یک شبکه توزیع تاب‌آور | ✓ | - | - | ✓ | - | ۲۰۲۲ | [۲۵] |
| ارائه یک مدل مناسب و محاسبه عددی تاب‌آوری با استفاده از شاخص قطع بار | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ۲۰۲۲ | مقاله حاضر |

تا به تغییرات تقاضای شبکه پاسخ دهد [۲۶].

۳- معماری ریزشبه مسکونی

نمایی از ساختار ریزشبه مسکونی پیشنهاد شده در این مقاله در شکل (۲) نشان داده شده است که شامل سه خانه A، B و C است. برای هر خانه یک خودروی الکتریکی در

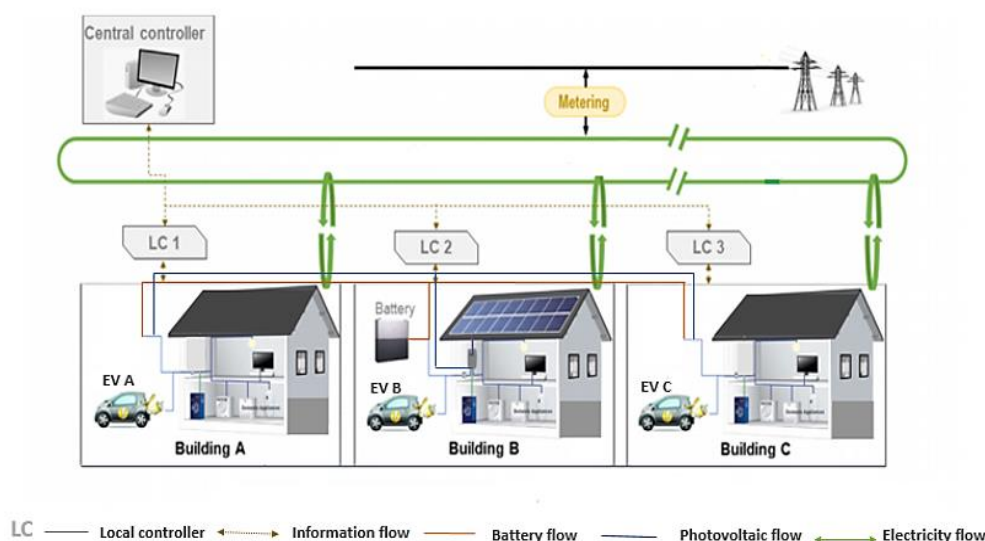
۲-۲- انعطاف‌پذیری^۱

تعریف‌ها در مورد انعطاف‌پذیری مختلف بوده و هر گروه تحقیقاتی تعریف خاص خود را با توجه به زمینه‌ی مورد مطالعه ارائه داده است. اما در تعریف کلی، انعطاف‌پذیری قابلیت سیستم جهت بهره‌برداری از منابع تعریف می‌شود

^۱ Flexibility

همچنین اقدامات لازم جهت افزایش انعطاف‌پذیری مورد بررسی قرار گرفت. استفاده از نیروگاه خورشیدی و دشارژ باتری آن و دشارژ باتری خودروی الکتریکی موجب کاهش قطع بار^۱ و کاهش خسارات ناشی از خاموشی‌های طولانی مدت و در نتیجه بهبود تاب‌آوری شده است. لذا می‌توان گفت استفاده از موارد گفته شده موجب افزایش خودمصرفی^۲ و بهره‌وری ذخیره‌سازی^۳ و در نتیجه بهبود انعطاف‌پذیری نیز می‌شود. تمامی موارد گفته شده در نهایت می‌توانند موجب کاهش صورت‌حساب برق مشترکین شوند.

نظر گرفته شده است. سقف خانه B مجهز به نیروگاه خورشیدی همراه با ذخیره‌ساز است که از آن برای دو خانه دیگر انشعاب گرفته شده است. علاوه بر این هر خانه می‌تواند در زمانی که خودروی الکتریکی در خانه است از دشارژ آن برای پوشش بخشی از بار خود استفاده کند یا به خانه‌های دیگر و شبکه بفروشد. یکی از جنبه‌های حیاتی مدیریت انرژی، تأمین امنیت سیستم و افزایش تاب‌آوری شبکه در زمان وقوع اغتشاشات است. به همین منظور در این مقاله تاب‌آوری سیستم در زمان قطعی شبکه‌ی برق سراسری در ساعات کم‌مصرف و پرمصرف مورد مطالعه قرار گرفته است.



شکل ۲- نمایی از ساختار ریزشبکه مسکونی پیشنهادی در این مقاله

۴- فرمول‌بندی مسئله پیشنهادی

در این بخش، مدل‌سازی ریزشبکه و محاسبه شاخص‌های تاب‌آوری و انعطاف‌پذیری ارائه شده است.

۴-۱- تابع هدف

تابع هدف این پژوهش که در (۱) بیان شده، به حداقل رساندن صورت‌حساب برق کل ریزشبکه مسکونی در سراسر افق برنامه‌ریزی، به‌عنوان مثال یک شبانه‌روز است. همچنین در این رابطه صورت‌حساب برق ریزشبکه مسکونی از سه عبارت شامل صورت‌حساب برق خانه A، صورت‌حساب برق خانه B و صورت‌حساب برق خانه C تشکیل شده است. معادله (۲) مربوط به صورت‌حساب برق خانه A است که از پنج عبارت تشکیل شده است.

$$\text{Min } Eb = Eb_A + Eb_B + Eb_C \quad (1)$$

$$Eb_A = Cbuy_{g,A} + Cbuy_{m,A} - Csell_{g,A} - Csell_{m,A} - C_{IL,A} \quad (2)$$

$$Cbuy_{g,A} = \sum_t P_{g,t}^A \cdot Cbuy_t^g \quad (3)$$

$$Cbuy_{m,A} = \sum_t \left(\frac{P_t^{ev,s,BA} + P_t^{ev,s,CA}}{P_t^{ess,s,BA} + P_t^{ess,s,CA}} \right) \times C_t^m \quad (4)$$

$$Csell_{g,A} = \sum_t P_t^{ev,sg,A} \cdot Csell_t^g \quad (5)$$

$$Csell_{m,A} = \sum_t (P_t^{ev,sm,A} + P_t^{ess,s,A}) \times C_t^m \quad (6)$$

$$C_{IL,A} = \sum_t P_t^{in,A} \cdot C_t^{II} \quad (7)$$

اولین عبارت $Cbuy_{g,A}$ ، که در (۳) تعریف شده است، به

³ Storage efficiency

¹ Load shedding

² Self - consumption

خورشیدی برای پوشش بخشی از بار ریزشبه است؛ میانگرمیزان توان شارژ باتری نیروگاه خورشیدی توسط $P_t^{ess, ch}$ پنل‌ها است؛ P_t^{res} میزان توان خروجی نیروگاه خورشیدی است؛ T^a زمان طلوع خورشید و T^b زمان غروب خورشید است. همچنین برای ذخیره‌ساز نیروگاه خورشیدی از مرجع [۲۸]، استفاده شده است.

۴-۳- قیود تعادل مصرف در ریزشبه

معادله (۹) نشان می‌دهد هر سه خانه سهم یکسانی در استفاده از نیروگاه خورشیدی دارند.

$$\sum_t P_t^{pv, u, A} = \sum_t P_t^{pv, u, B} = \sum_t P_t^{pv, u, C}, \forall t \in [T^a, T^b] \quad (9)$$

که در آن $P_t^{pv, u, A}$ ، $P_t^{pv, u, B}$ و $P_t^{pv, u, C}$ بیانگر میزان توان استفاده شده از نیروگاه خورشیدی برای پوشش بخشی از بار خانه A، B و C است.

همچنین هر سه خانه سهم یکسانی در شارژ (۱۰) و دشارژ (۱۱) ذخیره‌ساز نیروگاه خورشیدی دارند.

$$\sum_t P_t^{ess, ch, A} = \sum_t P_t^{ess, ch, B} = \sum_t P_t^{ess, ch, C}, \forall t \in [T^a, T^b] \quad (10)$$

$$\sum_t P_t^{ess, d, A} = \sum_t P_t^{ess, d, B} = \sum_t P_t^{ess, d, C} \quad (11)$$

که در آن‌ها $P_t^{ess, ch, A}$ ، $P_t^{ess, ch, B}$ و $P_t^{ess, ch, C}$ میزان سهم خانه A، B و C در شارژ باتری نیروگاه خورشیدی است؛ $P_t^{ess, d, A}$ ، $P_t^{ess, d, B}$ و $P_t^{ess, d, C}$ میزان سهم خانه A، B و C از دشارژ باتری نیروگاه خورشیدی است.

هر خانه می‌تواند سهم خود از ذخیره‌ساز نیروگاه خورشیدی را خودش استفاده کند یا با خانه‌های دیگر مبادله کند (۱۲-۱۴).

$$\sum_t P_t^{ess, d, A} = \sum_t P_t^{ess, u, A} + \sum_t P_t^{ess, s, AB} + \sum_t P_t^{ess, s, AC} \quad (12)$$

$$\sum_t P_t^{ess, d, B} = \sum_t P_t^{ess, u, B} + \sum_t P_t^{ess, s, BA} + \sum_t P_t^{ess, s, BC} \quad (13)$$

$$\sum_t P_t^{ess, d, C} = \sum_t P_t^{ess, u, C} + \sum_t P_t^{ess, s, CA} + \sum_t P_t^{ess, s, CB} \quad (14)$$

که در آن‌ها $P_t^{ess, u, A}$ ، $P_t^{ess, u, B}$ و $P_t^{ess, u, C}$ میزان توان استفاده شده از باتری نیروگاه خورشیدی توسط خانه A، B و C است؛ $P_t^{ess, s, AB}$ و $P_t^{ess, s, CB}$ توان فروخته شده از سهم باتری نیروگاه خورشیدی خانه A و C به خانه B است؛ $P_t^{ess, s, AC}$ و $P_t^{ess, s, BC}$ توان فروخته شده از سهم باتری

هزینه خرید برق خانه A از شبکه اشاره می‌کند. $P_t^{g, A}$ بیانگر میزان توان خریداری شده از شبکه توسط خانه A است؛ $Cbuy_t^{m, A}$ هزینه خرید برق از شبکه است. دومین عبارت $Cbuy_t^{m, A}$ ، که در (۴) تعریف شده است، به هزینه خرید برق خانه A از دو خانه دیگر اشاره می‌کند. $P_t^{ev, s, BA}$ و $P_t^{ev, s, CA}$ بیانگر توان فروخته شده از باتری خودروی B و C به خانه A است؛ $P_t^{ess, s, BA}$ و $P_t^{ess, s, CA}$ توان فروخته شده از سهم باتری نیروگاه خورشیدی خانه B و C به خانه A است؛ C_t^m هزینه مبادله‌ی برق در ریزشبه است. سومین عبارت $Csell_t^{g, A}$ ، که در (۵) تعریف شده است، به هزینه فروش برق خانه A به شبکه اشاره می‌کند. $P_t^{ev, sg, A}$ بیانگر میزان توان فروخته شده از دشارژ خودروی A به شبکه است؛ $Csell_t^{s, A}$ هزینه فروش برق به شبکه است. چهارمین عبارت $Csell_t^{m, A}$ ، که در (۶) تعریف شده است، به هزینه فروش برق خانه A به دو خانه دیگر اشاره می‌کند. $P_t^{ev, sm, A}$ بیانگر میزان توان فروخته شده از باتری خودروی A به دو خانه دیگر است؛ $P_t^{ess, s, A}$ میزان توان فروخته شده توسط خانه A از سهم باتری نیروگاه خورشیدی به دو خانه دیگر است. پنجمین عبارت $C_{ll, A}$ ، که در (۷) تعریف شده است، به هزینه میزان توان قطع شده اختیاری توسط کاربر خانه A اشاره دارد. $P_t^{in, A}$ بیانگر میزان توان قطع شده توسط کاربر خانه A است؛ C_t^H هزینه قطع بار اختیاری است. صورت حساب برق خانه B و C به صورت مشابه با استفاده از همین معادلات تعریف می‌شود.

۴-۲- مدل‌سازی ریزشبه مسکونی

در این مقاله مدل‌سازی ریزشبه مسکونی شامل مدل‌سازی بار هر خانه و خودروی آن و همچنین مدل‌سازی نیروگاه خورشیدی و ذخیره‌ساز آن است. براساس استراتژی‌های مختلف پاسخ‌گویی بار، بارهای مربوط به هر خانه به سه دسته که عبارت‌اند از بار قابل قطع، بار قابل تنظیم و بار قابل تغییر تقسیم شده‌اند. برای مدل‌سازی بارهای هر خانه از مرجع [۲۷]، استفاده شده است. همچنین برای مدل‌سازی خودروی الکتریکی هر خانه از مرجع [۲۸]، استفاده شده است. مدل‌سازی نیروگاه خورشیدی در (۸) تعریف شده است.

$$P_t^{pv, u} + P_t^{ess, ch} = P_t^{res}, \forall t \in [T^a, T^b] \quad (8)$$

که در آن $P_t^{pv, u}$ بیانگر میزان توان استفاده شده از نیروگاه

شده از باتری نیروگاه خورشیدی برای پوشش بخشی از بار ریزشبه است؛ $P_t^{ev, \mu, B}$ و $P_t^{ev, \mu, C}$ میزان توان استفاده شده از باتری خودروی الکتریکی B و C توسط خانه B و C است؛ $P_t^{ev, sm, A}$ ، $P_t^{ev, sm, B}$ و $P_t^{ev, sm, C}$ میزان توان فروخته شده از دشارژ خودروی A، B و C به دو خانه دیگر است؛ $P_t^{Load, C}$ و $P_t^{Load, B}$ مجموع بار قابل قطع، قابل تغییر و قابل تنظیم مربوط به خانه B و C است؛ $P_t^{ev, ch, C}$ و $P_t^{ev, ch, B}$ میزان توان شارژ خودروی B و C است.

۴-۵- شاخص‌ها

در این قسمت شاخص‌های کاربردی و دقیق برای محاسبه عددی تاب‌آوری و انعطاف‌پذیری ریزشبه مسکونی در شرایط بهره‌برداری مختلف بیان شده است.

۴-۵-۱- شاخص تاب‌آوری

در مدل پیشنهادی قطعی شبکه برق برای ریزشبه مسکونی در نظر گرفته شده و تأثیر مشارکت ذخیره‌سازها بر قطع بار و تاب‌آوری سیستم مورد بررسی قرار می‌گیرد. تاب‌آوری سیستم را می‌توان به صورت (۱۷) تعیین کرد:

$$Resilience = \int_{t_0}^{t_1} [Q_0(t) - Q_1(t)] dt \quad (17)$$

این شاخص برای ارزیابی تاب‌آوری کلی سیستم تحت یک اختلال خاص مورد استفاده قرار می‌گیرد. $Q_0(t)$ بیانگر تاملین بار در حالت عادی است. $Q_1(t)$ مقدار بار قطع شده پس از قطعی شبکه برق در بازه زمانی $[t_0, t_1]$ است.

۴-۵-۲- شاخص انعطاف‌پذیری

استفاده از منابع سمت تقاضا همراه با تجهیزات ذخیره‌سازی می‌توانند به‌طور قابل توجهی نگرانی ناشی از افزایش منابع تجدیدپذیر را در یک ریزشبه کاهش دهند [۲۹]. به‌طور کلی ذخیره‌سازهای انرژی و خودروهای الکتریکی دارای پاسخ سریع و متوسط بوده و گزینه‌ی مناسبی برای افزایش شاخص انعطاف‌پذیری هستند [۳۰].

در این پژوهش دو شاخص انعطاف‌پذیری برای محاسبه خودمصرفی و بهره‌وری ذخیره‌سازی ریزشبه مسکونی بیان شده است.

معادله (۱۸) شاخص یک انعطاف‌پذیری مربوط به خودمصرفی ریزشبه مسکونی و (۱۹) مربوط به خودمصرفی خانه A، B و C است.

نیروگاه خورشیدی خانه A و B به خانه C است. مراحل مدل‌سازی پیشنهادی برای بهینه‌سازی ریزشبه مسکونی در شکل (۳) نشان داده شده است.



شکل ۳- مراحل مدل‌سازی پیشنهادی برای بهینه‌سازی ریزشبه مسکونی

۴-۴- تعادل توان

تعادل برق خانه A در (۱۵) تعریف شده است. تعادل برق برای خانه‌های B و C به‌صورت مشابه با استفاده از همین معادله تعریف می‌شود.

$$P_t^{g, A} + P_t^{pv, \mu, A} + P_t^{ess, \mu, A} + P_t^{ess, s, BA} + P_t^{ess, s, CA} + P_t^{ev, \mu, C} + P_t^{ev, s, BA} + P_t^{ev, s, CA} = P_t^{Load, A} + P_t^{ev, ch, A} + P_t^{ev, ch, A} \quad (15)$$

که در آن $P_t^{ev, \mu, A}$ میزان توان استفاده شده از باتری خودروی الکتریکی A توسط خانه A است؛ $P_t^{Load, A}$ مجموع بار قابل قطع، قابل تغییر و قابل تنظیم مربوط به خانه A است؛ $P_t^{ev, ch, A}$ میزان توان شارژ خودروی A است. همچنین تعادل برق ریزشبه مسکونی در (۱۶) تعریف شده است.

$$P_t^{g, A} + P_t^{g, B} + P_t^{g, C} + P_t^{pv, \mu} + P_t^{ess, \mu} + P_t^{ess, s} + P_t^{ev, \mu, A} + P_t^{ev, \mu, B} + P_t^{ev, \mu, C} + P_t^{ev, sm, A} + P_t^{ev, sm, B} + P_t^{ev, sm, C} = P_t^{Load, A} + P_t^{Load, B} + P_t^{Load, C} + P_t^{ev, ch, A} + P_t^{ev, ch, B} + P_t^{ev, ch, C} + P_t^{ess, ch} \quad (16)$$

که در آن $P_t^{g, C}$ و $P_t^{g, B}$ بیانگر میزان توان خریداری شده از شبکه توسط خانه B و C است؛ $P_t^{ess, \mu}$ میزان توان استفاده

B و C است.

$$C_{\max} = \sum_t (P_t - P_t^{res}) \quad (20)$$

$$\begin{cases} C_{\max,A} = \sum_t (P_t^A - P_t^{res,A}) \\ C_{\max,B} = \sum_t (P_t^B - P_t^{res,B}) \\ C_{\max,C} = \sum_t (P_t^C - P_t^{res,C}) \end{cases} \quad (21)$$

که در آن‌ها P_t^A, P_t^B, P_t^C بیانگر کل بار مربوط به ریزشبكة، خانه A، B و C است.

شاخص دوم انعطاف‌پذیری، درصد پتانسیل انعطاف‌پذیری (بهره‌وری ذخیره‌سازی) ریزشبكة در (۲۲) و درصد پتانسیل انعطاف‌پذیری خانه A، B و C در (۲۳) بیان شده است. برای تعریف این شاخص از (۲۰) و (۲۱) استفاده شده است.

$$C = \left(\sum_t P_t^{ess,d} + \sum_{T^{n,A}} (P_t^{ev,d,A} - P_t^{ev,sg,A}) + \sum_{T^{n,B}} (P_t^{ev,d,B} - P_t^{ev,sg,B}) + \sum_{T^{n,C}} (P_t^{ev,d,C} - P_t^{ev,sg,C}) \right) / \sum_t (P_t - P_t^{res}) \quad (22)$$

$$\begin{cases} C_A = \left(\sum_t (P_t^{ess,\mu,A} + P_t^{ess,s,BA} + P_t^{ess,s,CA}) + \sum_{T^{n,A}} P_t^{ev,\mu,A} + \sum_{T^{n,B}} P_t^{ev,s,BA} + \sum_{T^{n,C}} P_t^{ev,s,CA} \right) / \sum_t (P_t^A - P_t^{res,A}) \\ C_B = \left(\sum_t (P_t^{ess,\mu,B} + P_t^{ess,s,AB} + P_t^{ess,s,CB}) + \sum_{T^{n,B}} P_t^{ev,\mu,B} + \sum_{T^{n,A}} P_t^{ev,s,AB} + \sum_{T^{n,C}} P_t^{ev,s,CB} \right) / \sum_t (P_t^B - P_t^{res,B}) \\ C_C = \left(\sum_t (P_t^{ess,\mu,C} + P_t^{ess,s,AC} + P_t^{ess,s,BC}) + \sum_{T^{n,C}} P_t^{ev,\mu,C} + \sum_{T^{n,A}} P_t^{ev,s,AC} + \sum_{T^{n,B}} P_t^{ev,s,BC} \right) / \sum_t (P_t^C - P_t^{res,C}) \end{cases} \quad (23)$$

شرایط بهره‌برداری مختلف، با استفاده از شاخص‌های مذکور به تفصیل با یکدیگر مقایسه شده است.

۵-۱- اطلاعات

ریزشبكة مسکونی مربوطه در طی یک شبانه‌روز (یک روز معمولی تابستانی) مورد مطالعه قرار گرفته است. همچنین هر خانه مجهز به یک کنترل‌کننده محلی متصل به بار است [۳۱]. ظرفیت نیروگاه خورشیدی با توان تولیدی حداکثر ۴ کیلووات بر ساعت، همراه با ذخیره‌ساز ۴ کیلووات اصلی در شکل (۴)، بار روشنایی اصلی در شکل (۵)، قیمت‌های ساعتی برق در شکل (۶) و توان خروجی نیروگاه خورشیدی در شکل (۷) نشان داده شده است. همچنین اطلاعات مربوط به خودروها و ذخیره‌ساز نیروگاه خورشیدی در جدول ۲ ارائه شده است. قابل ذکر است که طرح پیشنهادی ریزشبكة مسکونی به‌عنوان یک مسئله MILP فرموله شده و در کم‌تر از یک دقیقه پس از

$$SC = \sum_t P_t^{res} / \sum_t (P_t^{res} + P_t^{g,A}) \quad (18)$$

$$\begin{cases} SC_A = \sum_t P_t^{res,A} / \sum_t (P_t^{res,A} + P_t^{g,A}) \\ SC_B = \sum_t P_t^{res,B} / \sum_t (P_t^{res,B} + P_t^{g,B}) \\ SC_C = \sum_t P_t^{res,C} / \sum_t (P_t^{res,C} + P_t^{g,C}) \end{cases} \quad (19)$$

که در آن‌ها $P_t^{res,A}, P_t^{res,B}, P_t^{res,C}$ بیانگر میزان توان خروجی نیروگاه خورشیدی برای پوشش بار خانه A، B و C است؛ $P_t^{g,A}, P_t^{g,B}, P_t^{g,C}$ میزان توان خریداری شده از شبکه توسط ریزشبكة است.

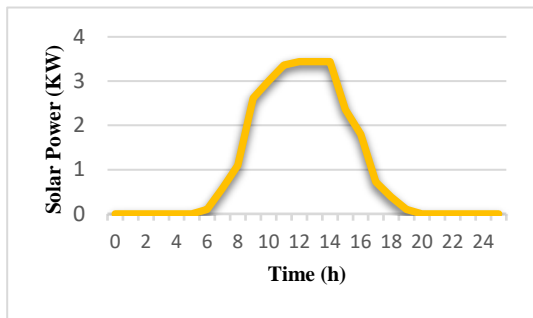
معادله (۲۰) مربوط به پتانسیل انعطاف‌پذیری حداکثری (ظرفیت ذخیره حداکثری) ریزشبكة مسکونی و (۲۱) مربوط به پتانسیل انعطاف‌پذیری حداکثری خانه A،

که در آن‌ها $P_t^{ess,d}$ بیانگر میزان دشارژ باتری نیروگاه خورشیدی است؛ $P_t^{ev,d,A}, P_t^{ev,d,B}, P_t^{ev,d,C}$ میزان توان دشارژ خودروی A، B و C است؛ $P_t^{ev,sg,A}, P_t^{ev,sg,B}, P_t^{ev,sg,C}$ میزان توان فروخته شده از دشارژ خودروی A، B و C به شبکه است؛ $P_t^{ev,s,AB}, P_t^{ev,s,CB}$ توان فروخته شده از باتری خودروی A و C به خانه B است؛ $P_t^{ev,s,AC}$ و $P_t^{ev,s,BC}$ توان فروخته شده از باتری خودروی A و B به خانه C است؛ $T^{n,A}, T^{n,B}, T^{n,C}$ زمان رسیدن خودروی A، B و C به خانه است؛ $T^{m,A}, T^{m,B}, T^{m,C}$ زمان خروج خودروی A، B و C از خانه است.

۵- شبیه‌سازی و نتایج

در ادامه این پژوهش، روش بهینه‌سازی و محاسبه شاخص‌های تاب‌آوری و انعطاف‌پذیری که در قسمت قبل بیان شده است، در بستر ریزشبكة مسکونی پیشنهادی پیاده‌سازی و بررسی شده است. در نهایت نتایج حاصل در

است.



شکل ۷ - توان خروجی نیروگاه خورشیدی

جدول ۲- اطلاعات مربوط به خودروها و ذخیره‌ساز نیروگاه خورشیدی

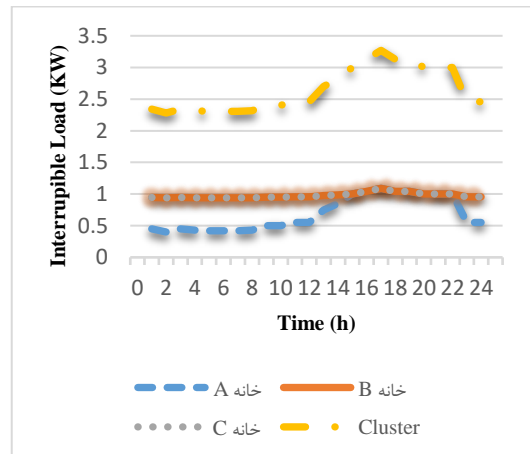
| پارامتر | خودرو A | خودرو B | خودرو C | ذخیره‌ساز نیروگاه خورشیدی |
|------------------------|---------|---------|---------|---------------------------|
| ساعت ورود به خانه | ۲۲ | ۱۶ | ۸ | - |
| ساعت خروج از خانه | ۷ | ۷ | ۱۹ | - |
| حداکثر حالت شارژ (KWh) | ۱۶ | ۱۶ | ۱۶ | ۴ |
| حداقل حالت شارژ (KWh) | ۴/۸ | ۴/۸ | ۴/۸ | ۰/۸ |
| حالت اولیه شارژ (KWh) | ۸ | ۸ | ۸ | ۲ |
| بازده شارژ (%) | ۰/۹۵ | ۰/۹۵ | ۰/۹۵ | ۰/۹۵ |
| بازده دشارژ (%) | ۰/۹۵ | ۰/۹۵ | ۰/۹۵ | ۰/۹۵ |
| نرخ شارژ (KW) | ۳/۳ | ۳/۳ | ۳/۳ | ۰/۸ |
| نرخ دشارژ (KW) | ۳/۳ | ۳/۳ | ۳/۳ | ۰/۸ |

۵-۲-۱- مطالعات موردی تاب‌آوری

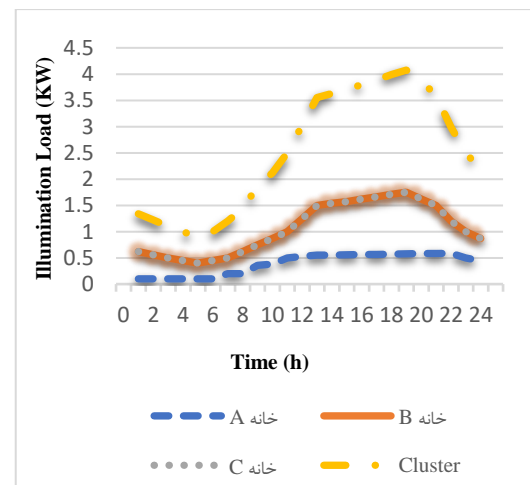
در قسمت قبل گفته شده که قطعی شبکه‌ی برق سراسری باعث قطع بارهای الکتریکی و در نتیجه کاهش تاب‌آوری می‌شود. در این خصوص مقایسه عددی تاب‌آوری با استفاده از شاخص قطع بار در چهار نمونه مطالعاتی زیر و در دو سناریو مورد بررسی قرار گرفت. سناریو یک مربوط به قطعی شبکه از ساعت ۲۳ تا ۴ (ساعت کم‌مصرف)، سناریو دو مربوط به قطعی شبکه از ساعت ۹ تا ۱۴ (ساعت پرمصرف) است.

- نمونه مطالعاتی ۱: خودروهای الکتریکی فقط شارژ می‌شوند، نیروگاه خورشیدی بدون باتری است.

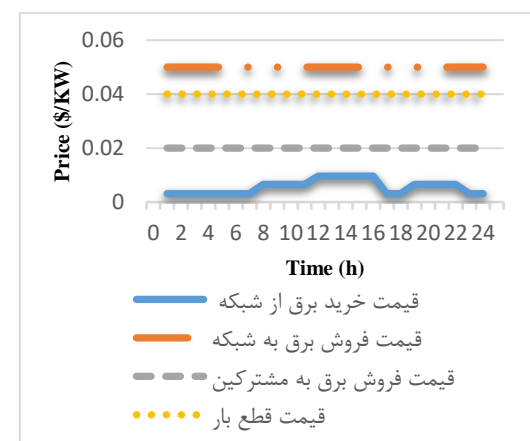
اجرای یک کامپیوتر Corei5، 3.4GHz، 8GB با رم توسط نرم‌افزار GAMS و حل‌کننده CPLEX حل شده است.



شکل ۴- بار قابل قطع اصلی



شکل ۵- بار روشنایی اصلی



شکل ۶- قیمت ساعتی برق

۵-۲-۲- مطالعات موردی

محاسبه عددی تاب‌آوری و انعطاف‌پذیری در شرایط بهره‌برداری مختلف در ۴ نمونه مطالعاتی ارزیابی شده

جدول ۳- نتایج تاب‌آوری و قطع بار در چهار نمونه مطالعاتی مربوط به سناریو یک

| نمونه مطالعاتی | خانه | قطع بار (KWh) | تاب‌آوری (KWh) | تاب‌آوری (%) |
|----------------|---------|---------------|----------------|--------------|
| ۱ | A | ۵/۷۵۹ | - | - |
| | B | ۹/۸۶۸ | - | - |
| | C | ۹/۰۶۸ | - | - |
| | Cluster | ۲۴/۶۹۵ | ۲۶۵/۳۴۵ | ٪۹۱/۴۸ |
| ۲ | A | ۴/۹۰۹ | - | - |
| | B | ۷/۸۰۸ | - | - |
| | C | ۸/۵۵۷ | - | - |
| | Cluster | ۲۱/۲۷۴ | ۲۷۲/۳۶۲ | ٪۹۲/۷۵ |
| ۳ | A | ۲/۳۱۹ | - | - |
| | B | ۶/۶۲۸ | - | - |
| | C | ۹/۶۶۸ | - | - |
| | Cluster | ۱۸/۶۱۵ | ۲۷۱/۱۶۵ | ٪۹۳/۵۷ |
| ۴ | A | ۱/۵۱۷ | - | - |
| | B | ۵/۶۱۳ | - | - |
| | C | ۸/۰۶۴ | - | - |
| | Cluster | ۱۵/۱۹۴ | ۲۷۸/۳۷۶ | ٪۹۴/۸۲ |

جدول ۴- نتایج تاب‌آوری و قطع بار در چهار نمونه مطالعاتی مربوط به سناریو دو

| نمونه مطالعاتی | خانه | قطع بار (KWh) | تاب‌آوری (KWh) | تاب‌آوری (%) |
|----------------|---------|---------------|----------------|--------------|
| ۱ | A | ۱۳/۴۵۶ | - | - |
| | B | ۱۹/۴۴۳ | - | - |
| | C | ۱۶/۵۸۳ | - | - |
| | Cluster | ۴۹/۴۸۲ | ۲۴۰/۵۵۸ | ٪۸۲/۹۳ |
| ۲ | A | ۱۳/۶۳۵ | - | - |
| | B | ۱۷/۶۸۹ | - | - |
| | C | ۱۵/۶۸۱ | - | - |
| | Cluster | ۴۷/۰۰۵ | ۲۴۶/۶۳۱ | ٪۸۳/۹۹ |
| ۳ | A | ۱۳/۵۷۶ | - | - |
| | B | ۱۶/۲۸۳ | - | - |
| | C | ۱۶/۲۸۳ | - | - |
| | Cluster | ۴۶/۱۴۲ | ۲۴۳/۶۳۸ | ٪۸۴/۰۷ |
| ۴ | A | ۱۲/۵۳۵ | - | - |
| | B | ۱۵/۹۰۶ | - | - |
| | C | ۱۵/۵۲۵ | - | - |
| | Cluster | ۴۳/۹۶۶ | ۲۴۹/۴۱۰ | ٪۸۵/۰۱ |

- نمونه مطالعاتی ۲: خودروهای الکتریکی فقط شارژ می‌شوند، نیروگاه خورشیدی همراه با باتری است.
- نمونه مطالعاتی ۳: خودروهای الکتریکی هم شارژ می‌شوند و هم دشارژ، نیروگاه خورشیدی بدون باتری است.
- نمونه مطالعاتی ۴: خودروهای الکتریکی هم شارژ می‌شوند و هم دشارژ، نیروگاه خورشیدی همراه با باتری است.

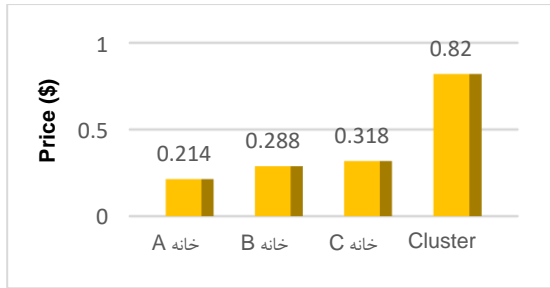
۵-۲-۲- مطالعات موردی انعطاف‌پذیری

همچنین انعطاف‌پذیری با استفاده از دو شاخص خودمصرفی و بهره‌وری ذخیره‌سازی در چهار نمونه مطالعاتی زیر مورد بررسی قرار گرفت.

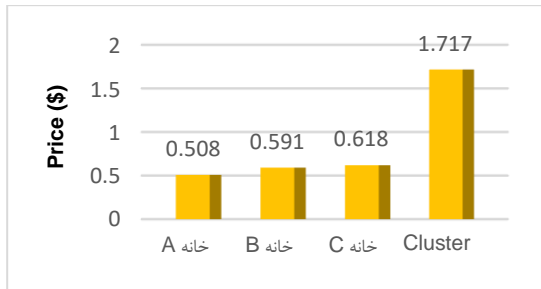
- نمونه مطالعاتی ۱: خودروی الکتریکی هر خانه علاوه بر مصرف در خانه، می‌تواند فقط با دو خانه‌ی دیگر برق مبادله کند، هر خانه می‌تواند سهم خود را از باتری نیروگاه خورشیدی فقط برای مصرف خود استفاده کند.
- نمونه مطالعاتی ۲: خودروی الکتریکی هر خانه علاوه بر مصرف در خانه، می‌تواند فقط با دو خانه‌ی دیگر برق مبادله کند، هر خانه می‌تواند سهم خود را از باتری نیروگاه خورشیدی استفاده کند و یا با دو خانه دیگر مبادله کند.
- نمونه مطالعاتی ۳: خودروی الکتریکی هر خانه علاوه بر مصرف در خانه، می‌تواند با شبکه و دو خانه‌ی دیگر برق مبادله کند، هر خانه می‌تواند سهم خود را از باتری نیروگاه خورشیدی فقط برای مصرف خود استفاده کند.
- نمونه مطالعاتی ۴: خودروی الکتریکی هر خانه علاوه بر مصرف در خانه، می‌تواند با شبکه و دو خانه‌ی دیگر برق مبادله کند، هر خانه می‌تواند سهم خود را از باتری نیروگاه خورشیدی استفاده کند و یا با دو خانه دیگر مبادله کند.

۵-۳- نتایج و بحث

نتایج مربوط به برآورد شاخص تاب‌آوری در چهار نمونه مطالعاتی ذکر شده برای آن، در جدول ۳ و ۴ ارائه شده است. لذا به‌منظور درک بهتر و مقایسه‌ی دقیق‌تر مقادیر عددی این دو جدول، شکل (۸) رسم شده است.



شکل ۱۰- صورت حساب برق روزانه برای ساختار پیشنهادی در این پژوهش

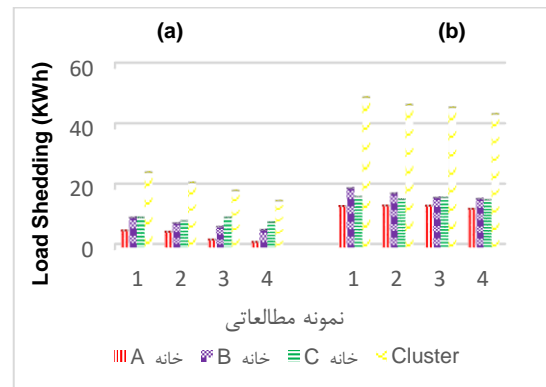


شکل ۱۱- صورت حساب برق روزانه در صورتی که فقط از شبکه بالا دست برای پوشش بار خود استفاده کنند نتایج مربوط به برآورد دو شاخص انعطاف پذیری در چهار نمونه مطالعاتی ذکر شده برای آن، در جدول ۵ ارائه شده است. لذا به منظور درک بهتر و مقایسه‌ی دقیق‌تر مقادیر عددی این جدول، شکل (۱۲) و (۱۳) رسم شده است.

جدول ۵- نتایج برآورد خودمصرفی و بهره‌وری ذخیره‌سازی در چهار نمونه مطالعاتی مربوط به انعطاف‌پذیری

| شاخص ۱ انعطاف‌پذیری (%) | | | | | |
|-------------------------------|---------|-------|------------------|---------|-------|
| نمونه مطالعاتی ۱ | A خانه | ٪۱۰/۴ | نمونه مطالعاتی ۲ | A خانه | ٪۱۰/۶ |
| | B خانه | ٪۸/۷ | | B خانه | ٪۸/۸ |
| | C خانه | ٪۸/۷ | | C خانه | ٪۸/۸ |
| | Cluster | ٪۹/۲ | | Cluster | ٪۹/۳ |
| نمونه مطالعاتی ۳ | A خانه | ٪۱۰/۰ | نمونه مطالعاتی ۴ | A خانه | ٪۱۰/۰ |
| | B خانه | ٪۸/۵ | | B خانه | ٪۸/۶ |
| | C خانه | ٪۸/۵ | | C خانه | ٪۸/۷ |
| | Cluster | ٪۹/۰ | | Cluster | ٪۹/۱ |
| بررسی شاخص ۲ انعطاف‌پذیری (%) | | | | | |
| نمونه مطالعاتی ۱ | A خانه | ٪۵/۱ | نمونه مطالعاتی ۲ | A خانه | ٪۷/۰ |
| | B خانه | ٪۴/۲ | | B خانه | ٪۵/۰ |
| | C خانه | ٪۳/۳ | | C خانه | ٪۴/۵ |
| | Cluster | ٪۴/۲ | | Cluster | ٪۵/۷ |
| نمونه مطالعاتی ۳ | A خانه | ٪۱/۲ | نمونه مطالعاتی ۴ | A خانه | ٪۱/۴ |
| | B خانه | ٪۱/۰ | | B خانه | ٪۱/۷ |
| | C خانه | ٪۰/۵ | | C خانه | ٪۲/۶ |
| | Cluster | ٪۰/۹ | | Cluster | ٪۲/۲ |

با مقایسه نتایج مربوط به این دو جدول مشاهده می‌شود که کمترین قطع بار در سناریو یک و دو مربوط به نمونه مطالعاتی ۴ است. در نتیجه نمونه مطالعاتی ۴ که ساختار پیشنهادی مورد نظر در این مقاله است باعث کاهش قطع بار و افزایش تاب‌آوری ریزش شبکه می‌شود. قطع بار در نمونه‌های مطالعاتی در سناریو یک که مربوط به قطعی شبکه از ساعت ۲۳ تا ۴ (ساعت کم‌مصرف) است نسبت به نمونه‌های مطالعاتی در سناریو دو که مربوط به قطعی از ۹ تا ۱۴ (ساعت پر مصرف) است، کمتر و در نتیجه تاب‌آوری بیشتر است.



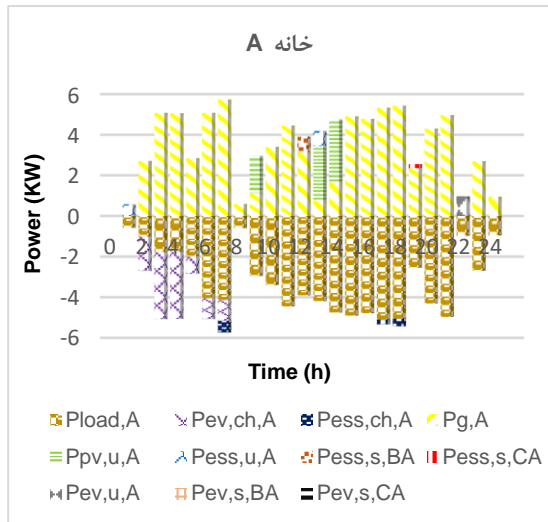
شکل ۸- قطع بار در چهار نمونه مطالعاتی مربوط به تاب‌آوری (a) سناریو یک (b) سناریو دو

همچنین قطع بار در صورتی که فقط از شبکه بالا دست برای پوشش بار خود استفاده کنند، در شکل (۹) نشان داده شده است. صورت حساب برق روزانه برای ساختار پیشنهادی در این پژوهش و در صورتی که فقط از شبکه بالا دست برای پوشش بار خود استفاده کنند، به ترتیب در شکل (۱۰) و (۱۱) ارائه شده است.

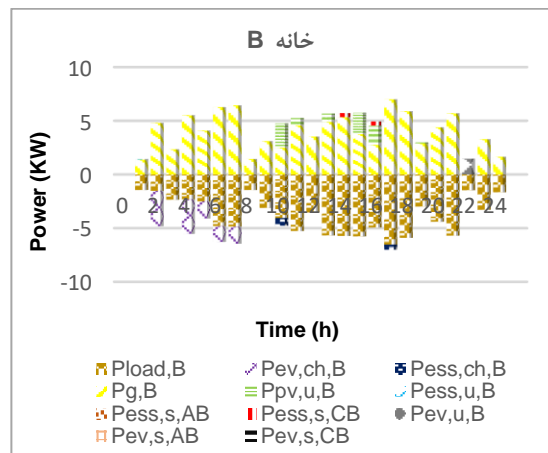


شکل ۹- قطع بار در صورتی که فقط از شبکه بالا دست برای پوشش بار خود استفاده کنند؛ (a) سناریو یک (b) سناریو دو

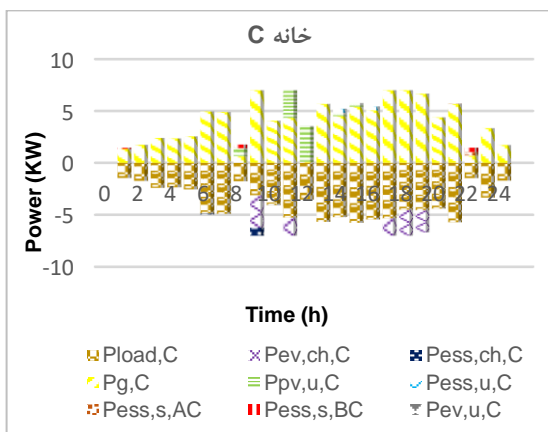
تعداد توان در ساختار پیشنهادی این مقاله برای خانه A در شکل (۱۵)، خانه B در شکل (۱۶)، خانه C در شکل (۱۷) و ریزشبکه در شکل (۱۸) نشان داده شده است. این تصاویر نمودارهای میله‌ای فوقانی تولید برق و نمودارهای میله‌ای پایینی مصرف برق را نشان می‌دهند.



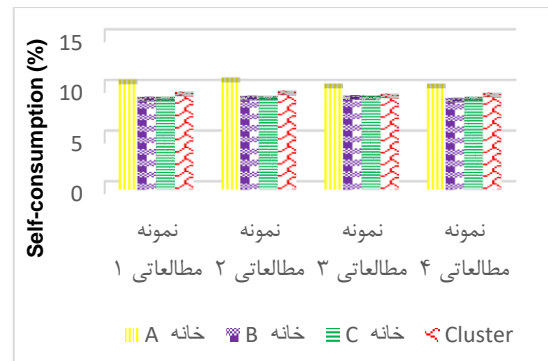
شکل ۱۵- تعادل توان در خانه A



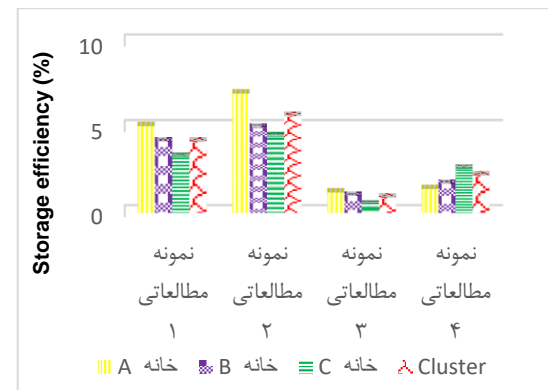
شکل ۱۶- تعادل توان در خانه B



شکل ۱۷- تعادل توان در خانه C

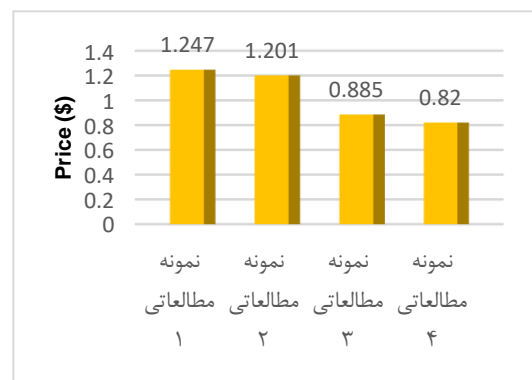


شکل ۱۲- خودمصرفی در چهار نمونه مطالعاتی مربوط به انعطاف‌پذیری

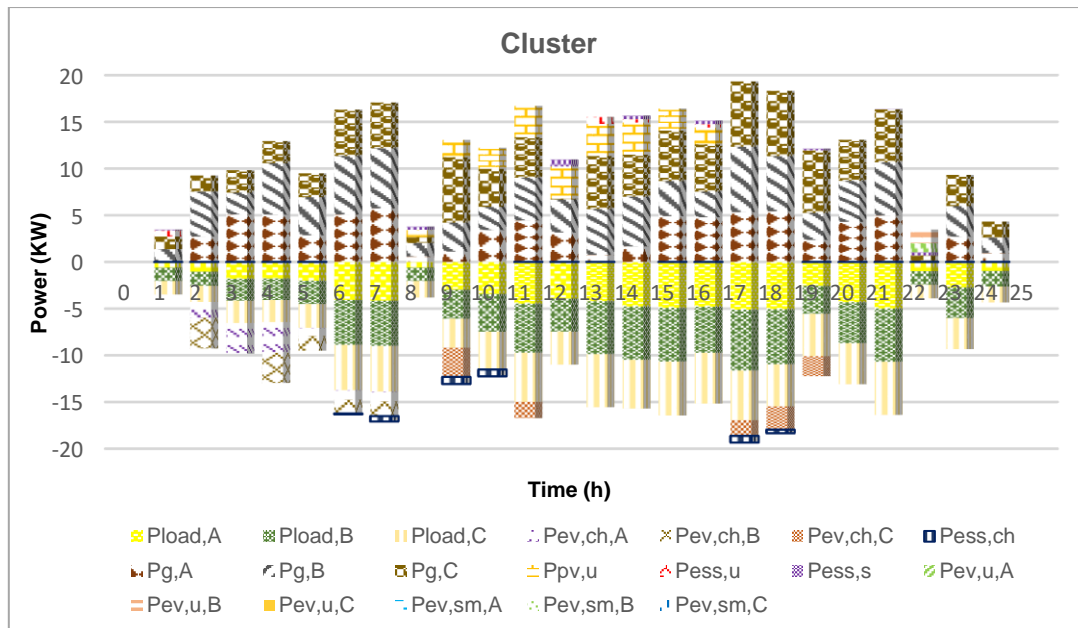


شکل ۱۳- بهره‌وری ذخیره‌سازی در چهار نمونه مطالعاتی مربوط به انعطاف‌پذیری

صورت‌حساب برق مربوط به چهار نمونه مطالعاتی انعطاف‌پذیری در شکل (۱۴) نشان داده شده است. با مقایسه نتایج مربوط به دو شاخص انعطاف‌پذیری در چهار نمونه مطالعاتی ذکر شده با در نظر گرفتن هزینه، مشاهده می‌شود که بهترین نمونه مطالعاتی مربوط به انعطاف‌پذیری، نمونه مطالعاتی ۴، که نمونه مطالعاتی مورد بررسی در این مقاله است. اما بدون در نظر گرفتن هزینه بهترین نمونه، نمونه مطالعاتی ۲ است که براساس شکل (۱۵) باعث می‌شود صورت‌حساب برق زیاد شود.

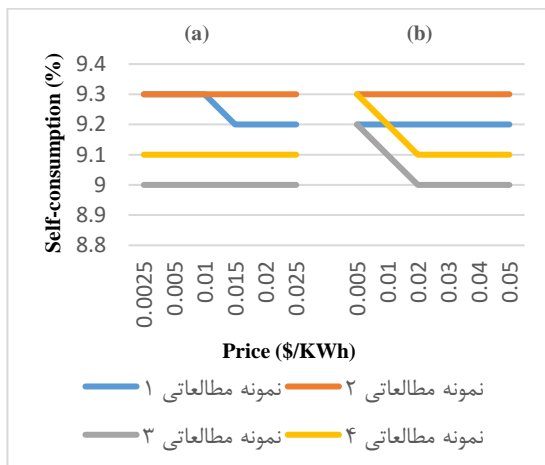


شکل ۱۴- صورت‌حساب برق روزانه مربوط به چهار نمونه مطالعاتی انعطاف‌پذیری



شکل ۱۸- تعادل توان در ریزشبهه

خودروهای یکدیگر استفاده کنند. در نمونه مطالعاتی ۱ و ۲ چون خودروها با شبکه برق مبادله نمی‌کنند؛ لذا تغییر قیمت فروش برق به شبکه تاثیری روی شاخص‌های انعطاف‌پذیری ندارد و ثابت می‌مانند. در نمونه مطالعاتی ۳ و ۴ چون خودروها با شبکه برق مبادله می‌کنند و قیمت فروش برق به مشترکین در حالت عادی ۰/۰۲ دلار بر کیلووات ساعت است، در هزینه‌های فروش برق به شبکه کمتر از ۰/۰۲ دلار بر کیلووات ساعت شاخص‌های انعطاف‌پذیری بیشتر است. زیرا برای کاهش صورت‌حساب برق ترجیح می‌دهند، بجای فروش برق به شبکه، برق را برای پوشش بخشی از بار خود استفاده کنند.



شکل ۱۹- نتایج خودمصرفی در چهار نمونه مطالعاتی مربوط به انعطاف‌پذیری با هزینه‌های متفاوت، (a) فروش برق به مشترکین (b) فروش برق به شبکه

نتایج مربوط به آنالیز حسایت در نمونه‌های مطالعاتی مختلف مربوط به شاخص‌های تاب‌آوری و انعطاف‌پذیری، با هزینه‌های متفاوت فروش برق به مشترکین (فروش برق خانه‌ها به یکدیگر) و فروش برق به شبکه، در جدول (۶) ارائه شده است. همچنین به‌منظور درک بهتر و مقایسه دقیق‌تر مقادیر عددی این جدول، نتایج مربوط به خودمصرفی و بهره‌وری ذخیره‌سازی به‌ترتیب در شکل (۱۹) و (۲۰) رسم شده است.

با مقایسه نتایج مربوط به تاب‌آوری در جدول ۶ مشاهده می‌شود که تغییر قیمت فروش برق به مشترکین و فروش برق به شبکه تاثیری روی تاب‌آوری ریزشبهه مسکونی ندارد. در نتیجه قطع بار در ریزشبهه مسکونی با تغییر قیمت‌ها ثابت می‌ماند. به‌عبارت دیگر وقتی شبکه قطع می‌شود با تغییر هزینه فروش برق مقدار قطع بار در کل ریزشبهه مسکونی تغییر نمی‌کند و ثابت می‌ماند. اما اگر قطع بار در هر خانه برآورد شود، مشاهده می‌شود قطع بار در خانه‌ها تغییر می‌کند.

همچنین مشاهده می‌شود که تغییر قیمت فروش برق به مشترکین تاثیری روی شاخص‌های انعطاف‌پذیری ندارد. بجز نمونه مطالعاتی ۱ که خودروی هر خانه علاوه بر مصرف در خانه فقط می‌تواند با دو خانه دیگر برق مبادله کند. در نتیجه در قیمت‌های متفاوت فروش برق به مشترکین، که هزینه تبادل برق بین خانه‌ها کمتر از خرید برق از شبکه است؛ ترجیح می‌دهند برای کاهش صورت‌حساب برق از

جدول ۶- نتایج مربوط به برآورد شاخص‌های تاب‌آوری و انعطاف‌پذیری با هزینه‌های متفاوت

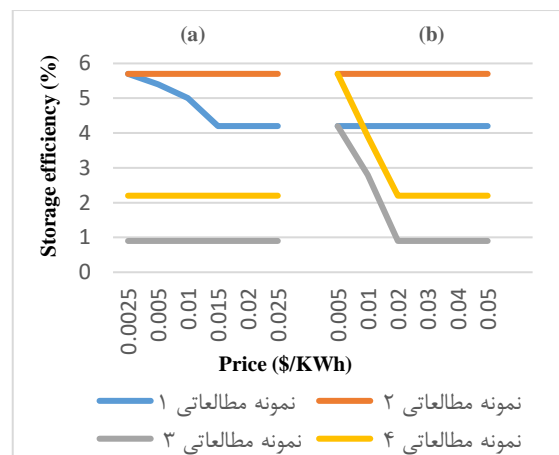
| هزینه (\$/KWh) | شاخص تاب‌آوری (%) | | | | شاخص ۱ انعطاف‌پذیری (%) | | | | شاخص ۲ انعطاف‌پذیری (%) | | | | |
|---------------------|-------------------|--------|--------|--------|-------------------------|------|------|------|-------------------------|------|------|------|------|
| | نمونه مطالعاتی | | | | نمونه مطالعاتی | | | | نمونه مطالعاتی | | | | |
| | ۱ | ۲ | ۳ | ۴ | ۱ | ۲ | ۳ | ۴ | ۱ | ۲ | ۳ | ۴ | |
| فروش برق به مشترکین | ۰/۰۰۲۵ | ٪۹۱/۴۸ | ٪۹۲/۷۵ | ٪۹۳/۵۷ | ٪۹۴/۸۲ | ٪۹/۳ | ٪۹/۳ | ٪۹/۰ | ٪۹/۱ | ٪۵/۷ | ٪۵/۷ | ٪۰/۹ | ٪۲/۲ |
| | ۰/۰۰۵ | ٪۹۱/۴۸ | ٪۹۲/۷۵ | ٪۹۳/۵۷ | ٪۹۴/۸۲ | ٪۹/۳ | ٪۹/۳ | ٪۹/۰ | ٪۹/۱ | ٪۵/۴ | ٪۵/۷ | ٪۰/۹ | ٪۲/۲ |
| | ۰/۰۱ | ٪۹۱/۴۸ | ٪۹۲/۷۵ | ٪۹۳/۵۷ | ٪۹۴/۸۲ | ٪۹/۳ | ٪۹/۳ | ٪۹/۰ | ٪۹/۱ | ٪۵/۰ | ٪۵/۷ | ٪۰/۹ | ٪۲/۲ |
| | ۰/۰۱۵ | ٪۹۱/۴۸ | ٪۹۲/۷۵ | ٪۹۳/۵۷ | ٪۹۴/۸۲ | ٪۹/۲ | ٪۹/۳ | ٪۹/۰ | ٪۹/۱ | ٪۴/۲ | ٪۵/۷ | ٪۰/۹ | ٪۲/۲ |
| | ۰/۰۲ | ٪۹۱/۴۸ | ٪۹۲/۷۵ | ٪۹۳/۵۷ | ٪۹۴/۸۲ | ٪۹/۲ | ٪۹/۳ | ٪۹/۰ | ٪۹/۱ | ٪۴/۲ | ٪۵/۷ | ٪۰/۹ | ٪۲/۲ |
| | ۰/۰۲۵ | ٪۹۱/۴۸ | ٪۹۲/۷۵ | ٪۹۳/۵۷ | ٪۹۴/۸۲ | ٪۹/۲ | ٪۹/۳ | ٪۹/۰ | ٪۹/۱ | ٪۴/۲ | ٪۵/۷ | ٪۰/۹ | ٪۲/۲ |
| فروش برق به شبکه | ۰/۰۰۵ | ٪۹۱/۴۸ | ٪۹۲/۷۵ | ٪۹۳/۵۷ | ٪۹۴/۸۲ | ٪۹/۲ | ٪۹/۳ | ٪۹/۲ | ٪۹/۳ | ٪۴/۲ | ٪۵/۷ | ٪۴/۲ | ٪۵/۷ |
| | ۰/۰۱ | ٪۹۱/۴۸ | ٪۹۲/۷۵ | ٪۹۳/۵۷ | ٪۹۴/۸۲ | ٪۹/۲ | ٪۹/۳ | ٪۹/۱ | ٪۹/۲ | ٪۴/۲ | ٪۵/۷ | ٪۲/۸ | ٪۳/۹ |
| | ۰/۰۲ | ٪۹۱/۴۸ | ٪۹۲/۷۵ | ٪۹۳/۵۷ | ٪۹۴/۸۲ | ٪۹/۲ | ٪۹/۳ | ٪۹/۰ | ٪۹/۱ | ٪۴/۲ | ٪۵/۷ | ٪۰/۹ | ٪۲/۲ |
| | ۰/۰۳ | ٪۹۱/۴۸ | ٪۹۲/۷۵ | ٪۹۳/۵۷ | ٪۹۴/۸۲ | ٪۹/۲ | ٪۹/۳ | ٪۹/۰ | ٪۹/۱ | ٪۴/۲ | ٪۵/۷ | ٪۰/۹ | ٪۲/۲ |
| | ۰/۰۴ | ٪۹۱/۴۸ | ٪۹۲/۷۵ | ٪۹۳/۵۷ | ٪۹۴/۸۲ | ٪۹/۲ | ٪۹/۳ | ٪۹/۰ | ٪۹/۱ | ٪۴/۲ | ٪۵/۷ | ٪۰/۹ | ٪۲/۲ |
| | ۰/۰۵ | ٪۹۱/۴۸ | ٪۹۲/۷۵ | ٪۹۳/۵۷ | ٪۹۴/۸۲ | ٪۹/۲ | ٪۹/۳ | ٪۹/۰ | ٪۹/۱ | ٪۴/۲ | ٪۵/۷ | ٪۰/۹ | ٪۲/۲ |

۶- نتیجه‌گیری

این مقاله به مدل‌سازی مدیریت بهینه یک ریزشبه مسکونی مبتنی بر نیروگاه خورشیدی و ذخیره‌سازهای انرژی با هدف کاهش صورت‌حساب برق با در نظر گرفتن رضایت کاربر پرداخته است. کارایی مدل و بهره‌برداری پیشنهادی از طریق محاسبه عددی شاخص‌های تاب‌آوری و انعطاف‌پذیری ارزیابی شده است. نتایج نشان می‌دهد، در شرایط قطع شدن شبکه‌ی برق سراسری استفاده از مدل پیشنهادی سبب بهبود تاب‌آوری در ساعات کم‌مصرف و پرمصرف به ترتیب به اندازه ۴/۷٪ و ۹/۷۵٪ خواهد شد. همچنین، استفاده از مدل پیشنهادی باعث بهبود دو شاخص انعطاف‌پذیری، خودمصرفی برای خانه A، خانه B، خانه C و ریزشبه به ترتیب به اندازه ۱۰٪، ۸/۶٪، ۸/۷٪ و ۹/۱٪ و بهره‌وری ذخیره‌سازی برای خانه A، خانه B، خانه C و ریزشبه به ترتیب به اندازه ۱/۴٪، ۱/۷٪، ۲/۶٪ و ۲/۲٪ می‌شود. از سوی دیگر صورت‌حساب برق برای خانه A، خانه B، خانه C و ریزشبه به ترتیب به اندازه ۰/۲۹۴، ۰/۳۰۳، ۰/۳ و ۰/۸۹۷ دلار کاهش می‌یابد. بنابراین، بهره‌گیری مناسب از نیروگاه خورشیدی و ذخیره‌سازهای انرژی می‌توانند به شکل قابل توجهی بر بهبود تاب‌آوری، انعطاف‌پذیری و کاهش صورت‌حساب برق ریزشبه مسکونی تأثیر گذار باشد.



شکل ۱۹- نتایج خودمصرفی در چهار نمونه مطالعاتی مربوط به انعطاف‌پذیری با هزینه‌های متفاوت، (a) فروش برق به مشترکین (b) فروش برق به شبکه



شکل ۲۰- نتایج بهره‌وری ذخیره‌سازی در چهار نمونه مطالعاتی مربوط به انعطاف‌پذیری با هزینه‌های متفاوت، (a) فروش برق به مشترکین (b) فروش برق به شبکه

فهرست علائم و اختصارات

پارامترها

میزان توان استفاده شده از باتری نیروگاه خورشیدی توسط خانه A

$$P_t^{ess,\mu,A}$$

میزان توان استفاده شده از باتری نیروگاه خورشیدی توسط خانه B

$$P_t^{ess,\mu,B}$$

میزان توان استفاده شده از باتری نیروگاه خورشیدی توسط خانه C

$$P_t^{ess,\mu,C}$$

میزان توان مبادله شده از باتری پنل خورشیدی در ریزشبهه

$$P_t^{ess,s}$$

میزان توان فروخته شده توسط خانه A از سهم باتری نیروگاه خورشیدی به دو خانه‌ی دیگر

$$P_t^{ess,s,A}$$

میزان سهم خانه A از دشارژ ذخیره‌ساز نیروگاه خورشیدی

$$P_t^{ess,d,A}$$

میزان سهم خانه B از دشارژ ذخیره‌ساز نیروگاه خورشیدی

$$P_t^{ess,d,B}$$

میزان سهم خانه C از دشارژ ذخیره‌ساز نیروگاه خورشیدی

$$P_t^{ess,d,C}$$

میزان سهم خانه A در شارژ ذخیره‌ساز نیروگاه خورشیدی

$$P_t^{ess,ch,A}$$

میزان سهم خانه A در شارژ ذخیره‌ساز نیروگاه خورشیدی

$$P_t^{ess,ch,B}$$

میزان سهم خانه A در شارژ ذخیره‌ساز نیروگاه خورشیدی

$$P_t^{ess,ch,C}$$

توان فروخته شده از سهم باتری نیروگاه خورشیدی خانه B و C به خانه A

$$P_t^{ess,s,BA}, P_t^{ess,s,CA}$$

توان فروخته شده از سهم باتری نیروگاه خورشیدی خانه A و C به خانه B

$$P_t^{ess,s,AB}, P_t^{ess,s,CB}$$

توان فروخته شده از سهم باتری نیروگاه خورشیدی خانه A و B به خانه C

$$P_t^{ess,s,AC}, P_t^{ess,s,BC}$$

میزان توان استفاده شده از باتری خودروی الکتریکی A

$$P_t^{ev,\mu,A}$$

میزان توان استفاده شده از باتری خودروی الکتریکی B

$$P_t^{ev,\mu,B}$$

میزان توان استفاده شده از باتری خودروی الکتریکی C

$$P_t^{ev,\mu,C}$$

میزان توان فروخته شده از باتری خودروی الکتریکی B و C به خانه A

$$P_t^{ev,s,BA}, P_t^{ev,s,CA}$$

میزان توان فروخته شده از باتری خودروی الکتریکی A و C به خانه B

$$P_t^{ev,s,AB}, P_t^{ev,s,CB}$$

میزان توان فروخته شده از باتری خودروی الکتریکی A و B به خانه C

$$P_t^{ev,s,AC}, P_t^{ev,s,BC}$$

میزان توان فروخته شده از دشارژ خودروی A، به شبکه

$$P_t^{ev,sg,A}$$

میزان توان فروخته شده از دشارژ خودروی B، به شبکه

$$P_t^{ev,sg,B}$$

میزان توان فروخته شده از دشارژ خودروی C، به شبکه

$$P_t^{ev,sg,C}$$

میزان توان شارژ خودروی A

$$P_t^{ev,ch,A}$$

هزینه خرید برق خانه A از شبکه

$$C_{buy}_t^g$$

هزینه فروش برق خانه A به شبکه

$$C_{sell}_t^g$$

هزینه تبادل برق در ریزشبهه

$$C_t^m$$

هزینه قطع بار اختیاری

$$C_t^{II}$$

زمان رسیدن خودروی A، B و C به خانه

$$T^{n,A}, T^{n,B}, T^{n,C}$$

زمان خروج خودروی A، B و C از خانه

$$T^{m,A}, T^{m,B}, T^{m,C}$$

زمان طلوع و غروب خورشید

$$T^a, T^b$$

زمان شروع قطع برق

$$t_0$$

زمان پایان قطع برق

$$t_1$$

مجموع بارهای سه خانه A، B و C

$$Cluster$$

متغیرها

صورت حساب برق ریزشبهه

$$Eb$$

صورت حساب برق خانه A، B و C

$$Eb_B, Eb_C, Eb_A$$

هزینه تبادل برق با شبکه مربوط به خانه A

$$C_{sell}_{g,A}, C_{buy}_{g,A}$$

هزینه تبادل برق خانه A با دو خانه دیگر

$$C_{sell}_{m,A}, C_{buy}_{m,A}$$

هزینه قطع بار در خانه A

$$C_{II,A}$$

میزان توان قطع شده توسط کاربر خانه A

$$P_t^{in,A}$$

میزان توان استفاده شده از نیروگاه خورشیدی برای پوشش بخشی از بار ریزشبهه مسکونی

$$P_t^{pv,\mu}$$

میزان توان استفاده شده از نیروگاه خورشیدی برای پوشش بخشی از بار خانه A

$$P_t^{pv,\mu,A}$$

میزان توان استفاده شده از نیروگاه خورشیدی برای پوشش بخشی از بار خانه B

$$P_t^{pv,\mu,B}$$

میزان توان استفاده شده از نیروگاه خورشیدی برای پوشش بخشی از بار خانه C

$$P_t^{pv,\mu,C}$$

میزان توان شارژ باتری نیروگاه خورشیدی توسط پنل‌ها

$$P_t^{ess,ch}$$

میزان دشارژ باتری نیروگاه خورشیدی

$$P_t^{ess,d}$$

میزان توان استفاده شده از باتری نیروگاه خورشیدی توسط ریزشبهه مسکونی

$$P_t^{ess,\mu}$$

| | | |
|--|---|---|
| پتانسیل انعطاف‌پذیری حداکثری (ظرفیت ذخیره حداکثری) ریزشبکه مسکونی، خانه A، B و C $C_{max}, C_{max,A}, C_{max,B}, C_{max,C}$ | $P_t^{ev, ch, B}$ | میزان توان شارژ خودروی B |
| پتانسیل انعطاف‌پذیری (بهره‌وری ذخیره‌سازی) ریزشبکه مسکونی، خانه A، B و C C, C_A, C_B, C_C | $P_t^{ev, ch, C}$ | میزان توان شارژ خودروی C |
| کل بار مربوط به ریزشبکه مسکونی، خانه A، B و C P_t, P_t^A, P_t^B, P_t^C | $P_t^{ev, d, A}$ | میزان توان دشارژ خودروی A |
| مجموع بار قابل قطع، قابل تغییر و قابل تنظیم مربوط به خانه A، B و C $P_t^{Load, A}, P_t^{Load, B}, P_t^{Load, C}$ | $P_t^{ev, d, B}$ | میزان توان دشارژ خودروی B |
| میزان توان خریداری شده از شبکه توسط ریزشبکه مسکونی، خانه A، B و C $P_t^g, P_t^g, P_t^g, P_t^g$ | $P_t^{ev, d, C}$ | میزان توان دشارژ خودروی C |
| میزان توان خروجی نیروگاه خورشیدی برای پوشش بخشی از بار ریزشبکه، خانه A، B و C $P_t^{res}, P_t^{res, A}, P_t^{res, B}, P_t^{res, C}$ | میزان توان فروخته شده از دشارژ خودروی A، B و C به دو خانه دیگر $P_t^{ev, sm, A}, P_t^{ev, sm, B}, P_t^{ev, sm, C}$ | |
| | <i>Resilience</i> | شاخص تاب‌آوری |
| | $Q_0(t)$ | تامین بار در حالت عادی |
| | $Q_1(t)$ | مقدار بار قطع شده پس از قطعی شبکه برق |
| | SC, SC_A, SC_B, SC_C | شاخص انعطاف‌پذیری مربوط به خودمصرفی ریزشبکه مسکونی، خانه A، B و C |

مراجع

- [1] P.H. Li and S. Pye, "Assessing the benefits of demand-side flexibility in residential and transport sectors from an integrated energy systems perspective", *Applied Energy*, Vol. 228, October 2018, pp. 965–979.
- [2] سید قاسم میربایابی رکنی، مسعود رادمهر و علیرضا ذکریزاده، "مدل‌سازی مدیریت منابع انرژی پراکنده در ریزشبکه با استفاده از روش توزیع شده"، نشریه مدل‌سازی در مهندسی، دوره ۱۷، شماره ۵۷، تابستان ۱۳۹۸، صفحه ۲۴۱–۲۵۲.
- [3] علیرضا ابراهیمی، عباس دیدبان نوکنندی و رضا کی‌پور، "استراتژی کنترلی نوین در سیستم‌های انرژی ترکیبی بادی-خورشیدی برمبنای تعیین محدوده‌های بهینه شارژ و دشارژ باتری‌ها در بازه‌های زمانی مختلف"، نشریه مدل‌سازی در مهندسی، دوره ۱۶، شماره ۵۵، زمستان ۱۳۹۷، صفحه ۱۶۳–۱۷۳.
- [4] محمد علیزاده، میثم جعفری نوکنندی و یامین سلطان مرادی، "مدل‌سازی و بهینه‌سازی مصرف انرژی در خانه هوشمند با حضور ذخیره‌ساز انرژی، سلول خورشیدی، خودروی برقی و پاسخ‌گویی بار"، نشریه مدل‌سازی در مهندسی، دوره ۱۷، شماره ۵۷، تابستان ۱۳۹۸، صفحه ۲۱۵–۲۲۶.
- [5] L. Martirano, G. Parise, and et al, "Aggregation of users in a residential/commercial building managed by a building energy management system (BEMS)", *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 55, No. 1, January-February 2019, pp. 26-34.
- [6] F. Pallonetto, S. Oxizidis, and et al, "The effect of time-of-use tariffs on the demand response flexibility of an all-electric smart-grid-ready dwelling", *Energy and Buildings*, Vol. 128, September 2016, pp. 56-67.
- [7] D. Zhang, S. Li, and et al, "An optimal and learning-based demand response and home energy management system", *IEEE Transactions on Smart Grid*, Vol. 7, No. 4, July 2016, pp. 1790-1801.
- [8] I. Sharma, J. Dong, and et al, "A modeling framework for optimal energy management of a residential building", *Energy and Buildings*, Vol. 130, October 2016, pp. 55-63.
- [9] R. Yin, E.C. Kara, and et al, "Quantifying flexibility of commercial and residential loads for demand response using setpoint changes", *Applied Energy*, Vol. 177, September 2016, pp.149-164.
- [10] E. Chatterji, and M. D. Bazilian, "Smart meter data to optimize combined roof-top solar and battery systems using a stochastic mixed integer programming model", *IEEE Access*, Vol. 8, July 2020, pp. 133843-133853.
- [11] Y. Wang, C. Chen, and et al, "Research on resilience of power systems under natural disasters-a review", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 31, No. 2, March 2015, pp. 1604-1613.

- [12] M. Panteli, and P. Mancarella, "The grid: Stronger, bigger, smarter?: Presenting a conceptual framework of power system resilience", *IEEE Power and Energy Magazine*, Vol. 13, No.3, May-June 2015, pp. 58-66.
- [13] X. Liu, K. Hou, and et al, "A resilience assessment approach for power system from perspectives of system and component levels", *Applied Energy*, Vol. 118, June 2020, pp. 105837.
- [14] H. Ghasemieh, B.R. Haverkort, and et al, "Energy resilience modelling for smart houses", *IEEE Computer Society*, Vol. 1, June 2015, pp. 275-286.
- [15] F. Hafiz, B. Chen, and et al, "Utilizing demand response for distribution service restoration to achieve grid resiliency against natural disasters", *IET Generation, Transmission & Distribution*, Vol. 13, March 2019, pp. 2942-2950.
- [16] R. Wu and G. Sansavini, "Integrating reliability and resilience to support the transition from passive distribution grids to islanding microgrids", *Applied Energy*, Vol. 272, August 2020, pp. 115254.
- [17] A. Bampoulas, M. Saffari, and et al, "A fundamental unified framework to quantify and characterise energy flexibility of residential buildings with multiple electrical and thermal energy", *Applied Energy*, Vol. 282, January 2021, pp. 116096.
- [18] M. Panteli, and P. Mancarella, "Modeling and evaluating the resilience of critical electrical power infrastructure to extreme weather events", *IEEE Systems Journal*, Vol. 11, No. 3, September 2015, pp. 1733-1742.
- [19] M. Panteli, D. Trakas, and et al, "Boosting the power grid resilience to extreme weather events using defensive islanding", *IEEE Transactions on Smart Grid*, Vol. 7, No. 6, March 2016, pp. 4732-4742.
- [20] J. Najafi, A. Peiravi, and et al, "Power distribution system improvement planning under hurricanes based on a new resilience index", *IEEE Access*, Vol. 39, May 2018, pp. 592-604.
- [21] J. Confrey, A. H. Etemadi, and et al, "Energy Storage Systems Architecture Optimization for Grid Resilience with High Penetration of Distributed Photovoltaic Generation", *IEEE Systems Journal*, Vol. 14, No. 1, March 2020, pp. 1135-1146.
- [22] H. Wang, T. Jin, "Prevention and Survivability for Power Distribution Resilience: A Multi-Criteria Renewables Expansion Model", *IEEE Access*, Vol. 8, May 2020, pp. 88422-88433.
- [23] S. Poudel, A. Dubey, and et al, "Risk-Based Probabilistic Quantification of Power Distribution System Operational Resilience", *IEEE Systems Journal*, Vol. 14, No. 3, September 2020, pp. 3506-3517.
- [24] T. Nguyen, S. Wang, and et al, "Electric Power Grid Resilience to Cyber Adversaries: State of the Art", *IEEE Access*, Vol. 8, May 2020, pp. 87592-87608.
- [25] A. Nasri, A. Abdollahi, and et al, "Multi-stage and resilience-based distribution network expansion planning against hurricanes based on vulnerability and resiliency metrics", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 136, March 2022, pp.107640.
- [26] A. Akrami, M. Doostizadeh, and et al, "Power system flexibility: an overview of emergence to evolution", *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, Vol. 7, No. 5, September 2019, pp. 987-1007.
- [27] S. Nan, G. Li, and et al, "Optimal residential community demand response scheduling in smart grid", *Applied Energy*, Vol. 210, January 2018, pp. 1280-1289.
- [28] O. Erdinc, N.G. Paterakis, and et al, "Smart household operation considering bi-directional EV and ESS utilization by real-time pricing-based DR", *IEEE Transactions on Smart Grid*, Vol.6, No. 3, May 2015, pp.1281-1291.
- [29] A. Akrami, M. Doostizadeh, and et al, "Power system flexibility: an overview of emergence to evolution", *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, Vol. 7, No. 5, September 2019, pp. 987-1007.
- [30] S.M. Mohseni-Bonab, A. Rabiee, and et al, "A two-point estimate method for uncertainty modeling in multi-objective optimal reactive power dispatch problem", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 75, February 2016, pp. 194-204.
- [31] P. Huang, M. Lovati, and et al, "A coordinated control to improve performance for a building cluster with energy storage, electric vehicles, and energy sharing considered", *Applied Energy*, Vol. 268, June 2020, pp. 114983.