بهره برداری ریزشبکه در حضور خودروهای برقی با در نظر گرفتن پاسخگویی تقاضا با مدل MILP

ایمان گروهی ساردو[۱]، عبدالعزیز ملاحی[۲]، علی گروهی[۳]

۱- استادیار، گروه مهندسی برق- دانشگاه جیرفت- جیرفت- ایران

imangoroohi@ujiroft.ac.ir –

۲- دانشجو، گروه مهندسی برق- دانشگاه جیرفت- جیرفت- ایران

a.mallahi96@gmail.com –

۳- مربی، گروه مهندسی برق- دانشگاه جیرفت- جیرفت- ایران

ali.goroohi@ujiroft.ac.ir –

چکیده: ریزشبکه به مجموعه ای از بارها، منابع تولید پراکنده و منابع ذخیره انرژی گفته می‌شود که به صورت یک بار قابل کنترل عمل کرده و می‌تواند توان موردنیاز را برای یک ناحیه محلی فراهم نماید. آلودگی‌های ناشی از خودروهای با سوخت فسیلی متناسب با افزایش تولید کارخانه‌ها افزایش می‌یابد، همچنین محدودیت سوخت‌های فسیلی باعث گرایش این صنعت به تولید خودروهای الکتریکی شده است. در این مقاله به حل مسئله بهره‌برداری احتمالاتی ریزشبکه در حضور خودروهای برقی با در نظر گرفتن پاسخگویی تقاضای بار و با هدف کاهش هزینه بهره‌برداری با استفاده از مدل برنامه‌ریزی ترکیبی خطی عدد صحیح (MILP) پرداخته شده است. همچنین جایابی ایستگاه‌های خودروهای برقی در سطح ریزشبکه انجام شده است. از نرم افزار گمز به عنوان ابزار بهینه‌سازی استفاده شده و یک شبکه ۲۴ باسه شامل تعداد ۳۳ واحد تولید پراکنده (DG)، ۸ ایستگاه خودروهای برقی، و بارهای مشارکت کننده در برنامه پاسخگویی تقاضا، به عنوان ریزشبکه نمونه مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج حاصل نشان می دهد که منظور نمودن پاسخگویی تقاضای بار و همچنین خودروهای برقی در مسئله بهره‌برداری ریزشبکه سبب بهبود شاخص‌های اقتصادی و امنیتی ریزشبکه می‌شود.

واژگان کلیدی: ریزشبکه، خودرو برقی، پاسخگویی تقاضا، برنامه‌ریزی ترکیبی خطی عدد صحیح (MILP)

تاریخ ارسال مقاله :۱۳۹۷/۰۹/۳۰

تاریخ پذیرش مقاله : ۱۳۹۸/۰۳/۱۷

نام نویسنده‌ی مسئول : ایمان گروهی ساردو

نشانی نویسنده‌ی مسئول : گروه مهندسی برق- دانشگاه جیرفت- جیرفت- ایران، imangoroohi@ujiroft.ac.ir

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-23]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1398.8.1.2.3]

۱ـ مقدمه

ریزشبکه‌ها از جمله شبکه‌هایی هستند که در آن‌ها از منابع تجدیدپذیر استفاده چشم گیری شده است. ریزشبکه به مجموعه ای از بارها، منابع تولید و منابع ذخیره انرژی گفته می‌شود که به صورت یک بار قابل کنترل عمل کرده و می‌تواند توان و حرارت را برای یک ناحیه محلی فراهم نماید. ریزشبکه‌ها برای تامین انرژی انواع مصرف کننده‌ها همچون خانگی، صنعتی و کشاورزی مورد استفاده قرار می‌گیرد و براورد هزینه آن‌ها بر اساس سیاست‌های قیمت گذاری در بازار برق صورت می‌گیرد. استفاده از ریزشبکه‌ها موجب ارائه توان با کیفیت بالاتر، افزایش قابلیت اطمینان سیستم و کاهش هزینه‌ها در شبکه توزیع می‌شود. توسعه پایدار بدون حفظ و نگهداری صحیح محیط زیست امکان پذیر نخواهد شد به همین دلیل بکارگیری فناوری‌های سبز یکی از الزامات آتی صنعت خواهد بود. چرخ صنعت بدون انرژی نخواهد چرخید و آنچه بیش از پیش به نگرانی‌های بین المللی در زمینه انرژی دامن زده است، محدود بودن منابع سوخت‌های فسیلی است. طبق برآوردهای انجام شده تعداد خودروهای برقی تا سال ۲۰۱۷ به ۵ میلیون خودرو رسیده که این امر صنعت برق را وادار به توجه بیشتر به این موضوع داشته است. مشارکت خودروهای برقی در بازار تنظیم فرکانس، فراهم نمودن پیک توان و سودهای اقتصادی از مشارکت خودروهای الکتریکی در این بازارها تحقیق و بررسی شده است. تکنولوژی خودروهای الکتریکی در شبکه به عنوان یک واحد جدید ذخیره‌سازی و مصرف انرژی، توجه زیادی را به خود جلب نموده، به همین دلیل شبکه قدرت را با چالش‌های جدید روبرو می‌کند. در حال حاضر با توجه به رشد روزافزون جمعیت جهان، تعداد مصرف کنندگان انرژی الکتریکی نیز رو به افزایش می‌باشد. در دنیای رقابتی امروز که بیش از هر زمانی به انرژی الکتریکی وابسته می‌باشد مدیریت و برنامه ریزی عرضه و تقاضای بار از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. این مهم نشان دهنده این است که باید تعادل بین عرضه و تقاضای انرژی الکتریکی برقرار باشد. با اجرایی شدن مدیریت تقاضا در شبکه‌های الکتریکی بویژه در سطح توزیع می‌توان از امکانات موجود و منابع تولید بصورت صحیح استفاده نمود. جهت بهره برداری ریزشبکه از DGها و همچنین خودروهای برقی استفاده می‌شود که در این مقاله به بهینه سازی ریزشبکه‌ها در حضور خودروهای برقی پرداخته می‌شود. مراجع محدودی به مسئله پاسخگویی تقاضا در حضور خوروهای برقی پرداخته اند که ضرورت موضوع مورد بررسی را نشان می دهد. مرجع [1] به مسئله پاسخگویی بار به منظور بالا بردن امنیت سیستم و اهداف اقتصادی در قالب یک مسئله بهینه‌سازی غیر خطی می‌پردازد. در مرجع [2] یک مدل آماری ارائه شده که رفتار شارژ و دشارژ روزانه وسایل برقی را نشان می‌دهد. در مرجع [3] به دسته بندی شبکه توزیع به منظور تشکیل ریزشبکه‌ها با خصوصیت خودکفایی بهینه پرداخته شده است. در مرجع [4] خودروهای برقی از دیدگاه‌های مختلف خدماتی سیستم‌های قدرت و برنامه‌های بازار برق مورد بررسی قرار گرفته‌اند. همچنین در مرجع [4] به مکان‌یابی پارکینگ‌های هوشمند نیز پرداخته شده است. در مرجع [5] در زمینه خودروهای الکتریکی مطالعاتی بر روی آنالیز هزینه-فایده و تاثیر خودروهای هیبریدی برقی متصل شونده به شبکه (PHEV) انجام شده است. در مرجع [6] تاثیر خودروهای الکتریکی بر سیستم توزیع، به ویژه اثر آن بر روی امنیت شبکه، بررسی شده است. در مرجع [7] سعی بر آن داشته است تا با بهره گیری از روش‌های احتمالاتی، به بهینه‌سازی ترکیب تولیدات پراکنده و خودروهای الکتریکی با هدف بهبود قابلیت اطمینان ریزشبکه بپردازد. در مرجع [8]، یک رویه مناسب جهت بهره‌برداری بهینه از شبکه‌های توزیع فعال در حضور منابع تولید پراکنده تجدیدپذیر، باتری‌ها و خودروهای برقی ارائه شده است. مهمترین مسئله در منابع تولید پراکنده تجدیدپذیر و خودروهای برقی در شبکه‌های توزیع، عدم قطعیت آنها می‌باشد که این مسئله بطور مناسب توسط ذخیره‌سازها پوشش داده می‌شود [9]. در مرجع [10] روشی جدید جهت برنامه‌ریزی بهینه و همزمان منابع پاسخگویی بار و منابع تولید پراکنده بادی و خورشیدی به منظور کاهش هزینه‌ها و حل مشکلات تامین بار ارائه شده است. در مرجع [11] یک مدل اقتصادی پاسخگویی بار بر اساس کشش قیمتی تقاضا و تابع مطلوبیت مشترکین انجام گرفته است. از آنجا که تقاضای مشترکین به علائم تصمیم‌گیری متفاوتی، از قبیل قیمت برق، سطح مشارکت مشترکین، ارزش مشوق‌ها و جریمه‌های تعیین شده در برنامه‌های پاسخگویی بار بستگی دارد در مرجع [11] تلاش شده است که با استفاده از یک مدل جدید اقتصادی این علائم شبیه‌سازی شود. در مرجع [12] به ارائه مدلی از مسئله تعهد تولید با هدف بررسی تعیین نقش پاسخگویی بار و اجرای برنامه‌های مدیریت سمت مصرف در بهره‌برداری بهینه از سیستم‌های قدرت پرداخته شده است. در این مقاله مسئله بهره‌برداری ریزشبکه در حضور خودروهای برقی و بارهای پاسخگوی تقاضا و با در نظر گرفتن عدم قطعیت مربوط به توان تبادلاتی خوروهای برقی با شبکه به صورت MILP فرمول بندی شده است. تابع هدف مسئله کمینه نمودن هزینه‌های بهره‌برداری ریزشبکه بوده و قیود مربوط به پخش بار DC و محدودیت های عملیاتی DG ها و خودروها از جمله قیود در نظر گرفته شده در مدل پیشنهادی MILP می‌باشند. همچنین در مدل پیشنهادی جایابی ایستگاه‌های خودروهای برقی در سطح ریزشبکه انجام شده است. یک شبکه ۲۴ باسه شامل تعداد ۳۳ واحد تولیدی DG، ۸ ایستگاه خودرو برقی و ۱۱ بار مشارکت کننده در برنامه پاسخگویی تقاضا به عنوان ریزشبکه مورد مطالعه در نظر گرفته شده و از نرم افزار گمز جهت اجرای شبیه‌سازی استفاده شده است. نوآوری‌های این مقاله عبارتند از:

۱-مدلسازی جامع مسئله بهره‌برداری احتمالاتی ریزشبکه با در نظر گرفتن همزمان واحدهای DG، خودروهای برقی و برنامه‌های پاسخگویی تقاضا؛

۲- ارائه مدل MILP برای مسئله بهره‌برداری بهینه ریزشبکه در حضور خودروهای برقی و با در نظر گرفتن مسئله پاسخگویی تقاضای بار؛

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-23]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1398.8.1.2.3]

۳-تحلیل تأثیر برنامه‌های پاسخویی تقاضا بر کنترل عدم قطعیت توان تبادلاتی خودروهای برقی.

۲ـ توصیف مسئله

در این مقاله به بهره‌برداری بهینه ریزشبکه‌ها در حضور خودروهای برقی و با در نظر گرفتن پاسخگویی تقاضا و با هدف کمینه نمودن هزینه بهره‌برداری ریزشبکه پرداخته می‌شود. همچنین اثرات حضور خودروهای برقی و همچنین پاسخگویی بار بر مسئله بهره‌برداری ریزشبکه مورد مطالعه قرار می‌گیرد. محل قرارگیری ایستگاه‌های خودروهای برقی، میزان توان ساعتی دریافتی از شبکه بالادست، میزان تولید ساعتی واحدهای DG، میزان توان شارژ و دشارژ ساعتی خودروها در ایستگاه‌های شارژ،و همچنین میزان ساعتی بار قطع شده و همچنین انتقال یافته بارهای مشارکت کننده در برنامه پاسخگویی تقاضا متغیرهای کنترلی مسئله پیشنهادی را تشکیل می‌دهند. در این مقاله مسئله بهینه‌سازی با مدل برنامه‌ریزی ترکیبی خطی عدد صحیح MILP حل می‌شود.

۲-۱- پاسخگویی تقاضا

پاسخگویی تقاضا مجموعه اقداماتی هستند که برای تغییر الگوی مصرف برق به منظور بهبود قابلیت اطمینان شبکه و جلوگیری از جهش قیمت‌ها، خصوصا در ساعات پیک بار اجرا می‌شوند. اهمیت این موضوع وقتی بهتر روشن می‌شود که میزان تولید و مصرف در ساعات مختلف شبانه روز با میزان ظرفیت نصب شده نیروگاهی مقایسه شود بدین صورت که در ساعات کم باری میزان قابل ملاحظه‌ای از ظرفیت نیروگاهی بلا استفاده است و از آن استفاده نمی‌شود و در ساعات اوج بار حتی ممکن است میزان مصرف چنان بالا رود که نیاز به خرید برق از شبکه‌های خارجی یا حتی نیاز به احداث نیروگاه جدید باشد. برنامه پاسخگوی بار باید طوری طراحی شود که بار مصرفی مصرف کنندگان را به نوعی مدیریت کرده و برای هر دو طرف تولید کننده و مصرف کننده منفعت اقتصادی به همراه داشته باشد.

قابلیت پاسخگویی تقاضا (DR[1]) بارها بر اساس نوع مشخصه آن ها تعیین می شود. در این مقاله بارها بر اساس نوع مشخصه به سه نوع قابل قطع (IL[2])، غیر قابل قطع (NSL[3]) و باهای قابل انتقال (SL[4]) تقسیم می شوند. زمانی که یک بار IL مشارکت می کند، می تواند به صورت جزئی یا کامل قطع شود. اگر یک بار NSL قطع شود منجر به جریمه قطع بار می گردد. اما در ارتباط با بارهای SL، مصرف این بارها نمی تواند توسط بهره بردار سیستم کاهش یابد بلکه می تواند به صورت بهینه به ساعت های دیگر انتقال داده شود. قابل توجه است که بارهای نوع IL و SL تنها زمانی می توانند به عنوان بارهای پاسخگوی تقاضا در نظر گرفته شوند که به صورت داوطلبانه در برنامه DR شرکت نمایند [۱۳].

توان تحویل داده شده به بارهای IL که تمایل به مشارکت در برنامه DR دارند می تواند با رابطه (۱) مدل شود:

$$\left(1-\eta_{d,t}\right)PD_{d,t}^{IL,Or} \le PD_{d,t}^{IL} \le PD_{d,t}^{IL,Or} \qquad (۱)$$

که در آن:

$PD_{d,t}^{IL}$: توان تحویل داده شده به مشترک d در زمان t؛

$PD_{d,t}^{IL,Or}$: مصرف اولیه بار IL قبل از قطع بار؛

$\eta_{d,t}$: نرخ مشارکت مشترک d در برنامه DR در زمان t؛

مقدار کمتر پارامتر $\eta_{d,t}$ تمایل کمتر مشترک d جهت مشارکت در برنامه DR را نشان می دهد.

در ارتباط با بارهای SL، فرض می شود که میزان بار آن می تواند آزادانه به ساعت های دیگر انتقال داده شود. واضح است که مجموع بارهای انتقال داده شده از ساعت t' برابر است با مقدار مشارکت داده شده بار SL اولیه در آن ساعت:

$$\sum_{t} PT_{d,t',t}^{SL} = \eta_{d,t} PD_{d,t'}^{SL,Or} \qquad (۲)$$

که در آن:

$PT_{d,t',t}^{SL}$: میزان توان انتقال داده شده بار SL مشترک d از ساعت t' به ساعت t؛

$PD_{d,t'}^{SL,Or}$: مصرف اولیه بار SL قبل از شیفت بار؛

بعد از انتقال بار مقدار بار انتقال داده شده در هر ساعت از رابطه (۳) محاسبه می شود:

$$PD_{d,t}^{SL} = \sum_{t'} PT_{d,t',t}^{SL} \qquad (۳)$$

که در آن:

$PD_{d,t}^{SL}$: مقدار بار SL انتقال داده شده در هر ساعت بعد از شیفت بار؛

مصرف انرژی برای SL باید به صورت کامل مطابق با رابطه (۴) پوشش داده شود:

$$\sum_{t} PD_{d,t}^{SL} = \sum_{t} \eta_{d,t} PD_{d,t'}^{SL,Or} \qquad (۴)$$

[1] Demand response
[2] Interruptible load
[3] Non-sheddable load
[4] Shiftable load

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-23]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1398.8.1.2.3]

مطابق با رابطه (۴) مجموع میزان بار SL انتقال داده شده در طول ساعت های مختلف باید برابر مجموع توان مشارکت داده شده بارهای SL در ساعت های مبدا باشد.

در ارتباط با بارهای NSL، این بارها امکان قطع ندارند و قطع این بارها نارضایتی مشترکین را به همراه دارد. علاوه بر بارهای NSL، بارهای از نوع IL و SL نیز در صورتی که در برنامه DR شرکت نکنند از نوع غیر قابل قطع در نظر گرفته می شوند.

برای هر مشترک d در ساعت t، توان NSL بار از رابطه (۵) محاسبه می شود:

$$PD_{d,t}^{NSL} = PD_{d,t}^{Or} + (1-\eta_{d,t})PD_{d,t}^{IL,Or} + (1-\eta_{d,t})PD_{d,t}^{SL,Or} - PD_{d,t}^{NSL,LS} \quad (۵)$$

$$0 \le PD_{d,t}^{NSL,LS} \le PD_{d,t}^{NSL} \quad (۶)$$

که در آن:

$PD_{d,t}^{NSL}$: میزان توان NSL مشترک d در ساعت t؛

$PD_{d,t}^{Or}$: مصرف اولیه بار NSL مشترک؛

$PD_{d,t}^{NSL,LS}$: مقدار بار تامین نشده مشترک؛

جملات دوم و سوم در رابطه (۵) درصد بار IL و SL ای را نشان می دهند که در برنامه DR مشارکت نکرده و به صورت غیر قابل قطع در نظر گرفته می شوند. رابطه (۶) حدود تغییرات قطع بار مشترکین را نشان می دهد.

۲-۲- مدلسازی عدم قطعیت خودروهای الکتریکی

با توجه به تعداد زیاد خودروهای برقی در شبکه و امکان شارژ یا دشارژ این خودروها در ساعت های مختلف، میزان توان دریافتی از شبکه و یا تزریقی به شبکه توسط این خودروها دارای عدم قطعیت زیادی می‌باشد که نیاز است در روش پیشنهادی بهره‌برداری ریزشبکه مدل گردد. بدین منظور تعداد زیادی سناریو برای میزان توان شارژ و دشارژ خودروها تولید می‌شود. بدین منظور از توزیع احتمالی نرمال با میانگین و انحراف معیارمشخص استفاده می‌شود. پس ازایجاد سناریوهای مختلف وانتخاب محتمل ترین آن‌ها از بین تعداد زیادی سناریو، لازم است تا احتمال وقوع هرکدام را درون مسئله اثر دهیم. بدین منظوراز کتابخانه GAMS بهره می بریم وتابع های مربوط به محاسبه آمار احتمال را درون کد فراخوانی می کنیم، بدیهی است که سناریوهای موجود برتوان خروجی نیروگاه ها اثر دارد که اثر آن بر مسئله درون قسمت فرمول بندی قابل مشاهده می باشد.

۲-۳-تابع هدف

تابع هدف در این مسئله کمینه کردن هزینه بهره برداری ریزشبکه می‌باشد. تابع هدف در رابطه شماره (۷) نمایان است که از مجموع هزینه خرید توان از شبکه بالادست، هزینه‌های تولید واحدهای DG، راه‌اندازی و خاموشی واحدها، شارژ و دشارژ خودروهای برقی و هزینه های کاهش و جابجایی بارهای IL و SL مشترکین و همچنین مبالغ تشویقی جهت مشارکت این باها در برنامه پاسخگویی تقاضا بدست می‌آید.

$$Min\ C_T = \sum_s \frac{p_s}{\sum_s p_s} \sum_t \left(\begin{array}{l} P_{t,s}^{USN}\rho_t^{USN} + \sum_g \left(\begin{array}{l} P_{g,t,s}\rho G_{g,t} + \\ Cst_{g,t,s} + Cshd_{g,t,s} \end{array} \right) + \\ \sum_n \left(\begin{array}{l} Pdch_{n,t,s}\rho dch_t - Pch_{n,t,s} \times \rho ch_t + \\ \sum_d \left(\begin{array}{l} PD_{d,t,s}^{NSL,LS}\rho DR_t^{NSL} + \\ \left(PD_{d,t}^{IL,Or} - PD_{d,t,s}^{IL}\right)\rho DR_{d,t}^{IL} \\ +\eta_{d,t}\sum_t PD_{d,t}^{SL,Or}\rho DR_{d,t}^{SL} \end{array} \right) \end{array} \right) \end{array} \right) \quad (۷)$$

$P_{t,s}^{USN}$: توان ساعتی دریافتی از شبکه بالادست تحت سناریوها

ρ_t^{USN}: هزینه ساعتی خرید برق از شبکه بالادست

$P_{g,t,s}$ توان تولیدی ساعتی واحدهای DG تحت سناریوها

$\rho G_{g,t}$:هزینه تولید ساعتی واحدهای DG

p_s : احتمال وقوع سناریو

$Cst_{g,t,s}$: هزینه راه اندازی واحد DG

$Cshd_{g,t,s}$: هزینه خاموشی واحد DG

$Pdch_{n,t,s}$: توان دشارژ v2g

ρdch_t : هزینه دشارژ v2g در ساعت‌های مختلف

$Pch_{n,t,s}$: توان شارژ v2g در ساعت‌های مختلف

ρch_t : هزینه شارژ v2g در ساعت‌های مختلف

ρDR_t^{NSL}: هزینه جریمه قطع بار NSL؛

$\rho DR_{d,t}^{IL}$: نرخ تشویقی برای بار IL مشترک d جهت شرکت در برنامه DR

$\rho DR_{d,t}^{SL}$: نرخ تشویقی برای بار SL مشترک d جهت شرکت در برنامه DR

آنگونه که از رابطه (۷) مشخص است میانگین وزنی هزینه کل بهره‌برداری تحت سناریوهای مختلف توان تبادلاتی خودروهای برقی به عنوان تابع هدف مینیمم گردیده است. آنگونه که در رابطه (۷) نشان داده شده است، بار محلی ریزشبکه می‌تواند توسط واحدهای DG محلی و یا دریافت توان از

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-23]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1398.8.1.2.3]

شبکه بالادست تامین گردد. درحقیقت در ساعت هایی که هزینه خرید برق از شبکه بالادست کمتر از هزینه تولید واحدهای DG محلی باشد ریزشبکه در حالت متصل به شبکه عمل می‌کند، اما در صورتی که هزینه خرید شبکه بالادست بیشتر از هزینه تولید واحدهای DG محلی باشد، ریزشبکه حالت منفصل از شبکه پیدا کرده و توان دریافتی از شبکه بالادست صفر می‌شود.

۴-۲-قیود مسئله

قیود مسئله موردبررسی در این قسمت ارائه شده‌اند. رابطه (۸) محدودیت توان دریافتی از شبکه بالا دست را بیان می‌کند. قیود (۹) و (۱۰) نشان می‌دهند که اگر واحد DG روشن باشد توان تولیدی واحد DG از حداقل توان واحد DG بیشتر و از حداکثر توان آن کمتر خواهد بود. همچنین بر اساس این قیود در صورتی که یک واحد DG از مدار خارج باشد توان تولیدی آن نیز ناگزیر صفر بدست می‌آید.

$$P_{t,s}^{USN} \le P_t^{USN,\max} \qquad (۸)$$

$$P_{g,t,s} \ge P_g^{\min} U_{g,t,s} \qquad (۹)$$

$$P_{g,t,s} \le P_g^{\max} U_{g,t,s} \qquad (۱۰)$$

$P_t^{USN,\max}$: ماکزیمم توان دریافتی ساعتی از شبکه بالادست

$U_{g,t,s}$: متغیر باینری بیانگر وضعیت روشن و خاموش بودن واحدهای DG

قیود شماره (۱۱) و (۱۲) مربوط به روابط پخش بار DC در شبکه بوده و محدودیت انقال توان خطوط را نشان می دهند.

$$\beta_{nn'}(\delta_{n,t,s} - \delta_{n',t,s}) \ge -cap_{nn'} \qquad (۱۱)$$

$$\beta_{nn'}(\delta_{n,t,s} - \delta_{n',t,s}) \le cap_{nn'} \qquad (۱۲)$$

$\beta_{nn'}$: سوسپتانس خط بین باس‌های n و n'

$\delta_{n,t,s}$: زاویه ولتاژ باس‌ها

$cap_{nn'}$: ظرفیت خط بین باس‌های n و n'

قید (۱۳) مربوط به تعادل توان در شین‌ها می‌باشد. مشارکت انواع مختلف بارهای IL وSL در برنامه‌های پاسخگویی تقاضا در این رابطه نشان داده شده است.

$$\sum_g P_{g,t,s} + Pdch_{n,t,s} - Pch_{n,t,s} = \sum_{n'} \beta_{nn'}(\delta_{n,t,s} - \delta_{n',t,s}) + \sum_d \left(PD_{d,t,s}^{NSL} + PD_{d,t,s}^{IL} + PD_{d,t,s}^{SL} \right) \qquad (۱۳)$$

محاسبه هزینه راه‌اندازی واحدها با استفاده از رابطه (۱۴) برای زمان اول (t1) و رابطه (۱۵) برای سایر زمان ها (t>t1) صورت می‌گیرد.

قید (۱۴) بیانگر این است که در لحظه اول (t1) اگر واحد g DG نیاز به روشن شدن داشته باشد، هزینه راه‌اندازی واحدهای DG محاسبه و در رابطه (۲) جایگذاری می‌شود. قید (۱۵) بیانگر این است که در زمان t>t1 حین تامین بار شبکه توسط واحدهای DG، بار روی شبکه افزایش یابد و نیاز به روشن کردن واحد DG جدید باشد، هزینه راه‌اندازی واحدهای DG محاسبه و در رابطه (۷) جایگذاری شود.

محاسبه هزینه خاموشی واحدها با استفاده از رابطه (۱۶) برای زمان اول (t1) و رابطه (۱۷) برای سایر زمان ها (t>t1) صورت می‌گیرد. قید (۱۶) بیانگر این است که اگر در لحظه شروع با توجه به باری که روی شبکه است، تعداد واحدهای DG بیشتر از حد مورد نیاز باشد، ممکن است تعدادی از واحدهای DG از مدار خارج شوند که این خارج کردن هزینه‌ای را به خود اختصاص می‌دهد که آن را هزینه خاموشی واحد g DG می‌نامند و پس از بدست آوردن این هزینه در رابطه (۷) جایگذاری خواهد شد. در زمان t>t1 در حین تامین بار شبکه توسط واحدهای DG ، بار روی شبکه کاهش می‌یابد پس طبیعتا هم از لحاظ اقتصادی و از لحاظ اتلاف انرژی بصرفه نیست که تمام واحدهای DG روشن باشند پس ممکن است تعدادی از واحدها خاموش شوند. این خاموش شدن هزینه‌ای را در بر می‌گیرد که آن را هزینه خاموشی واحد DG می‌نامند و از رابطه (۱۷) محاسبه می‌شود.

$$Cst_{g,t1,s} \ge \rho st_g (U_{g,t1,s} - Ins_g) \qquad (۱۴)$$

$$Cst_{g,t,s} \ge \rho st_g (U_{g,t,s} - U_{g,t-1,s}) \quad \forall t > t1 \qquad (۱۵)$$

$$Cshd_{g,t1,s} \ge \rho shd_g (Ins_g - U_{g,t1,s}) \qquad (۱۶)$$

$$Cshd_{g,t,s} \ge \rho shd_g (U_{g,t,s} - U_{g,t,s}) \quad \forall t > t1 \qquad (۱۷)$$

ρst_g : هزینه ثابت راه‌اندازی واحد g DG

Ins_g : حالت اولیه واحد g DG در زمان صفر

$t1$: زمان اولیه

ρshd_g : هزینه ثابت خاموشی واحد g DG

در این مقاله علاوه بر حل مسئله بهره‌برداری ریزشبکه، جایابی بهینه ایستگاه‌های خودروهای برقی نیز در سطح ریزشبکه انجام شده است. قید (۱۸) توان خالص خروجی v2g را نشان می‌دهد که از تفاضل توان شارژ از توان دشارژ بدست می‌آید. قیود (۱۹) و (۲۰) حدود توان دشارژ را نشان می‌دهد که کمترین مقدار آن صفر و بیشترین مقدار آن در رابطه (۱۹) مشخص شده است.

$$Pv2g_{n,t,s} = Pdch_{n,t,s} - Pch_{n,t,s} \qquad (۱۸)$$

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-23]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1398.8.1.2.3]

$$Pdch_{n,t,s} \le v2gdchcap \times \mu_n \quad (۱۹)$$

$$Pdch_{n,t,s} \ge 0 \quad (۲۰)$$

$Pv2g_{n,t,s}$: توان خروجی v2g

$v2gchcap$: ظرفیت دشارژ v2g

μ_n : متغیر باینری بیانگر وضعیت حضور و یا عدم حضور v2g روی باس‌ها (۰ عدم حضور، ۱ حضور)

اگر ایستگاه شارژ خودروی برقی روی شین n وجود داشته باشد، μ_n برابر ۱ می‌شود. قیود (۲۱) و (۲۲) حدود توان شارژ را نشان می‌دهد که کمترین مقدار آن صفر و بیشترین مقدار آن در رابطه (۲۱) مشخص شده است. قید (۱۹) مربوط به مجموع تعداد ایستگاه‌های خودرو برقی می‌باشد که قرار است جایابی شوند.

$$Pch_{n,t,s} \le v2gchcap \times \mu_n \quad (۲۱)$$

$$Pch_{n,t,s} \ge 0 \quad (۲۲)$$

$$\sum_n \mu_n = N_{V2G} \quad (۲۳)$$

$v2gchcap$: ظرفیت شارژ v2g

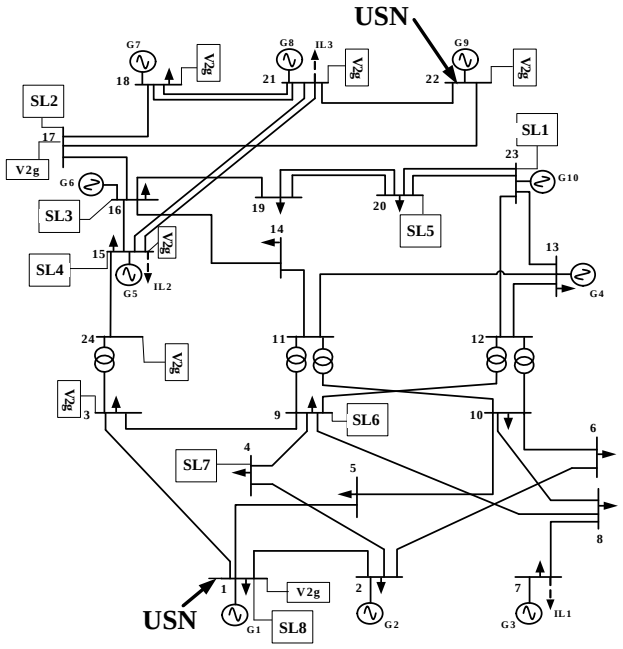
N_{V2G} :تعداد ایستگاه‌های خودروی برقی

۳- شبیه سازی و نتایج عددی

جهت حل مسئله پیشنهادی از نرم افزار گمز استفاده می‌شود. این نرم‌افزار از سرعت بسیار بالایی در حل مدل‌های بزرگ برخوردار است. در این مقاله برای حل مسئله بهینه از روش بهینه سازی برنامه ریزی ترکیبی خطی عدد صحیح (MILP) استفاده خواهد شد. این بهینه سازی زیر شاخه‌ای از بهینه سازی ریاضی است که مسائل آن مشابه مسائل بهینه سازی خطی است، با این تفاوت که همه یا برخی از متغیرهای مسئله عدد صحیح هستند. همانند بهینه‌سازی خطی، هدف برنامه‌ریزی عدد صحیح پیدا کردن مقدار کمینه یا بیشینه از یک تابع خطی بر روی فضایی با محدودیت‌هایی خطی است، اما به دلیل وجود متغیرهای گسسته این فضا پیوسته و محدب نیست بلکه فضایی گسسته است. واحدهای DG، باس‌ها و زمان به عنوان پارامترهای اصلی معرفی می‌شوند. ظرفیت شارژ و دشارژ خودروی برقی، هزینه شارژ و دشارژ خودروی برقی، بیشترین حد توان کاهش بار و هزینه کاهش بار در بارهای پاسخگوی تقاضا به عنوان یک عدد اسکالر تعریف می‌شوند. تابع هدف، توان خروجی واحدهای DG در زمان‌های مختلف، توان شارژ و دشارژ خودروهای برقی در زمان‌های مختلف، توان کاهش بار در بارهای پاسخگوی تقاضا در زمان‌های مختلف، زاویه باس‌ها در زمان‌های مختلف، وضعیت روشن و خاموش بودن واحدهای DG در زمان‌های مختلف، هزینه راه‌اندازی و خاموشی واحدهای DG در زمان‌های مختلف، توان خروجی خودروهای برقی در زمان‌های مختلف، وضعیت حضور و یا عدم حضور v2g روی باس‌ها و وضعیت حضور و یا عدم حضور بار کاهشی روی باس‌ها به عنوان متغیر تعریف می‌شوند. توان‌ها و هزینه‌ها از جمله متغیرهای مثبت و وضعیت حضور و یا عدم حضور v2g روی باس‌ها و وضعیت حضور و یا عدم حضور بار کاهشی روی باس‌ها از جمله متغیرهای باینری می‌باشند. نتایج شبیه‌سازی این برنامه در این قسمت ارائه می‌شود:

۳-۱- سیستم مورد مطالعه

سیستم مورد مطالعه در شکل (۱) نمایش داده شده است. این شبکه یک شبکه ۲۴ باسه شامل ۳۳ واحد تولیدی DG که روی ۱۰ شین سیستم قرار گرفته‌اند، ۸ ایستگاه خودرو برقی و ۱۱ بار مشارکت کننده در برنامه پاسخگویی تقاضا می‌باشد. از این تعداد بار ۸ بار از نوع قابل انتقال (SL) و سه بار از نوع قابل قطع (IL) می باشند. سایر بارهای مشخص شده روی سیستم از نوع بارهای غیر قابل قطع (NSL) می‌باشند. شبکه نشان داده شده از طریق دو شین ۱ و ۲۲ از شبکه بالادست (USN[5]) تغذیه می شود، و با توجه به قیمت خرید برق از شبکه بالادست، ریزشبکه می‌تواند در حالت‌های متصل به شبکه یا منفصل از شبکه بالادست عمل نماید. بازه زمانی بهره‌برداری ریزشبکه ۲۴ ساعت در نظر گرفته شده است؛ و جایابی ۸ ایستگاه خودرو برقی به گونه‌ای صورت می‌گیرد که ضمن تامین قیود امنیتی سیستم، میانگین وزنی هزینه بهره‌برداری ریزشبکه در طول ۲۴ ساعت و تحت سناریوهای مورد بررسی کمینه گردد.

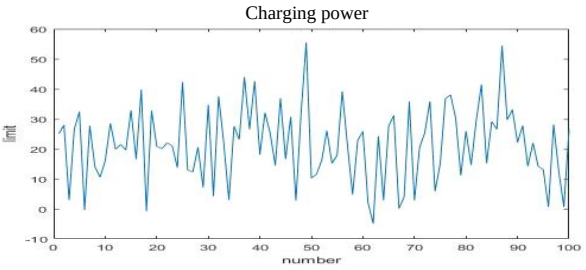


شکل(۱): ریزشبکه نمونه مورد مطالعه

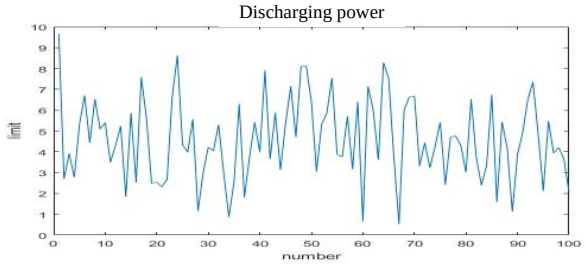
[5] Upstream network

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-23]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1398.8.1.2.3]



شکل۲- توزیع نرمال مربوط به توان شارژ خودروهای برقی



شکل۳- توزیع نرمال مربوط به توان دشارژ خودروهای برقی

پارامترهای ورودی مسئله شامل راکتانس شاخه‌ها، بار متصل به شبکه (توان اکتیو و راکتیو) ، توان تولید هر باس، ظرفیت خطوط انتقال، اطلاعات مربوط به واحدهای DG و هزینه هر کدام از آنها می‌باشد. تعداد سناریوهای تولیدی برای شارژ و دشارژ خودروهای برقی ۱۰۰ عدد می باشند که توزیع نرمال آنها در شکل‌های (۲) و (۳) نمایش داده شده است. همچنین میانگین وانحراف معیار هریک ازمولفه های توان شارژ و دشارژ هرسناریو درجدول (۱) قابل مشاهده و بررسی است. در این مرحله تعداد ۶۰ سناریو متمایز که دارای بیشترین احتمال وقوع هستند را از میان ۱۰۰۰۰ سناریوی تولیدی انتخاب می‌کنیم.

جدول (۱): میانگین وانحراف معیار(STD) سناریوها

انحراف معیار	میانگین(mean)	
۱.۱۳	۲۰	مولفه توان شارژ
۱.۲	۵.۴	مولفه توان دشارژ

جهت بررسی کارایی برنامه پاسخگوی تقاضا پیشنهادی در کنترل عدم قطعیت ناشی از توان مبادلاتی خودروهای برقی، نتایج بهره‌برداری ریزشبکه در سه موردمطالعه زیر با یکدیگر مقایسه و تحلیل می‌شوند:

مورد مطالعه ۱: بهره‌برداری احتمالاتی ریزشبکه در حضور خودروهای برقی و با در نظر گرفتن برنامه DR

موردمطالعه ۲: بهره‌برداری احتمالاتی ریزشبکه در حضور خودروهای برقی و بدون در نظر گرفتن برنامه DR

موردمطالعه ۳: بهره‌برداری ریزشبکه بدون حضور خودروهای برقی و بدون در نظر گرفتن برنامه DR

نتایج بهینه‌سازی بر روی سیستم مورد نظر در سه حالت فوق در قسمت‌های بعدی ارائه و مقایسه شده‌اند.

۲-۳- تحلیل نتایج

آنگونه که در شکل (۱) نیز نمایش داده شده است برای مورد مطالعه ۱ ایستگاه‌های خودروهای برقی در شین های ۱، ۳، ۱۵، ۱۷، ۱۸، ۲۱، ۲۲ و ۲۴ ریزشبکه جایابی شده‌اند. در جدول (۲) هزینه‌ی بهره برداری کل شبکه در سه موردمطالعه فوق الذکر با یکدیگر مقایسه شده‌اند. همانگونه که در جدول (۲) مشاهده می‌شود هزینه بهره‌برداری ریزشبکه در موردمطالعه ۲ نسبت به موردمطالعه ۳ به میزان ۲/۶٪ کاهش یافته است که این موضوع کارایی حضور خودروهای برقی در ریزشبکه را اثبات می‌کند. همچنین از این جدول مشاهده می‌شود که هزینه بهره‌برداری ریزشبکه در در موردمطالعه ۱ نسبت به موردمطالعه ۲ به میزان ۳/۹۱٪ کاهش یافته است که این موضوع کارایی برنامه DR پیشنهادی در ریزشبکه را نشان می‌دهد.

جدول (۲):مقایسه شاخص های اقتصادی ریزشبکه در موردمطالعه‌های مختلف

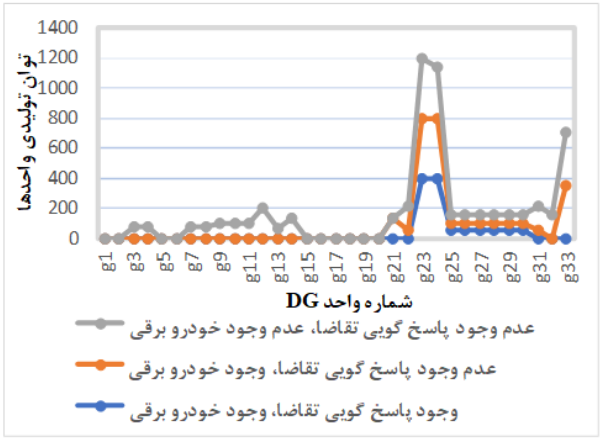
مورد مطالعه شبکه	هزینه‌ی بهره‌برداری ($)
موردمطالعه ۳	۱۷۹۵۸۳
موردمطالعه ۲	۱۷۴۹۱۲
موردمطالعه ۱	۱۶۸۰۵۸

-توان تولیدی واحدهای DG

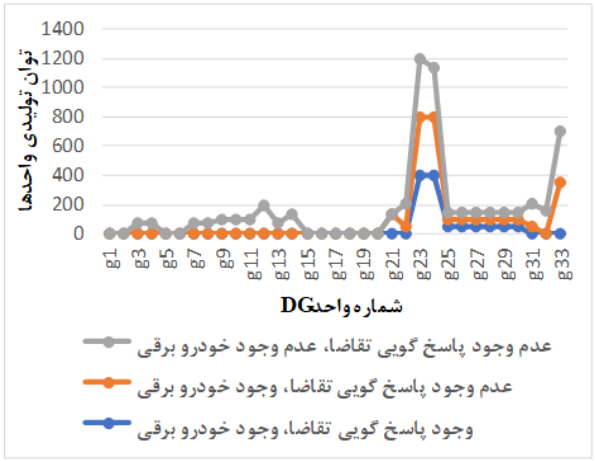
در شکل‌های (۴)، (۵)، (۶) و (۷) توان تولیدی واحدهای DG به ترتیب در چهار ساعت اولیه نمایش داده شده‌اند. در شکل (۸) مجموع ۲۴ ساعت توان تولیدی هر واحد DG نشان داده شده است که محور افقی نشان دهنده تعداد واحدهای DG که همان ۳۳ است، می‌باشد و در شکل (۹) مجموع توان کل واحدهای DG در حالت های مورد مطالعه نشان داده شده است. این شش نمودار بیان می‌دارند در مورد مطالعه ۲ نسبت به مورد مطالعه ۳، حضور خودروهای برقی سبب کاهش توان تولیدی واحدهای DG می‌شود؛ به گونه‌ای که توان تولیدی برخی از واحدهای DG صفر می‌شود. همچنین نتایج شبیه‌سازی از کاهش ۳/۱۳ درصدی توان دریافتی از شبکه بالادست در مورد مطالعه ۲ نسبت به مورد مطالعه ۳ حکایت دارند. این روند در مورد مطالعه ۳ نسبت به مورد مطالعه ۲ نیز تکرار می‌شود. یعنی مشارکت برخی از بارهای سیستم در برنامه پاسخگویی تقاضا سبب کاهش توان تولیدی واحدهای DG می‌شود و عملا تعدادی از واحدهای DG از مدار خارج می‌شوند که این موضوع باعث کاهش هزینه می‌شود. همچنین مشارکت بارها

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-23]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1398.8.1.2.3]

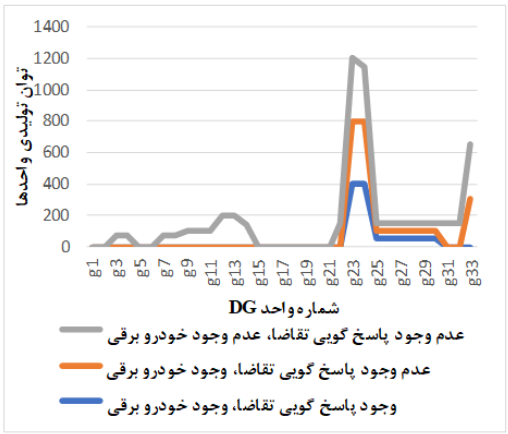
در برنامه پاسخگویی تقاضا سبب کاهش توان دریافتی از شبکه بالادست به میزان ۲/۷۱ درصد از موردمطالعه ۲ به مورد مطالعه ۱ می‌شود.



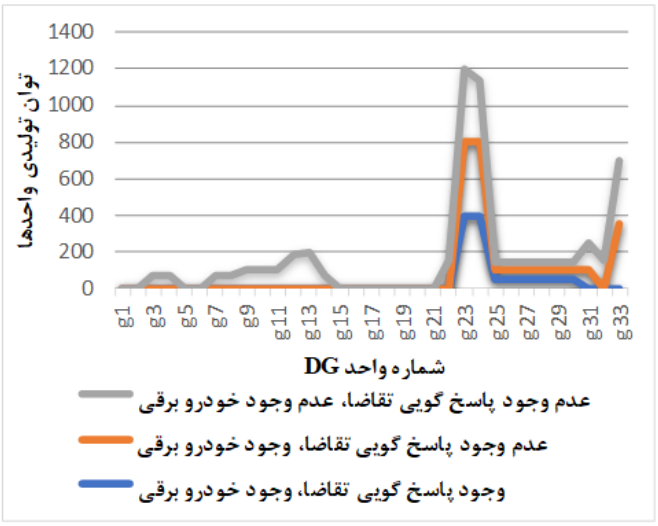
شکل(۴):مقایسه توان تولیدی واحدهای DG در زمان t1



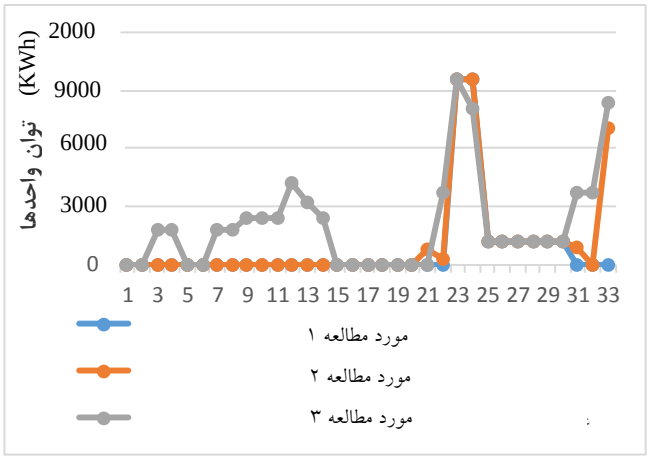
شکل(۵): مقایسه توان تولیدی واحدهای DG در زمانt2



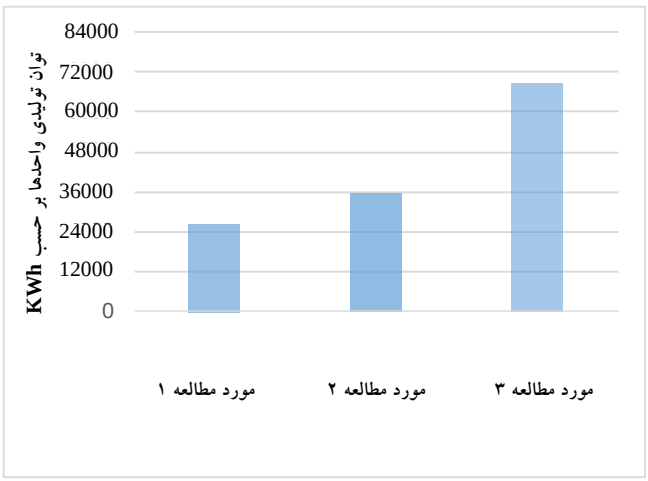
شکل(۶):مقایسه توان تولیدی واحدهای DG در زمان t3



شکل(۷):مقایسه توان تولیدی واحدهای DG در زمان t4



شکل (۸) : مجموع توان تولیدی هر واحد DG در ۲۴ ساعت



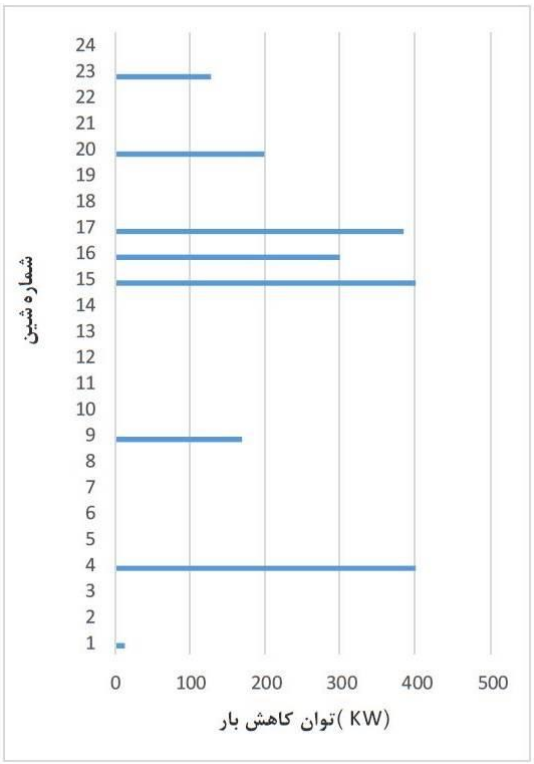
شکل (۹) : مقایسه مجموع توان تولیدی واحدهای DG در ۲۴ ساعت برای سه مورد مطالعه

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-23]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1398.8.1.2.3]

- پاسخ گویی تقاضای بار

در این قسمت تاثیر در نظر گرفتن پاسخ گویی تقاضای بار بر روی هر کدام از شین‌ها در نمودار شکل (۱۰) نمایش داده شده‌اند و همانگونه که مشاهده می‌شود پاسخ گویی تقاضای بار توان بار روی شین های ۱، ۴، ۹، ۱۵، ۱۶، ۱۷، ۲۰ و ۲۳ کاهش داده است اما به دلیل اینکه اعمال پاسخ گویی تقاضای بار بر روی سایر شین ها سبب افزایش هزینه می‌شود نرم افزار از اعمال پاسخ گویی تقاضای بار بر روی سایر شین‌ها چشم پوشی کرده است.



شکل (۱۰) : توان کاهش بار در بارهای پاسخگوی تقاضا برای شین‌های مختلف

۴- نتیجه گیری

در این مقاله یک ریزشبکه متشکل از یک شبکه ۲۴ باسه، ۱۰واحد تولیدی DG و همچنین ۸ واحد خودرو برقی و با در نظر گرفتن پاسخ گویی تقاضای بار مورد مطالعه قرار گرفته و مسئله بهره‌برداری بهینه آن با هدف کاهش هزینه بهره‌برداری حل شده است. بازه زمانی بهره‌برداری ۲۴ ساعت در نظر گرفته شده است. مسئله با استفاده از مدل MILP حل شده است. با توجه به نتایج به دست آمده با در نظر گرفتن پاسخ گویی تقاضای بار هزینه کل کاهش می‌یابد و علاوه بر آن در نظر گرفتن پاسخگویی تقاضا بار سبب کاهش توان تولیدی بعضی از واحدهای DG و همچنین کاهش توان دریافتی از شبکه بالادست می‌شود، که این موضوع سبب کاهش قابل ملاحظه هزینه‌های بهره‌برداری شبکه می‌شود.

۵- منابع

[1] ابراهیم زارعی، محسن محمدیان، علی اکبر قره ویسی، مشارکت پاسخ بار در برنامه ریزی تولید نیروگاه‌ها، مجله مهندسی برق و الکترونیک ایران، ۱۳۹۵، ۱۳(۳)، ۷۳-۸۲

[2] H.Cai, W.Du, X.P.Yu, S.Gao, T.Littler, H.F.Wang,“ Day-ahead Optimal Charging/Discharging Scheduling for Electric Vehicles in Micro-grids”

[3] Arefifar,S. A., Mohamed, Y. A-R. I., El-Fouly, T.H. M., "Supply-Adequacy-Based Optimal Construction of Microgrids in Smart Distribution Systems", IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 3, P.P. 1491 - 1502, 2012.

[4] Sayed Saeed Hosseini, Ali Badri, Masood Parvania , “ The Plug-in Electric Vehicles for Power System Applications: The Vehicle to Grid (V2G) Concept” 2nd IEEE ENERGYCON Conference, 2012.

[5] K. Morrow, D. Karner, and J. Francfort, “Plug-in Hybrid Electric Vehicle Charging Infrastructure Review”, The Idaho National Laboratory, Tech. Rep., 2008.

[6] S. Shao, M. Pipattanasomporn, and S. Rahman, “Grid Integration of Electric Vehicles and Demand Response with Customer Choice,” IEEETransactions on Smart Grid, Vol. 3, No. 1, PP. 543–550, Mar. 2012.

[7] محمدرضا آقاابراهیمی، مهدی تورانی، بهینه سازی حضور خودروهای الکتریکی در کنار واحدهای تولید توان به منظور بهبود قابلیت اطمینان ریزشبکه، نشریه علمی-پژوهشی کیفیت و بهره وری صنعت برق ایران، شماره ۹، ۱۳۹۵.

[8] علی احمدیان، مهدی صدقی، مسعود علی‌اکبر گلکار، بهره برداری بهینه از شبکه‌های توزیع فعال با قابلیت جزیره‌ای شدن در حضور منابع تولید پراکنده تجدیدپذیر، ذخیره‌سازها و خودروهای برقی، نشریه علمی-پژوهشی کیفیت و بهره وری صنعت برق ایران، شماره ۶، ۱۳۹۳.

[9] B. Bahmani-Firouzi, R. Azizipanah-Abarghooee, "Optimal sizing of battery energy storage for micro-grid operation management using a new improved bat algorithm", Electrical Power and Energy Systems, Vol. 56, pp. 42–45, 2014.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-23]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1398.8.1.2.3]

[10] فرهاد فردوسیان، اندیشه شیعه بیگی، برنامه ریزی برنامه‌های پاسخگویی بار با حضور منابع تجدیدپذیر در شبکه‌های توزیع انرژی الکتریکی، سومین کنفرانس ملی پژوهش‌های نوین در مهندسی برق، مازندران، ۲۰۱۷.

[11] علی ناظمی، سکینه تجار، مدل‌سازی برنامه‌های پاسخگویی بار زمان محور با در نظر گرفتن کشش قیمتی، دومین کنفرانس بین المللی تحولات نوین در مدیریت، اقتصاد و حسابداری، تهران، ۱۳۹۷.

[12] بهزاد بمپوری، بهره برداری بهینه از شبکه قدرت با در نظر گرفتن منابع سمت مصرف از طریق حل مسئله تعهد تولید در حضور منابع پاسخگویی بار، سومین کنفرانس ملی فناوری در مهندسی برق و کامپیوتر، سمنان، ۲۰۱۸.

[13] J. Gao, Z. Ma, F. Guo, "The influence of demand response on wind-integrated power system considering participation of the demand side", Energy, Vol. 178, 2019, pp. 723-738.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-23]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1398.8.1.2.3]