

## بهره گیری از یک مدل برنامه ریزی درجه دوم عدد صحیح مرکب جهت کنترل بهینه انرژی در شبکه هوشمند با مدنظر قرار دادن منابع انرژی نو، باتری، مدیریت سمت تقاضا با هدف کاهش تلفات، هزینه، آلاینده‌گی و آسیب پذیری سیستم جهت بالا بردن قابلیت اطمینان سیستم های مد نظر

عبدالرضا رحمتیان<sup>۱</sup> و دکتر فرشید کی نیا<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد پژوهشگاه انرژی، پژوهشگاه علوم و تکنولوژی پیشرفته و علوم محیطی، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان، ایران، rahmatianr@gmail.com

<sup>۲</sup> استاد پژوهشگاه انرژی، پژوهشگاه علوم و تکنولوژی پیشرفته و علوم محیطی، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان، ایران، fkeynia@gmail.com

### چکیده

افزایش جمعیت دنیا و توسعه تکنولوژی و اقتصاد باعث افزایش تقاضا مصرف الکترونیسته شده، سرمایه گذاری و بهره برداری از نیروگاه های جدید خوب اما این نیروگاه ها برای احداث نیاز به زمان زیاد، مکانی گسترده و هزینه هنگفتی دارد و در میان رویدادهای مختلف منابع انسانی، رویدادهای اقلیمی و طبیعی (زلزله، سیل، طوفان و...) در سال های اخیر باعث قطعی های عمده شده، یکی از زمینه هایی که بسیار مد نظر محققان قرار دارد، مسئله شبکه های هوشمند است. در یک شبکه هوشمند معمولاً تعداد بسیاری از ادوات مختلف مانند منابع انرژی تجدیدپذیر بادی و خورشیدی، سیستم های ذخیره انرژی مانند باتری، منابع تولید پراکنده مانند ژنراتورهای دیزلی و گازی و همچنین برنامه هایی مانند مدیریت بار وجود دارد، لذا ارائه یک مدل بهینه سازی برای مدل سازی این ادوات و مدیریت بار بهینه در یک دوره ۲۴ ساعته یارو پیشرو که اهداف مختلفی من جمله حصول و افزایش قابلیت اطمینان، از اهمیت ویژه ای برخوردار است. در این مقاله یک مدل بهینه سازی مبتنی بر برنامه ریزی درجه دوم عدد صحیح مرکب برای مدیریت بهینه انرژی در شبکه های هوشمند با در نظر گرفتن، منابع انرژی تجدیدپذیر، سیستم های ذخیره انرژی، منابع تولید پراکنده، ایستگاه های شارژ خودروهای برقی با مسئله مدیریت سمت تقاضا به منظور کاهش تلفات، هزینه، آلاینده گی و آسیب پذیری و در نهایت دستیابی به قابلیت اطمینان سیستم ارائه شده است. از مزیت مدل ارائه شده تضمین جواب های بهینه سراسری نسبت به دیگر روش های موجود می باشد. شبکه هوشمند ۳۳ باس برای تجزیه و تحلیل انتخاب و حل کننده قدرتمند Gurobi برای حل مسئله انتخاب شده است. نتایج نشان دهنده کارایی مدل پیشنهادی برای شبکه های هوشمند می باشد.

واژه های کلیدی: - قابلیت اطمینان، مدیریت ریسک، انرژی نو، باتری، بهینه سازی، شبکه هوشمند، مدیریت سمت تقاضا

### مقدمه

انرژی ممکن است باعث نوسانات و عدم بهره برداری درست بین بار و تولید در شبکه های هوشمند شود [۲-۳]. از چالش های اصلی بهره برداری شبکه های هوشمند ارائه یک راهکار بهینه با مدل سازی دقیق تمامی ادوات موجود در شبکه با توجه به اهداف متنوعی می باشد، که سعی شده در این مقاله به آن پرداخته شود. در [۴] نویسندگان یک

بهره برداری از منابع انرژی تجدیدپذیر و سیستم های ذخیره انرژی فرصتی برای کربن زدایی در شبکه های برق می باشد [۱]. استفاده از واحدهای تولید پراکنده گاز طبیعی و منابع تجدیدپذیر و ذخیره سازی

برنامه‌ریزی بهینه استفاده از توان در شبکه هوشمند ادغام شده با منابع انرژی تجدیدپذیر برای مدیریت انرژی برای کاهش هزینه صورت حساب، نسبت پیک بار به میانگین و انتشار کربن پیشنهاد کردند. در [۵] یک مدل بهینه‌سازی برای سیستم‌های چند انرژی با نفوذ انرژی تجدیدپذیر بالا در یک ریزشبکه مستقل در یک دوره برنامه‌ریزی ۲۴ ساعته پیشنهاد شد. مرجع [۶] یک برنامه بهینه‌سازی روز آینده را برای یک سیستم انرژی یکپارچه شبکه هوشمند با در نظر گرفتن جریان انرژی دو جهت بر اساس برنامه‌ریزی مخروطی مرتبه دوم برای به حداقل رساندن هزینه بهره‌برداری روز آینده سیستم انرژی یکپارچه پیشنهاد کرد. در [۷] یک مدل به اشتراک‌گذاری انرژی در قالب‌های هیدروژن و الکتروسیته در کنار دستگاه‌های برق به گاز تجمیع‌کننده برای به حداکثر رساندن کل رفاه اجتماعی پیشنهاد شده است. در [۸] یک بهینه‌سازی هماهنگ دو مرحله‌ای مقاوم برای سیستم‌های انرژی یکپارچه شبکه‌شده با هاب‌های انرژی با در نظر گرفتن منابع انرژی تجدیدپذیر برای کاهش انحراف ولتاژ در سیستم ۳۳ شینه IEEE که با یک سیستم گازی ۲۰ گره متصل است، پیشنهاد شده است. در [۹] ارائه یک مدل بهینه‌سازی چندهدفه جامع برای مدیریت بهینه انرژی در سیستم‌های چند انرژی محلی در حضور خودروهای برقی مدنظر قرار گرفته شده است که به دنبال به حداکثر رساندن سود اپراتورهای چند انرژی محلی و به حداقل رساندن CO<sub>2</sub> می‌باشد. در مرجع [۱۰] نویسندگان یک مدل تصادفی را برای حل مسئله مدیریت انرژی در شبکه‌های برق و گاز جفت شده با استفاده از سیستم‌های برق به گاز، تولیدات پراکنده گاز-سوز ارائه کردند. در [۱۱] یک مدل خطی عدد صحیح مختلط را به منظور بهینه‌سازی شبکه‌های هوشمند با در نظر گرفتن یک تابع چند-هدفه و منابع انرژی تجدیدپذیر ارائه کرده‌اند. در مرجع [۱۲] یک مدل تصمیم‌گیری تصادفی مبتنی بر سناریو برای تعیین استراتژی بهینه بهره‌برداری از واحدهای یکپارچه تولید گاز طبیعی (NGG) در شبکه‌های هوشمند با هدف افزایش بازدهی شبکه پیشنهاد شده است. نویسندگان در [۱۳] یک روشی مبتنی بر تجزیه برای ارزیابی اثرات منابع تجدیدپذیر بر شبکه‌های هوشمند معرفی کرده‌اند. در مرجع [۱۴] یک الگوریتم تجزیه ناهمگن کارآمد برای حل هماهنگ پخش بار اقتصادی در شبکه‌های هوشمند با در نظر گرفتن حساسیت قیمت حاشیه‌ای به تزریق بار برای افزایش همگرایی و اجتناب از واگرایی پیشنهاد شده است. مرجع [۱۵] یک مدل بهینه‌سازی دوسطحی را بر اساس مدل سطح بالا و پایین ارائه می‌کند تا واحدهای ذخیره‌سازی انرژی توزیع‌شده را به‌طور بهینه در مکان و اندازه توزیع کرده و اهداف بهره‌برداری در هماهنگی شبکه‌های هوشمند را بهبود بخشد. مرجع [۱۶] یک برنامه‌ریزی ذخیره مقاوم توزیع شده را بر اساس روش جهت متناوب شبکه‌های هوشمند چند برابر کننده برای سیستم‌های انتقال و توزیع جفت شده پیشنهاد می‌کند. در مرجع [۱۷] یک راه حل هماهنگ مبتنی بر برنامه‌ریزی غیرخطی و معادله‌های جریان خط در شبکه هوشمند با در نظر گرفتن منابع انرژی برای کاهش

هزینه عملیاتی شبکه‌های برق پیشنهاد شده است. در مرجع [۱۸] یک استراتژی محدب برخط بر اساس مدل پخش بار نامتعادل سه فاز منابع انرژی توزیع شده برای بازیابی سیستم‌های هوشمند یکپارچه پیشنهاد شده است. در مرجع [۱۹] برنامه‌ریزی هماهنگ سیستم‌های هوشمند با استفاده از رویکرد برنامه‌نویسی پویا پیوستگی لپ‌شیتز برای به حداقل رساندن هزینه کل بهره‌برداری پیشنهاد شده است. در مرجع [۲۰] یک روش مبادله یکبار داده جدید برای حل بهره‌برداری شبکه‌های هوشمند مبتنی بر بهینه‌سازی غیرمتمرکز برای به حداقل رساندن هزینه‌های بهره‌برداری و کاهش تلفات پیشنهاد شده است. در مرجع [۲۱] نویسندگان یک مدل سه مرحله‌ای را برای بهره‌برداری بازار هماهنگ شبکه هوشمند و تغییرات تقاضا با استفاده از یک الگوریتم تودرتو تعمیم یافته پیشنهاد کرده‌اند. در مرجع [۲۲] یک روش بهینه‌سازی غیرمتمرکز بر اساس یک چارچوب تصمیم‌گیری برای به‌دست آوردن استراتژی بازسازی هماهنگ بهینه شبکه هوشمند پیشنهاد شده است. از آنجا که سیستم مدیریت انرژی انتقال و توزیع مستقل فعلی با چالش‌های زیادی در ارتباط با ادغام ژنراتورهای توزیع شده در شبکه‌های آینده روبرو است، حل این چالش‌ها، مانند مشکل افزایش ولتاژ که منجر به قطع منابع تولید پراکنده می‌شود، از طریق مدیریت انرژی جداگانه فعلی دشوار خواهد بود، بنابراین در مرجع [۲۳] یک استراتژی بهینه توسط یک الگوریتم تجزیه ناهمگن برای حل بهره‌برداری شبکه‌های هوشمند یکپارچه به صورت توزیع شده مبتنی بر برنامه‌ریزی دوسطحی درجه دوم مختلط پیشنهاد شده است. در مرجع [۲۴] یک روش جداسازی غیر تکراری برای حل هماهنگ جریان بهینه توان مقاوم در شبکه‌های هوشمند با استفاده از برنامه درجه دوم و روش خطی‌سازی پیشنهاد شده است. با توجه به بررسی مطالعات پیشین در زمینه شبکه‌های هوشمند می‌توان بیان نمود که نوآوری‌های این مقاله به شرح زیر می‌باشد:

۱- ارائه یک مدل بهینه‌سازی مبتنی بر برنامه‌ریزی درجه دوم عدد صحیح مرکب که منجر به رسیدن و تضمین جواب‌های بهینه سراسری می‌شود.

۲- مدل‌سازی یک تابع چند-هدفه، شامل کاهش تلفات انرژی، کاهش هزینه خرید انرژی، کاهش آلاینده‌گی زیست محیطی منابع تولید پراکنده و کاهش آسیب‌پذیری سیستم یا انرژی تامین نشده می‌باشد.

۳- در نظر گرفتن مسئله مدیریت سمت تقاضا به همراه شارژ و دشارژ بهینه سیستم‌های ذخیره انرژی در کنار منابع انرژی تجدیدپذیر و فسیلی در یک دوره بهره‌برداری دینامیکی ۲۴ ساعته.

در بخش بعدی مقاله مدل بهینه‌سازی پیشنهاد شده ارائه شده است. بخش سوم نتایج شبیه‌سازی و تجزیه تحلیل داده‌ها ارائه می‌شود و در بخش نهایی نتیجه‌گیری کلی ارائه خواهد شد.

$$P_h^{sub} + \sum_{b=1, h \in N} f_{bi,h}^p - \sum_{b=1, h \in N} f_{bj,h}^p + p_{n,h}^{dis} + p_{n,h}^{DG} + p_{n,h}^{re} + p_{n,h}^{shed} \quad (2)$$

$$= p_{n,h}^{dsm} + p_{n,h}^{ch} + p_{n,h}^{EV} \quad (3)$$

$$q_h^{sub} + \sum_{b=1, h \in N} f_{bi,h}^q - \sum_{b=1, h \in N} f_{bj,h}^q + \partial p_{n,h}^{DG} + q_{n,h}^{shed} = q_{n,h}^{dsm} \quad (3)$$

رابطه (۴) و (۵) به ترتیب نشان دهنده بهره‌برداری مجاز توان اکتیو و راکتیو در هر ساعت از پست شبکه هوشمند می‌باشد. در این روابط  $p_{max}^{sub}$  و  $q_{max}^{sub}$  به ترتیب حداکثر توان اکتیو و راکتیو قابل بهره‌برداری از پست شبکه هوشمند می‌باشد.

$$0 \leq p_h^{sub} \leq p_{max}^{sub} \quad \forall h \in H \quad (4)$$

$$0 \leq q_h^{sub} \leq q_{max}^{sub} \quad \forall h \in H \quad (5)$$

روابط (۶) الی (۹) نشان دهنده مسئله مدیریت سمت تقاضا برای بار اکتیو و راکتیو شبکه می‌باشد. رابطه (۶) و (۸) تضمین می‌کند که در برنامه مدیریت سمت تقاضا هیچ بار اکتیو و راکتیوی از شبکه قطع نشود، در واقع بارهای اکتیو و راکتیو تغییر یافته در مجموع برابر بارهای اکتیو و راکتیو اولیه شبکه باشد که بارهای اکتیو و راکتیو اولیه شبکه با  $p_{n,h}^{ini}$  و  $q_{n,h}^{ini}$  نشان داده شده است. روابط (۷) و (۹) مقدار تغییرات بار اکتیو و راکتیو را نشان می‌دهد که دلتا برابر درصد تغییرات بار روی هر باس شبکه می‌باشد، که در این مقاله برابر ۱۰ درصد در نظر گرفته شده است.

$$\sum_{h \in H} p_{n,h}^{dsm} = \sum_{h \in H} p_{n,h}^{ini} \quad \forall n \in N \quad (6)$$

$$p_{n,h}^{ini} - p_{n,h}^{ini} \times \Delta \leq p_{n,h}^{dsm} \leq p_{n,h}^{ini} + p_{n,h}^{ini} \times \Delta \quad \forall h \in H, n \in N \quad (7)$$

$$\sum_{h \in H} q_{n,h}^{dsm} = \sum_{h \in H} q_{n,h}^{ini} \quad \forall n \in N \quad (8)$$

$$q_{n,h}^{ini} - q_{n,h}^{ini} \times \Delta \leq q_{n,h}^{dsm} \leq q_{n,h}^{ini} + q_{n,h}^{ini} \times \Delta \quad \forall h \in H, n \in N \quad (9)$$

رابطه (۱۰) و (۱۱) نشان دهنده محدودیت شار اکتیو و راکتیو خط شبکه هوشمند می‌باشد. در این روابط به ترتیب  $f_{b,max}^p$  و  $f_{b,max}^q$  حداکثر شار اکتیو و راکتیو خط شبکه هوشمند می‌باشد.

$$-f_{b,max}^p \leq f_{b,h}^p \leq f_{b,max}^p \quad \forall b \in B, h \in H \quad (10)$$

$$-f_{b,max}^q \leq f_{b,h}^q \leq f_{b,max}^q \quad \forall b \in B, h \in H \quad (11)$$

رابطه (۱۲) و (۱۳) محدودیت ولتاژ و ولتاژ شبکه هوشمند را نشان می‌دهد. در اینجا  $v_{n,h}$  ولتاژ باس شبکه و  $v_n^{\min}$  و  $v_n^{\max}$  حداقل و حداکثر ولتاژ باس شبکه توزیع می‌باشد. رابطه (۱۳) ولتاژ باس پست توزیع و یا باس مرجع را نشان می‌دهد که برابر ۱ پریونیت در نظر گرفته شده است.

$$v_n^{\min} \leq v_{n,h} \leq v_n^{\max} \quad \forall n \in N, h \in H \quad (12)$$

$$v_{n,h} = 1 \quad \forall n \in \text{ref}, h \in H \quad (13)$$

رابطه (۱۴) نشان دهنده محدودیت تولید منابع تولید پراکنده فسیلی می‌باشد. در این رابطه  $p_{n,max}^{DG}$  و  $p_{n,min}^{DG}$  برابر حداقل و حداکثر مقدار تولید منابع تولید پراکنده فسیلی می‌باشد، همچنین  $x_{n,h}$  نشان دهنده وضعیت فعال بودن منابع تولید پراکنده است، که اگر برابر ۱ باشد تولید پراکنده فعال و اگر برابر صفر باشد غیر فعال است.

$$p_{n,min}^{DG} x_{n,h} \leq p_{n,h}^{DG} \leq p_{n,max}^{DG} x_{n,h} \quad \forall n \in \text{ref}, h \in H \quad (14)$$

## بهره‌برداری بهینه پیشنهادی شبکه‌های هوشمند

در این بخش مدل سازی پیشنهادی برای بهره‌برداری بهینه شبکه-های هوشمند با در نظر گرفتن مسئله مدیریت سمت تقاضا، شارژ و دشارژ بهینه باتری و حضور منابع انرژی تجدیدپذیر و فسیلی به همراه ایستگاه‌های شارژ خودروهای برقی به منظور کاهش یک تابع چند-هدفه ارائه می‌شود.

بررسی و مطالعه قابلیت اطمینان در شبکه‌های موجود با توجه به بالا بودن نرخ خاموشی و قطعی مشترکین در این شبکه‌ها از اولویت و اهمیت بالایی برخوردار است. در همین راستا، تابع هدف شامل موارد مذکور در نظر گرفته شده.

تابع چند هدفه پیشنهادی به صورت رابطه (۱) می‌باشد. عبارت اول تابع هدف نشان دهنده تلفات انرژی در یک دوره ۲۴ ساعته، جمله دوم نشان دهنده هزینه خرید انرژی از شبکه بالادست، جمله سوم نشان دهنده آلاینده‌گی منابع تولید پراکنده فسیلی و جمله آخر آسیب‌پذیری سیستم یا بار تامین نشده شبکه هوشمند را نشان می‌دهد. در اینجا به ترتیب  $B$  و  $N$  برابر مجموعه‌های تعداد خطوط، باس شبکه هوشمند و  $H$  برابر مجموعه دوره زمانی مورد مطالعه می‌باشد،  $R_b$  برابر مقاومت خط،  $f_{b,h}^p$  و  $f_{b,h}^q$  به ترتیب برابر شار حقیقی و راکتیو خطوط می‌باشد. پارامتر  $c^{pur}$  هزینه خرید انرژی و  $p_h^{sub}$  و  $q_h^{sub}$  به ترتیب توان حقیقی و راکتیو خریداری شده از شبکه بالادست یا پست شبکه هوشمند می‌باشد. پارامتر  $c^{emi}$  هزینه آلاینده‌گی زیست محیطی منابع تولید پراکنده است و  $p_{n,h}^{DG}$  توان حقیقی تولید پراکنده فسیلی می‌باشد. در جمله آخر  $c^{shed}$  هزینه قطع بار شبکه هوشمند و  $p_{n,h}^{shed}$  و  $q_{n,h}^{shed}$  به ترتیب برابر توان حقیقی و راکتیو تامین نشده می‌باشد.

$$\min \sum_{b=1}^B \sum_{h=1}^H H \times R_b \left( (f_{b,h}^p)^2 + (f_{b,h}^q)^2 \right) + \sum_{h=1}^H c^{pur} (p_h^{sub} + q_h^{sub}) \quad (1)$$

$$+ \sum_{n=1}^N \sum_{h=1}^H c^{emi} (p_{n,h}^{DG}) + \sum_{n=1}^N \sum_{h=1}^H c^{shed} (p_{n,h}^{shed} + q_{n,h}^{shed})$$

معادله (۲) و (۳) قید تعادل توان حقیقی و راکتیو در شبکه هوشمند را با توجه به مدیریت سمت تقاضا، انرژی‌های تجدیدپذیر، منابع فسیلی، ایستگاه شارژ خودروهای برقی، شارژ و دشارژ باتری و انرژی تامین نشده نشان می‌دهد. در رابطه (۲)  $f_{bi,h}^p$  برابر شار حقیقی خط تزریق شده به باس و  $f_{bj,h}^p$  شار حقیقی خط دریافت شده می‌باشد،  $p_{n,h}^{dis}$  دشارژ باتری و  $P_{n,h}^{re}$  توان حقیقی منابع تجدیدپذیر می‌باشد،  $p_{n,h}^{dsm}$  برابر بار تغییر یافته شبکه هوشمند در برنامه مدیریت سمت تقاضا می‌باشد،  $p_{n,h}^{ch}$  برابر توان شارژ باتری و در نهایت  $p_{n,h}^{EV}$  برابر توان ایستگاه‌های شارژ خودروهای برقی می‌باشد. در رابطه (۳) نیز  $f_{bi,h}^q$  برابر شار راکتیو خط تزریق شده به باس و  $f_{bj,h}^q$  شار راکتیو خط دریافت شده می‌باشد،  $\partial$  برابر ضریب توان منابع تولید پراکنده و  $q_{n,h}^{dsm}$  برابر بار راکتیو تغییر یافته شبکه هوشمند در مسئله مدیریت سمت تقاضا می‌باشد.

$$C_{InterSAIFI} = (SAIFI * W_{SAIFI}) \quad (26)$$

$$C_{InterSAIDI} = (SAIDI * W_{SAIDI}) \quad (27)$$

قسمت اول شاخص ها برای سیستم و مصرف کننده بیان شده است و شاخص های تمام مصرف کنندگان (مصرف کننده خانگی کوچک یا مصرف کننده صنعتی بزرگ) دارای اهمیت یکسانی اند. در ادامه، شاخص های مربوط به مصرف کننده و سیستم به صورت روابط (26) و (27) آورده شده اند. قسمت دوم، شاخص های مربوط به بار وانرژی بررسی می شوند. این شاخص - ها به علت واقعی تر بودن، شرایط ارزیابی عادلانه تری از قابلیت اطمینان سیستم فراهم می آورند. در ادامه شاخص های مربوط به بار وانرژی به صورت رابطه (28) آورده شده اند.

$$C_{InterENS} = (ENS * W_{ENS}) \quad (28)$$

### معرفی محدودیت های حاکم بر شبکه

برای رسیدن به نقطه بهینه در مسئله بهینه سازی باید محدودیت های اعمال شود که باعث افزایش سرعت رسیدن به این محدودیت، جواب بهینه شود. در ادامه ها به صورت روابط (29) تا (39) آورده شده است. \* محدودیت تغذیه شدن تمامی بارها

$$\left( \sum_{i=1}^{n_{Block}} \delta_i \cdot S_i \right) \cdot \cos \varphi = load_{total} \quad (29)$$

هیچ یک از گره های بار یا مجموعه ای از آنها نباید از شبکه اصلی - جدا بمانند. به عبارت دیگر تمام بارهای شبکه باید تغذیه شوند.

\* محدودیت بارگذاری مجاز ترانسفورماتورها.

به منظور بهره برداری مطمئن و پایدار، توان تحویلی ترانسفورماتورهای شبکه، در حین طراحی شبکه ها، ضریب بهره برداری اقتصادی ترانسفورماتورها باید به صورت درصدی از توان نامی آن در نظر گرفته شود.

$$S_{ni} \cdot F_{ope\_trans} \geq S_i \quad (30)$$

\* محدودیت ظرفیت ترانسفورماتور

$$0.50 S_i < S_i^{cap} < 0.85 S_i \quad (31)$$

به منظور افزایش طول عمر پست ها و نیز مسائل مربوط به

بهره برداری و قابلیت اطمینان آنها، هر پست تا حد معینی از ظرفیت نامی خود اجازه بارگذاری دارد و به طور کامل بهره برداری نمی شود.

\* محدودیت بارگذاری مجاز خطوط فشار ضعیف

$$|I_{ij}| \leq |I_{max}| \quad (32)$$

این محدودیت اهمیت زیادی دارد و طبق آن جریان عبوری از فیدر باید در محدوده مجاز تعیین شده باشد.

\* محدودیت افت ولتاژ مجاز در محل بار

$$|\Delta V_{ij}| \leq |\Delta V_{max}| \quad (33)$$

رابطه (15) نشان دهنده رابطه ولتاژ باس شبکه توزیع هوشمند می باشد. در این رابطه  $X_b$  برابر راکتانس خط می باشد.

$$V_{i,h} = V_{j,h} - 2(R_b f_{b,h}^p + X_b f_{b,h}^q) \quad \forall ij \in N, b \in B, h \in H \quad (15)$$

رابطه (16) الی (21) نشان دهنده روابط مرتبط با باتری در شبکه هوشمند می باشد. در رابطه (16) محدودیت توان شارژ و در رابطه (17) محدودیت توان دشارژ باتری نشان داده شده است. در این روابط  $\beta_n$  برابر ظرفیت باتری می باشد و  $Z_{n,h}$  نشان دهنده وضعیت شارژ باتری. رابطه (18) تعریف انرژی موجود در باتری می باشد که با  $e_{n,h}$  نشان داده شده است، همچنین  $\eta_{dis}$  و  $\eta_{ch}$  به ترتیب راندمان شارژ و دشارژ باتری است. رابطه (19) نشان دهنده حداکثر مقدار انرژی باتری و رابطه (20) و (21) نشان می دهد که در ساعت اول هیچگونه انرژی اولیه در باتری وجود ندارد که بتواند دشارژ شود.

$$0 \leq p_{n,h}^{ch} \leq \beta_n Z_{n,h} \quad \forall n \in N, h \in H \quad (16)$$

$$0 \leq p_{n,h}^{dis} \leq \beta_n (1 - Z_{n,h}) \quad \forall n \in N, h \in H \quad (17)$$

$$e_{n,h} = e_{n,h-1} + p_{n,h}^{ch} \eta_{ch} - p_{n,h}^{dis} \eta_{dis} \quad \forall n \in N, h \in H \quad (18)$$

$$0 \leq e_{n,h} \leq \beta_n \quad \forall n \in N, h \in H \quad (19)$$

$$e_{n,1} = e_{n,24} \quad \forall n \in N \quad (20)$$

$$p_{n,1}^{dis} = 0 \quad \forall n \in N \quad (21)$$

رابطه (22) الی (24) برای بررسی آسیب پذیری شبکه هوشمند طراحی شده است. در این مقاله فرض شده است که آسیب پذیری به سیستم از طریق قطع منابع تولید پراکنده در شبکه هوشمند باشد. رابطه (22) تعداد خروج منابع تولید پراکنده در هر ساعت را نشان می دهد، که  $k$  برابر حداکثر واحدهای فعال در هر ساعت می باشد. رابطه (23) تضمین می کند که قطع بار انجام شده کوچکتر یا مساوی بار در هر ساعت و در هر باس برای بار حقیقی و برای راکتیو در (24) باشد.

$$\sum_{h \in H} x_{n,h} \leq k \quad \forall n \in N \quad (22)$$

$$0 \leq p_{n,h}^{shed} \leq p_{n,h}^{dsm} \quad \forall n \in N, h \in H \quad (23)$$

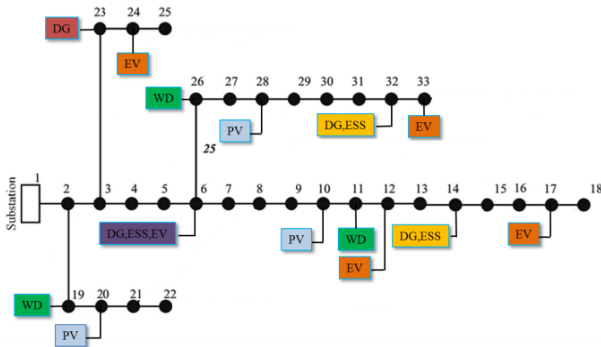
$$0 \leq q_{n,h}^{shed} \leq q_{n,h}^{dsm} \quad \forall n \in N, h \in H \quad (24)$$

### هزینه های قابلیت اطمینان

بررسی و مطالعه قابلیت اطمینان در شبکه با توجه به بالا بودن نرخ خاموشی و قطعی مشترکین در این شبکه ها اولویت و اهمیت بالای دارد. در همین راستا، تابع هدف شامل دو قسمت است؛ در قسمت اول، بخش شاخص های مربوط به مصرف کننده و سیستم و در قسمت دوم شاخص های مربوط به بار و انرژی ارائه شده اند. مهم ترین بخش در نظر گرفتن قابلیت اطمینان و هزینه های، آن و تأثیر آن بر شبکه است؛ بنابراین، هزینه های قابلیت اطمینان به صورت رابطه (25) آورده شده اند.

$$C_R = C_{InterSAIFI} + C_{InterSAIDI} + C_{InetrENS} \quad (25)$$

روی کامپیوتری با مشخصات پردازنده ۷ هسته‌ای و رم ۱۶ گیگابایت با زبان Julia و حل کننده قدرتمند Gurobi انجام شده است.



شکل ۱: شبکه هوشمند در نظر گرفته شده

به منظور تجزیه و تحلیل نتایج نیز دو سناریو در نظر گرفته شده است که به شرح زیر می‌باشد:

سناریو اول؛ بهره‌برداری در شرایط عادی و بدون در نظر گرفتن خروج منابع تولید پراکنده.

سناریو دوم؛ بهره‌برداری در شرایطی که منابع تولید پراکنده از شبکه هوشمند قطع شود و بررسی آسیب‌پذیری سیستم.

همانطور که مشاهده می‌گردد جدول (۱) نشان‌دهنده مقایسه‌ای بین نتایج سناریو اول و سناریو دوم می‌باشد.

جدول ۱: مقایسه نتایج در شبکه ۳۳ باس

سناریو اول	سناریو دوم	
۲,۷۲	۳,۸۴	تلفات انرژی (MVAh)
۰,۹۸۶۷	۰,۹۸۱۷	کمترین ولتاژ (p.u)
۲۵۳۵	۲۶۰۳	هزینه (دلار)
۰	۲,۲۱	انرژی تامین نشده (mwh)
۱۰,۲	۸	مجموع انرژی تولید پراکنده (mwh)
۱,۰۲	۰,۸	آلاینده‌گی (تن بر ساعت)
۱۰,۲۶	۳۰,۱۸	تابع هدف

همانطور که مشاهده می‌شود، در سناریو اول هیچگونه قطع منابع تولید پراکنده انجام نشده است، به همین سبب سیستم در بهترین وضعیت خود قرار دارد که مقدار انرژی تامین نشده برابر صفر می‌باشد، این نشان می‌دهد که هیچگونه قطع باری در سیستم رخ نداده است. در این سناریو تلفات انرژی در یک دوره ۲۴ ساعته برابر ۲,۷۲ مگاوات آمپر ساعت شده است، همچنین آلاینده‌گی برابر ۱ تن برای ساعت شده است. همانطور که مشاهده می‌شود در سناریو دوم تلفات انرژی افزایش چشمگیری پیدا کرده است و به ۳,۸۴ مگاوات آمپر ساعت رسیده است، در این سناریو انرژی تامین نشده برابر ۲,۲۱ مگاوات شده است که نشان می‌دهد با قطع تولید پراکنده ۲,۲۱ مگاوات بار شبکه هوشمند قطع شده

این محدودیت نیز اهمیت زیادی دارد و طبق آن ولتاژ باید در محدوده مجاز خود قرار گیرد و افت ولتاژ در سیستم توزیع فشار ضعیف معمولاً نباید از ۵ درصد مقدار نامی شبکه تجاوز کند.

\*محدودیت تعداد نصب پست ها

$$\sum_{i=1}^{n_{Block}} \delta_i \leq N_{max} \quad (34)$$

با توجه به شبکه مورد مطالعه، تعداد پست‌ها متفاوت است.

\*محدودیت تعداد فیدر خروجی پست

$$NP_{ij} \leq N_{ij\_feeder} \quad (35)$$

با توجه به شبکه مورد مطالعه، تعداد فیدرها متفاوت است.

\*محدودیت ظرفیت گرمایی فیدر

$$S_{fi} < S_{max}^f i \quad (36)$$

حداکثر توان عبوری در فیدرهای شبکه توزیع باید محدود به ظرفیت هادی ها باشد.

\*محدودیت پروفیل ولتاژ

$$0.95pu < V_i < 1.5pu \quad (37)$$

دامنه ولتاژ هر شین باید طبق رابطه (۳۷) در رنج پذیرفته شده ای باشد.

\*محدودیت شعاع تغذیه پست های توزیع

$$Dist_{ij} \leq R_{max}^i \quad (38)$$

این محدودیت برای جلوگیری از تغذیه بارها ارائه شده است که خارج از شعاع سرویس دهی پست باشد.

\*محدودیت طول فیدر فشار ضعیف

$$0 < L_f < 0.4 \quad (39)$$

بر اساس استاندارد شبکه‌های فشار ضعیف ایران، حداکثر طول فیدر فشار ضعیف ۴۰۰ متر فرض شده است.

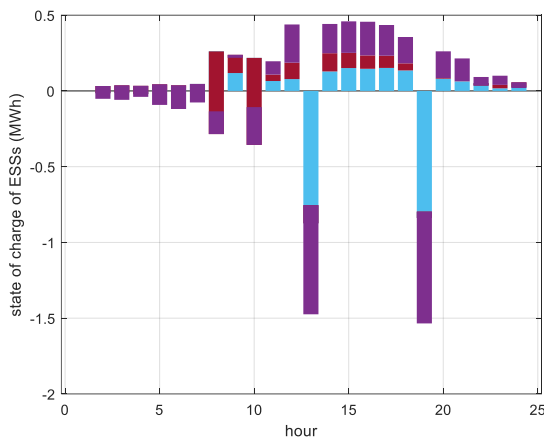
\*محدودیت شعاعی بودن شبکه

برای حفظ ساختار شعاعی شبکه توزیع باید هر نقطه بار متمرکز به طور کاملاً مستقیم و فقط از یک پست مشخص و معین تغذیه شود.

با معرفی مدل پیشنهادی مدیریت انرژی در شبکه‌های هوشمند که شامل تابع هدف (۱) و قیود (۲) الی (۳۹) است، با پیاده‌سازی آن در زبان برنامه‌نویسی Julia در بخش بعدی شبکه آزمایشی و سناریوها معرفی و نتایج شبیه‌سازی ارائه می‌گردد.

## نتایج شبیه‌سازی

در این مقاله از شبکه استاندارد IEEE ۳۳ باس برای تجزیه و تحلیل داده‌ها استفاده شده است. شبکه مورد نظر در شکل (۱) نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌گردد، منابع تولید پراکنده فسیلی در باس‌های ۶، ۱۴، ۲۳ و ۳۲ قرار دارد، همچنین منابع انرژی تجدیدپذیر در باس‌های شماره ۱۰، ۱۱، ۱۹، ۲۰، ۲۶ و ۲۸ قرار دارد، پارکینگ خودروهای برقی در باس‌های ۶، ۱۲، ۱۷، ۲۴ و ۳۳ قرار دارد، در نهایت در باس‌های شماره ۶، ۱۴ و ۳۲ باتری نصب شده است. شبیه‌سازی بر



شکل ۴: وضعیت شارژ و دشارژ باتری‌های شبکه هوشمند در سناریو دوم

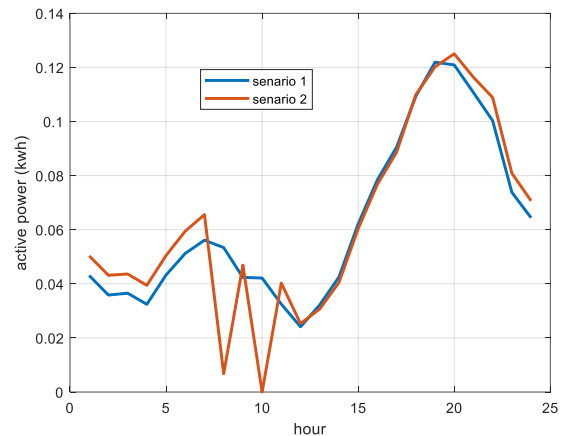
### نتیجه گیری

در این مقاله یک مدل بهینه‌سازی ریاضی مبتنی بر برنامه‌ریزی درجه دوم عدد صحیح مرکب برای مدیریت بهینه انرژی با در نظر گرفتن یک تابع چند هدفه در شبکه‌های هوشمند با در نظر گرفتن منابع انرژی تجدیدپذیر، سیستم‌های ذخیره انرژی، منابع تولید پراکنده، ایستگاه‌های شارژ خودروهای برقی با مسئله مدیریت سمت تقاضا و آسیب‌پذیری سیستم در شبکه هوشمند ۳۳ باس ارائه شد. از مزیت مدل ارائه شده تضمین جواب‌های بهینه سراسری نسبت به دیگر روش‌های بود. نتایج شبیه‌سازی بر روی شبکه هوشمند ۳۳ باس و حل‌کننده قدرتمند **Gurobi** نشان داد که علاوه بر کارایی مدل پیشنهادی جواب‌های بهینه سراسری تضمین شده می‌باشد.

### مراجع

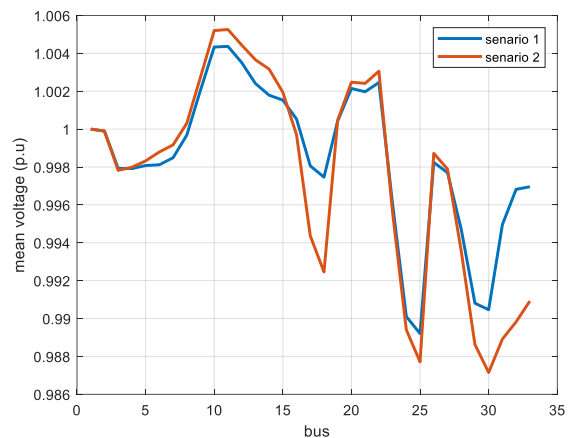
- [1] Y. Sun, B. Zhang, L. Ge, D. Sidorov, J. Wang and Z. Xu, "Day-ahead optimization schedule for gas-electric integrated energy system based on second-order cone programming," *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, vol. 6, no. 1, pp. 142-151, March 2020.
- [2] P. Zhao et al., "Economic-Effective Multi-Energy Management Considering Voltage Regulation Networked With Energy Hubs," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 36, no. 3, pp. 2503-2515, May 2021.
- [3] Y. Tao, J. Qiu, S. Lai and J. Zhao, "Integrated Electricity and Hydrogen Energy Sharing in Coupled Energy Systems," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 12, no. 2, pp. 1149-1162, March 2021.
- [4] J. Zhai, X. Zhou and Y. Li, "Reliability Analysis of Power-Gas Integrated Energy System Based on Dynamic Simulation," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 65855-65870, 2021.
- [5] M. A. Mirzaei, M. Nazari-Heris, B. Mohammadi-Ivatloo, K. Zare, M. Marzband and A. Anvari-Moghaddam, "A Novel Hybrid Framework for Co-Optimization of Power and Natural Gas Networks Integrated With Emerging Technologies," *IEEE Systems Journal*, vol. 14, no. 3, pp. 3598-3608, Sept. 2020.

است. تابع هدف در سناریو اول برابر ۱۰۲۶ و در سناریو دوم برابر ۳۰۱۸ شده است که نشان از افزایش ۱۵۰ درصدی می‌باشد. در شکل (۲) مقایسه‌ای بین خرید توان حقیقی در سناریو اول و دوم نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که خرید انرژی در این دو سناریو در هر ساعت متفاوت می‌باشد.



شکل ۲: مقایسه توان حقیقی خریداری شده در سناریو اول و دوم

در شکل (۳) متوسط ولتاژ در سناریو اول و دوم در هر باس شبکه نیز مقایسه شده است. مشاهده می‌شود که در سناریو دوم متوسط ولتاژ در باس‌های ۱۷، ۲۵ و ۳۰ پایین‌تر از سناریو اول می‌باشد.



شکل ۳: مقایسه متوسط ولتاژ در سناریوهای در نظر گرفته شده

در شکل (۴) نیز شارژ و دشارژ بهینه باتری در سناریو دوم را وقتی قطع بار یا انرژی تامین نشده داریم نشان داده است. که محور منفی نشان از شارژ باتری‌ها می‌باشد.

- Practice, vol. 119, Article Number: 104988, Feb, 2022 (doi: 10.1016/j.conengprac.2021.104988).
- [16] A. Nawaz, H. Wang, "Distributed stochastic security constrained unit commitment for coordinated operation of transmission and distribution system", *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, vol. 7, no. 4, pp. 708-718, July. 2021 (doi: 10.17775/CSEEJPES.2020.02150).
- [17] A. Olson, A. Mahone, E. Hart, J. Hargreaves, R. Jones, N. Schlag, G. Kwok, N. Ryan, R. Orans, R. Frowd, "Halfway there: can california achieve a 50% renewable grid?", *IEEE Power and Energy Magazine*, vol. 13, no. 4, pp. 41-52, Aug. 2015 (doi: 10.1109/MPE.2015.2423211).
- [18] H. Jokar, B. Bahmani-Firouzi, M. Simab, "Bilevel model for security-constrained and reliability transmission and distribution substation energy management considering large-scale energy storage and demand side management", *Energy Reports*, vol. 8, pp. 2617-2629, Nov. 2022 (doi: 10.1016/j.egy.2022.01.137).
- [19] Z. Li, H. Sun, Q. Guo, J. Wang, G. Liu, "Generalized master-slave-splitting method and application to transmission-distribution coordinated energy management", *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 34, no. 6, pp. 5169-5183, Nov. 2019 (doi: 10.1109/TPWRS.2018.2890169).
- [20] Z. Li, Q. Guo, H. Sun, J. Wang, "A new LMP-sensitivity-based heterogeneous decomposition for transmission and distribution coordinated economic dispatch", *IEEE Trans. on Smart Grid*, vol. 9, no. 2, pp. 931-941, March. 2018 (doi: 10.1109/TSG.2016.2571848).
- [21] Z. Shen, M. Liu, L. Xu, W. Lu, "Coordinated scheduling of integrated transmission and distribution systems using an improved Lipschitz dynamic programming approach", *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 140, Article Number: 108076, Sept. 2022 (doi: 10.1016/j.ijepes.2022.108076).
- [22] S. Yin, J. Wang, H. Gangammanavar, "Stochastic market operation for coordinated transmission and distribution systems", *IEEE Trans. on Sustainable Energy*, vol. 12, no. 4, pp. 1996-2007, Oct. 2021 (doi: 10.1109/TST E.2021.3076037).
- [23] J. Zhao, H. Wang, Y. Liu, Q. Wu, Z. Wang, Y. Liu, "Coordinated restoration of transmission and distribution system using decentralized scheme", *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 34, no. 5, pp. 3428-3442, Sept. 2019 (doi: 10.1109/TPWRS.2019.2908449).
- [24] D. Zhang, S. Miao, C. Li, Z. Zheng, W. Yang, J. Han, Y. Li, "A novel once-data-exchange method for solving transmission and distribution networks coordinated ACOPF model", *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 123, Article Number: 106339, Dec. 2020 (doi: 10.1016/j.ijepes.2020.106339).
- [6] Xiu-mei Jiang, Qi-fen Li, Yong-wen Yang, Li-ting Zhang, Xiao-jing Liu, Ning Ning, "Optimization of the operation plan taking into account the flexible resource scheduling of the integrated energy system," *Energy Reports*, Volume 8, Supplement 4, Pages 1752-1762, 2022.
- [7] Yunfei Mu, Congshan Wang, Min Sun, Wei He, Wei Wei, "CVaR-based operation optimization method of community integrated energy system considering the uncertainty of integrated demand response," *Energy Reports*, Volume 8, Supplement 1, Pages 1216-1223, 2022.
- [8] F. Qi, M. Shahidepour, F. Wen, Z. Li, Y. He and M. Yan, "Decentralized Privacy-Preserving Operation of Multi-Area Integrated Electricity and Natural Gas Systems With Renewable Energy Resources," *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 11, no. 3, pp. 1785-1796, July 2020.
- [9] D. Xu et al., "Integrated Modelling and Enhanced Utilization of Power-to-Ammonia for High Renewable Penetrated Multi-Energy Systems," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 35, no. 6, pp. 4769-4780, Nov. 2020.
- [10] Q. Zeng, J. Fang, J. Li, and Z. Chen, "Steady-State Analysis of the Integrated Natural Gas and Electric Power System with Bi-Directional Energy Conversion," *Appl. Ener. J. Elsevier*, vol. 184, no. 15, pp. 1483- 1492, Dec. 2016.
- [11] C. Wang, S. Wang, F. Liu, T. Bi and T. Wang, "Risk-Loss Coordinated Admissibility Assessment of Wind Generation for Integrated Electric-Gas Systems," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 11, no. 5, pp. 4454-4465, Sept. 2020.
- [12] Y. Li, W. Liu, M. Shahidepour, F. Wen, K. Wang and Y. Huang, "Optimal Operation Strategy for Integrated Natural Gas Generating Unit and Power-to-Gas Conversion Facilities," *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 9, no. 4, pp. 1870-1879, Oct. 2018.
- [13] S. Clegg and P. Mancarella, "Integrated Modeling and Assessment of the Operational Impact of Power-to-Gas (P2G) on Electrical and Gas Transmission Networks," *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 6, no. 4, pp. 1234-1244, Oct. 2015.
- [14] K. Tang, S. Dong, C. Zhu, Y. Song, "Affine arithmetic-based coordinated interval power flow of integrated transmission and distribution networks", *IEEE Trans. on Smart Grid*, vol. 11, no. 5, pp. 4116-4132, Sept. 2020 (doi: 10.1109/TSG.2020.2991210).
- [15] T. Zhao, A. Parisio, J. V. Milanović, "Distributed control of battery energy storage systems in distribution networks for voltage regulation at transmission-distribution network interconnection points", *Control Engineering*

