

## تحلیل رفتار پدیداری پایایی در سیستم از سیستم‌های شامل هاب‌های انرژی

مهدی نوذریان<sup>۱</sup> و علیرضا فریدونیان<sup>۲\*</sup>

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۳۹۹/۱۱/۲۵	سیستم از سیستم‌ها <sup>۳</sup> مجموعه‌ای از سیستم‌های مستقل است که به‌منظور نیل به مجموعه‌ای از مأموریت‌های اختصاص یافته به سیستم بزرگتر، یکپارچه شده‌اند. یکی از ویژگی‌های اساسی هر سیستم از سیستم‌ها، رفتار به‌اصطلاح پدیداری می‌باشد که به‌معنای توانایی سیستم از سیستم‌ها در ارائه رفتارهای نوپدید حاصل از تعامل بین سیستم‌های سازنده مستقلی می‌باشد که توسط هیچ یک از آن‌ها در انزوا قابل انجام نمی‌باشد. موفقیت در بهره‌برداری سیستم از سیستم‌ها مستلزم شناخت، مدیریت و بهره‌برداری مؤثر از این رفتار پدیداری می‌باشد. هدف از ارائه این پژوهش ارائه مدلی بدیع به‌منظور تحلیل رفتار پدیداری پایایی در سیستم از سیستم‌های شامل هاب‌های انرژی می‌باشد. بر این‌مبنا، اثر تعامل سیستم‌های مستقل هاب انرژی در جهت بهبود شاخص‌های پایایی و اقتصادی در مدیریت برنامه‌ریزی بهره‌برداری از سیستم ریزشبه‌مورد بررسی قرار می‌گیرد. بر این اساس، مدل پیشنهادی بر شبکه توزیع استاندارد ۳۳ باسه اصلاح شده اعمال و نتایج مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. نتایج شبیه‌سازی، بیانگر اثر قابل توجه این تعامل در بازنمایی رفتار پدیداری این سیستم از سیستم‌ها به‌منظور بهبود شاخص‌های پایایی، کاهش هزینه‌ها، کاهش میزان انرژی تجدیدپذیر قطع شده همزمان با نیاز کمتر به ایجاد منابع متعدد تولیدی است.
پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۰۲/۲۶	
<b>واژگان کلیدی:</b> سیستم از سیستم‌ها، رفتار پدیداری، برنامه‌ریزی ریزشبه، هاب انرژی، پایایی.	

### ۱-مقدمه

سیستم از سیستم‌ها قابل بررسی می‌باشد [۱، ۲]. یکی از کاربردهای مفاهیم سیستم از سیستم‌ها در جهت مدل‌سازی سیستم ریزشبه‌های متشکل از منابع تولیدی و ذخیره‌سازی و یا شبکه‌های متشکل از ریزشبه‌هاست. پژوهشگران در [۲] یک روش بهینه‌سازی سلسله مراتبی به‌منظور هماهنگی سیستم‌های مستقل و یافتن نقطه بهره‌برداری بهینه شبکه توزیع فعال مبتنی بر سیستم از سیستم‌ها ارائه نموده‌اند. همچنین در [۳] در باب مدل‌سازی شبکه‌های توزیع فعال مبتنی بر مفهوم سیستم از سیستم‌ها بحث شده است. در این مرجع اشاره شده است که اگرچه مسائل مختلف مدیریتی و کنترلی این شبکه مانند برنامه‌ریزی بلندمدت و روزپیش بر اساس مفهوم

در ادبیات مهندسی سیستم، تعاریف متعددی از سیستم از سیستم‌ها ارائه شده است. اکثر این تعاریف بر این نکته تأکید دارند که سیستم از سیستم‌ها مجموعه‌ای از سیستم‌های وظیفه محور یا اختصاصی‌اند که توانمندی‌های خود را در کنار یکدیگر جمع نموده تا یک سیستم جدید و پیچیده‌تر و دارای کارکردی بیشتر نسبت به جمع کارکرد سیستم‌های سازنده ایجاد کنند. امروزه به‌کارگیری مفهوم سیستم از سیستم‌ها در حوزه‌های مختلف به‌چشم می‌خورد. بر این‌مبنا، به‌طورخاص در حوزه سیستم‌های انرژی عملکردهای مختلف مدیریت و کنترل انرژی در سیستم قدرت مانند برنامه‌ریزی بلندمدت و روزانه، براساس مفهوم

\* پست الکترونیک نویسنده مسئول: fereidunian@eed.kntu.ac.ir

۱. دانشجوی دکتری، محور شبکه‌های هوشمند انرژی، کریتک، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

۲. استادیار، محور شبکه‌های هوشمند انرژی، کریتک، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

<sup>3</sup> SoS: System of Systems

جغرافیایی در مکان‌های مختلفی قرار دارند را می‌توان منطبق با مفاهیم مبنایی رویکرد سیستم‌های ارزیابی نمود. لذا در این پژوهش بر لزوم بررسی رفتار پدیداری این سیستم به منظور نیل به اهداف قابلیت اطمینانی تاکید شده است. محققان در [۱۱] نیز ادعان دارند مدل معماری شبکه هوشمند<sup>۲</sup> مبنای ساختاری مناسبی به منظور طراحی، توسعه و اعتبارسنجی پاسخ‌ها و فناوری‌های جدید در جهت مدیریت سیستم‌های پیچیده انرژی مدرن می‌باشد. علاوه بر این، پژوهش [۱۲] ادعا دارد که تجزیه و تحلیل حاصل از روش پیشنهادی این پژوهش می‌تواند منجر به ارائه اطلاعاتی به منظور پشتیبانی از تصمیم‌گیری‌ها هنگام تدوین سیاست‌های جدید انتقال از شبکه‌های برق سنتی به شبکه هوشمند گردد. در پژوهش [۱۳] نیز تاکید می‌شود که پیش از تجزیه و تحلیل ویژگی‌های شبکه هوشمند بر مبنای مفاهیم سیستم‌های پیچیده، بایستی درکی بهتر و نگرشی کلی نسبت به مفهوم شبکه هوشمند به منظور طراحی یک شبکه هوشمند کارا و پایا حاصل گردد. همچنین در مرجع [۱۴] چارچوبی به منظور تعیین شاخص‌های لازم در ارزیابی معیارهای امنیت، کیفیت، قابلیت اطمینان و دردسترس بودن در مدل‌سازی شبکه‌های هوشمند به عنوان شبکه‌های چندجزئی و چندمقیاسه پیچیده ارائه شده است. علاوه بر این، در [۱۵] چارچوبی نوآورانه در قالب رویکرد یکپارچه سیستمی از منظر سیستم‌های پیچیده به منظور مدل‌سازی شبکه هوشمند تدوین شده است. در [۱۶] نیز ادعان شده است که به منظور مقابله بهتر و واقع بینانه‌تر با خطرات سایبری و کمینه‌سازی اثرات مخرب خاموشی‌های گسترده ناشی از این خطرات در سیستم‌های سیستم‌ها شبکه الکتریکی هوشمند، شناسایی علل بالقوه و روش‌های کاهش این خطرات در یک سیستم شبکه هوشمند مبتنی بر سیستم‌های ارزیابی تاب‌آوری سایبری آن اهمیت ویژه‌ای دارد. همچنین پژوهشگران در [۱۷] بر مفهوم سیستم‌های شبکه هوشمند با در نظر گرفتن ویژگی‌های اجزای سازنده آن و تعاملات پیچیده میان آن اجزا با هدف برنامه‌ریزی و بهینه‌سازی عملکردی آن به منظور استفاده هرچه بیشتر از منابع تولید تجدیدپذیر متمرکز شده‌اند.

ذکر این نکته نیز جالب توجه می‌باشد که اگر چه رویکرد

سیستم‌های سیستم‌ها قابل ارزیابی است، تمرکز اصلی این پژوهش بر مسئله بهره‌برداری شبکه توزیع فعال متشکل از ریزشبکه‌ها با در نظر گرفتن تعاملات متقابل بین شرکت توزیع و ریزشبکه‌ها به عنوان سیستم‌های مستقل می‌باشد. محققان در [۴] نیز به مطالعه رفتار فردی اجزاء شبکه‌های الکتریکی متشکل از ریزشبکه‌ها به منظور بازتولید رفتارهای به اصطلاح پدیداری این سیستم پیچیده بر اساس مدل‌سازی عامل‌بنیان در ترکیب با مدل‌سازی دینامیکی سیستم<sup>۱</sup> پرداخته‌اند. همچنین در [۵] نمونه‌ای از کنترل مبتنی بر سیستم از سیستم‌ها برای یک ریزشبکه ارائه می‌شود. علاوه بر این، محققان در [۶] یک سیستم کنترلی مبتنی بر سیستم‌های سیستم‌ها به منظور کنترل و مدیریت ریزشبکه جزیره‌ای متشکل از سه واحد تولید پراکنده به عنوان سه زیرسیستم در تأمین یک بار طراحی نموده‌اند. محققان در [۷] به دنبال بهبود تاب‌آوری ریزشبکه به کمک مفهوم سیستم‌های سیستم‌ها می‌باشند. در مدل پیشنهادی این پژوهش، هر ریزشبکه از چهار ریزشبکه کوچک‌تر تشکیل شده و این ریزشبکه‌های کوچک منابع و ظرفیت‌های خود را مبتنی بر سیستم‌های سیستم‌ها با هم یکپارچه نموده تا یک ریزشبکه پیچیده‌تر و دارای عملکرد تاب‌آوری و مدیریتی بهتر در مقایسه با ریزشبکه‌های منفرد ایجاد کنند. مدل‌سازی مجموعه مدیریتی خانه‌های هوشمند بر مبنای مفاهیم سیستم‌های سیستم‌ها نیز از دیگر موارد مورد مطالعه در حوزه مدیریت انرژی بر مبنای رویکرد سیستم‌های سیستم‌هاست که محققان در [۸] در دستور کار خود قرار داده‌اند.

برخی از پژوهش‌های این حوزه نیز با مدل‌سازی شبکه هوشمند و ساختار پیشرفته شبکه‌های الکتریکی بر مبنای مفاهیم سیستم‌های پیچیده و مبنای سیستم‌های سیستم‌ها اقدام به معرفی نوآوری تحقیقاتی خود نموده‌اند. از این جمله می‌توان به پژوهش‌های [۹-۱۷] اشاره نمود. پژوهش [۹] به تشریح یک روش مبتنی بر علم پیچیدگی در ترکیب با رویکردهای کلاسیک به منظور درک رفتار شبکه هوشمند پرداخته است. همچنین در [۱۰] بر این مهم تاکید شده است که یک شبکه هوشمند با نفوذ زیاد منابع تولید پراکنده که هرکدام به طور مستقل اداره، بهره‌برداری و ساخته شده و دارای چرخه عمر مستقل می‌باشد و از لحاظ

<sup>2</sup> Smart grid architecture model

<sup>1</sup> Agent-based in combination with system dynamics modelling

بهره‌برداری بهینه هاب‌های انرژی به‌هم‌پیوسته با هدف کاهش هزینه، تأمین انرژی مورد نیاز مصرف‌کننده، کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و تقویت تعامل شبکه‌های برق و گاز با استفاده از مبدل‌های برق‌به‌گاز می‌باشد. در این میان به‌منظور دستیابی به این مهم، هاب‌های انرژی صنعتی و مسکونی قابلیت تعامل با سایر ریزشبکه‌های چند حاملی انرژی را دارا می‌باشند. در مرجع [۲۷] نیز یک چارچوب مدیریت انرژی غیرمتمرکز مبتنی بر تعامل که امکان هماهنگی بین هاب‌های انرژی را فراهم می‌سازد ایجاد شده است. در این پژوهش با هدف بهبود عملکرد اقتصادی سیستم هاب انرژی یکپارچه، بستر معاملاتی همتابه‌متا به‌منظور تسهیل تجارت خود سازمان یافته سیستم هاب‌های انرژی یکپارچه ایجاد شده است. همچنین در [۲۸]، یک چارچوب بهینه‌سازی دوسطحی دارای چند پیرو به‌منظور تعیین استراتژی بهینه تعامل هاب‌های انرژی و شرکت توزیع ایجاد شده است که در آن هزینه کل بهره‌برداری شبکه توزیع باتوجه به محدودیت‌های شبکه در مسئله سطح بالا کمینه شده و هزینه کل هر هاب انرژی متصل به شبکه توزیع در مسئله سطح پایین‌تر کمینه می‌شود. در [۲۹] نیز اذعان شده است که سیستم هاب‌های به‌هم‌پیوسته انرژی یک مدل کلیدی به‌منظور مدل‌سازی بهینه سیستم‌های انرژی چند حاملی انرژی می‌باشد. با این وجود، محاسبه مستقیم حالت بهره‌برداری این مدل به‌دلیل دارا بودن توابع غیرخطی و چندبعدی، بسیار زمان‌بر و چالش‌برانگیز می‌باشد. به‌منظور حل مشکل فوق در روش پیشنهادی این پژوهش، روش‌هایی به‌منظور تقریب تکه‌ای خطی یک بعدی و چندبعدی به‌منظور خطی‌سازی توابع غیرمحدب انتقال گاز طبیعی، هزینه ژنراتور و عملکرد کمپرسور اتخاذ شده است. پژوهشگران در [۳۰] نیز چارچوبی نوین به‌منظور مدیریت بهینه هاب‌های انرژی پیشنهاد نموده‌اند. براین‌مبنای هر هاب انرژی منابع تولیدی خود را به‌منظور برنامه‌ریزی تأمین تقاضا و با هدف کاهش هزینه و انتشار آلاینده‌ها مدیریت می‌کند. در این باب در اولین گام، هر هاب انرژی مازاد/کسری مورد انتظار انرژی الکتریکی، حرارتی و برودتی را که باید در بازارهای محلی معامله شود تعیین و سپس در گام بعدی ضمن شرکت در بازارهای مختلف به تبادل انواع مختلف انرژی می‌پردازند. همچنین در [۳۱] اذعان شده است که ساختمان‌های مسکونی و تجاری که دارای الگوی مصرف مختلف هستند

سیستمی در برخی پژوهش‌ها به‌صورت مستقیم مورد اشاره نمی‌باشد، با این وجود، بهره‌گیری از روش‌های سلسله مراتبی در مسائل مرتبط با برنامه‌ریزی توسعه شبکه‌های توزیع و همچنین بهره‌برداری بهینه آن نیز در پژوهش‌ها امری بدیع می‌باشد [۱۸-۱۹].

علاوه‌بر مرور انجام شده به‌منظور بررسی مفاهیم سیستم‌ازسیستم‌ها در شبکه قدرت، ذکر این نکته نیز جالب توجه است که یکی از موضوعات پژوهشی پرتعداد در سالیان اخیر اتصال هاب‌های انرژی به یکدیگر و اداره آن توسط یک بهره‌بردار است. این مهم که انطباق آن بر مبانی سیستم‌ازسیستم‌ها تاکنون مورد توجه پژوهشگران قرار نگرفته، در ادامه در قالب آخرین دستاوردهای پژوهشی مرور می‌شود. در این باب ذکر این نکته جالب توجه است که ادغام هاب‌های انرژی خرد، مفهومی به نام هاب انرژی کلان ایجاد می‌کند که در آن می‌توان مجموعه‌ای از هاب‌های انرژی را با هم کنترل نمود. کنترل و مدیریت یکپارچه هاب‌های انرژی مزایایی برای سیستم به‌همراه دارد که این مهم در مواجهه با چالش‌ها و در هنگام بحران مانند همه‌گیری کرونا بیش‌ازپیش می‌تواند مثمرتر باشد [۲۰-۲۳].

در این حوزه پژوهش [۲۴] زمینه تعامل مجموعه‌ای از هاب‌های انرژی در قالب یک چارچوب همکارانه به‌منظور اشتراک منابع و کاهش هزینه‌ها فراهم آورده است. در این چارچوب هر هاب انرژی دارای منابع مختلفی از جمله واحد تولید همزمان، دیگ بخار، منابع تجدیدپذیر، چیلر برقی و چیلر جذبی و همچنین ذخیره‌سازهای انرژی الکتریکی، گرمایشی و سرمایشی به‌منظور ارتقاء انعطاف‌پذیری هاب‌های انرژی می‌باشد. در این پژوهش اذعان شده است که برخلاف روش‌های مبتنی بر تعادل نش که تضمینی مبنی بر بهینگی پاسخ ندارند، چارچوب همکارانه این پژوهش در یافتن پاسخ بهینه توانایی قابل توجهی دارد. محققان در [۲۵] به ارائه روشی در بهره‌برداری یک سیستم توزیع محلی چند حاملی انرژی در حالت جزیره‌ای که با وقوع خطا یا حادثه‌ای مهم، از شبکه اصلی جدا شده است، می‌پردازند. این شبکه متشکل از سه هاب انرژی بوده که هرکدام ضمن برنامه‌ریزی جهت تأمین بهینه تقاضای خود قادرند با تبادل با سایر هاب‌های انرژی هزینه‌های بهره‌برداری خود را کمینه سازند. هدف اصلی مدل پیشنهادی پژوهش [۲۶] نیز ارائه چارچوبی به‌منظور

پژوهش‌های فوق لزوم نگرشی سیستمی به بهره‌برداری هاب‌های انرژی به‌هم‌پیوسته در قالب سیستم‌های سیستم‌ها را بیش‌ازپیش عیان می‌سازد. علاوه‌براین، تحلیل و ارزیابی پایایی محور برنامه‌ریزی و بهره‌برداری از مجموعه هاب‌های انرژی به‌هم‌پیوسته در کنار ارزیابی اثر پدیداری در حالی که یکی از شاخصه‌های اصلی بهره‌برداری موفق سیستم‌های سیستم‌هاست، در پژوهش‌ها یافت نمی‌شود.

بر این مبنا، نوآوری این پژوهش به شرح ذیل بیان می‌شود:

- تحلیل رفتار پدیداری پایایی هاب‌های انرژی به هم پیوسته بر مبنای رویکرد سیستم‌های سیستم‌ها
- ارائه مدلی بدیع از برنامه‌ریزی ریزشبه شامل هاب-های انرژی به‌هم‌پیوسته با رویکرد سیستم‌های سیستم‌ها
- ارزیابی بهره‌برداری اقتصادی ریزشبه در حالت برنامه‌ریزی شده پایا در تعامل با شبکه سراسری با حضور منابع پاسخگویی بار

بخش‌های مختلف این مقاله بدین شرح است؛ در بخش (۲) به تعریف رفتار پدیداری در سیستم‌های سیستم‌ها پرداخته شده است. پس از بیان مسئله در بخش (۳)، مدل‌سازی مسئله در بخش (۴) در دستور کار قرار می‌گیرد. در بخش (۵) ضمن معرفی شبکه مورد مطالعه، به گزارش و ارزیابی نتایج شبیه‌سازی در دو سناریو به‌منظور ارزیابی روش پیشنهادی پرداخته شده است. پس از بحث و بررسی با رویکرد سیستمی در بخش (۶) نتایج حاصل از این پژوهش در پایان و در بخش (۷) در چند جمله بیان شده است.

## ۲- رفتار پدیداری در سیستم‌های سیستم‌ها

سیستم‌های سیستم‌ها به‌عنوان سیستمی که از تعامل سیستم‌های سازنده مستقل خود، با اهداف و کارکردهای خاص، در جهت انجام ماموریت‌های سراسری مشترک بهره می‌گیرد، شناخته می‌شود. از ویژگی‌های مهم هر سیستم‌های سیستم‌ها، رفتار به‌اصطلاح پدیداری می‌باشد که به‌معنای توانایی سیستم‌های سیستم‌ها در ارائه کارکردهای جدید ناشی از همکاری بین سیستم‌های سازنده منفرد است که توسط هیچ یک از آن‌ها در انزوا انجام نمی‌شود. به‌عنوان مثال، حرکت روبه‌جلوی دوچرخه تنها هنگامی که دوچرخه و دوچرخه‌سوار متعامل باشند پدید می‌آید، اما هیچ یک از این اجزاء نمی‌تواند به‌تنهایی باعث ایجاد این رفتار شود. این مهم مبتنی بر عملکرد سیستم‌های پیچیده یا سیستم‌های

را می‌توان با هم کنترل نمود و از منابع تولید پراکنده موجود در هر یک از این هاب‌ها جهت پوشش کمبود ظرفیت در یک هاب دیگر استفاده نمود. در بخش صنعت، گرمای تولید شده با درجه پایین می‌تواند در شبکه حرارتی هاب انرژی کلان به‌منظور گرم کردن ساختمان‌های مجاور استفاده شود. علاوه‌براین، از زباله‌های آلی در کشاورزی می‌توان برای تولید سوخت‌های زیستی استفاده کرد. همه این موارد زمینه‌های همکاری و تعامل هاب‌های انرژی خرد در جهت رسیدن به برنامه‌ریزی بهینه را نشان می‌دهد [۳۱]. در همین باب، نوآوری [۳۲] ارائه روش تقریبی خطی به‌منظور ساده‌سازی مدل یک سیستم به‌هم‌پیوسته شامل سه هاب انرژی، با هدف کاهش تلاش‌های محاسباتی بوده و پژوهش [۳۳] نیز به ارائه یک مدل بهینه‌سازی دوسطحی از برنامه‌ریزی بهینه روزانه یک سیستم توزیع فعال که متشکل از واحدهای تولید پراکنده و چند هاب انرژی در پایین دست خود بوده و قادر به عرضه برق مازاد خود را به بازار می‌باشد، پرداخته است. علاوه‌براین، در [۳۴] به برنامه‌ریزی یک سیستم انرژی یکپارچه<sup>۱</sup> با استفاده از روش بازی سلسله مراتبی استاکلبرگ<sup>۲</sup> پرداخته شده است. سیستم انرژی این پژوهش از یک شرکت برق و گاز (سطح بالا)، چند هاب انرژی هوشمند (سطح میانی) و چند مصرف‌کننده (سطح پایین) تشکیل شده است. همچنین پژوهشگران در [۳۵] یک مدل برنامه‌ریزی بهینه مبتنی بر قابلیت اطمینان به منظور اتصال هاب‌های انرژی به‌وسیله زیرساخت‌های چندحاملی انرژی ارائه داده‌اند. محققان در [۳۶] به ارائه یک روش بهینه‌سازی بهره‌برداری هاب انرژی کلان با تمرکز بر کاهش زمان محاسبات می‌پردازند. نویسندگان [۳۷] برنامه‌ریزی تولید انرژی در شبکه هوشمند انرژی متشکل از پنج نمونه هاب انرژی را با هدف کمینه‌سازی هزینه تأمین انرژی و انتشار گازهای گلخانه‌ای، بررسی کرده و در [۳۸] یک سیستم مدیریت انرژی سلسله مراتبی<sup>۳</sup> به‌منظور پیشینه‌سازی سود مالی و پیک‌سایبی شبکه بالادست در شبکه محلی<sup>۴</sup> متشکل از هاب‌های مختلف انرژی مسکونی ارائه شده است. همچنین در این حوزه در [۳۹] گروهی از خانه‌های مسکونی به‌عنوان سیستم هاب انرژی به‌هم‌پیوسته با هدف کاهش هزینه روزانه و با لحاظ تابع هزینه عمر باتری با روش بهینه‌سازی ازدحام ذرات بهره‌برداری می‌شوند. مرور

<sup>3</sup> Hierarchical energy management system

<sup>4</sup> Multiple home energy hubs in the neighborhood grid

<sup>1</sup> Integrated energy system

<sup>2</sup> Hierarchical Stackelberg game approach

ریز شبکه الکتریکی به‌عنوان یک سیستم‌ازسیستم‌ها، به مطالعه رفتار پدیداری آن پردازد. در این باب، ارزیابی اثر تعامل هاب‌های انرژی به‌عنوان زیرسیستم‌های یک ریزشبکه به‌منظور شناخت رفتار پدیداری و اثرات آن در پایایی این سیستم‌ازسیستم‌ها در دستور کار قرار می‌گیرد. این پژوهش به‌دنبال پاسخ به این سوال است که در یک سیستم ریزشبکه اگر قابلیت ایجاد زیرسیستم‌هایی به‌نام هاب انرژی به‌منظور تأمین تقاضای برق و حرارت آن سیستم مهیا شود، وجود آن هاب‌های انرژی و رفتار تعاملی آن‌ها تا چه میزان قادر به بهبود و ارتقا شاخص‌های پایایی و اقتصادی می‌باشد. این مسئله متشکل از یک تابع هدف به‌منظور تحقق یک سیستم پایا و اقتصادی با لحاظ محدودیت‌های حاکم بر شاهرگ‌های تعاملی هاب انرژی (خطوط موجود در ریزشبکه مورد مطالعه) و اجزای موجود در هاب‌های انرژی می‌باشد که در ادامه تبیین شده است.

#### ۴- مدل‌سازی

در این پژوهش یک ریزشبکه متشکل از هاب‌های انرژی متعامل مورد مطالعه قرار می‌گیرد. مدل عمومی هاب‌های انرژی، مطابق رابطه (۱) می‌باشد [۲۰].

$$\begin{pmatrix} L_{\alpha} \\ \vdots \\ L_{\beta} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_{\alpha\alpha} & \dots & C_{\beta\alpha} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ C_{\alpha\beta} & \dots & C_{\beta\beta} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} P_{\alpha} \\ \vdots \\ P_{\beta} \end{pmatrix} \quad (1)$$

در (۱)  $L$ ، بردار بارهای مورد تأمین و  $P$  بردار حامل‌های انرژی ورودی به هاب انرژی بوده و  $L$  و  $P$  توسط ماتریس  $C$  به یکدیگر مرتبط می‌شوند. براین‌مبنا، در هر هاب انرژی این مطالعه بارهای الکتریکی و حرارتی (اجزای بردار  $L$ ) از طریق شبکه سراسری و بویلر در حالت عادی و از طریق واحد تولید همزمان، واحدهای تجدیدپذیر و ذخیره‌ساز در صورت احداث (اجزای بردار  $P$ ) قابلیت تأمین دارد. بر این‌مبنا، در این قسمت به مدل‌سازی مسئله شامل شرح تابع هدف و محدودیت‌های حاکم بر اجزای موجود در این هاب‌های انرژی متعامل و شبکه پرداخته می‌شود [۲۰].

#### ۴-۱- تابع هدف

روابط (۲-۵) به‌معرفی تابع هدف و اجزای تشکیل‌دهنده آن در این پژوهش می‌پردازد.

$$\text{Minimize } (CIC + OPC + INVC) \quad (2)$$

طبق رابطه (۲) تابع هدف از  $CIC$  هزینه وقفه مشترکین،  $OPC$  هزینه ناشی از بهره‌برداری و  $INVC$  هزینه روزانه ناشی

یکپارچه مبتنی بر سیستم‌ازسیستم‌ها که اجزای آن دارای کنترل‌های مدیریتی، تکاملی و بهره‌برداری مستقل بوده و دارای پراکندگی جغرافیایی هستند پدیدار می‌شود. گاهی از رفتار پدیداری با‌عنوان رفتار جمعی نیز یاد می‌شود. رفتار پدیداری از خصوصیات ذاتی اجزاء منشأ نشده، بلکه به اتصال بین اجزا باز می‌گردد و مانند هر ویژگی دیگری می‌تواند دارای آثار و نتایج مفید و مضر باشد. براین‌مبنا، موفقیت در بهره‌برداری سیستم‌ازسیستم‌ها مستلزم شناخت، مدیریت مؤثر و بهره‌برداری از این رفتار است. از این‌رو، یک مدل معماری دقیق و کامل از سیستم‌ازسیستم‌ها به‌منظور تبیین وجود، نوع و سطح رفتار پدیداری مورد نیاز است تا با شناخت آن درجهت بهره‌گیری بیشینه از آثار مثبت آن و یا احیاناً مدیریت آثار مخرب آن اقدام گردد [۱ و ۴۰-۴۳].

#### ۳- بیان مسئله؛ تبیین رفتار پدیداری پایایی

از آنجا که در سالیان اخیر سیستم قدرت به‌دلایل متعدد بیش از گذشته رشد در مقیاس، ناهمگنی و پیچیدگی را تجربه کرده است؛ لزوم تحلیل و ارزیابی این سیستم مبتنی بر ویژگی‌های مهم سیستم‌های پیچیده بیش‌ازپیش خاطر نشان می‌شود. در میان این ویژگی‌ها، مفهوم رفتار پدیداری در سیستم قدرت مانند سایر سیستم‌های پیچیده یا سیستم‌های یکپارچه مبتنی بر سیستم‌ازسیستم‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. از آنجا که رفتار پدیداری عموماً در حین بهره‌برداری از سیستم و اجرای استراتژی‌های مدیریتی و کنترلی رخ می‌دهد، ذکر این نکته که انتظار برای رخداد رفتار پدیداری و سپس اتخاذ تصمیمات کنترلی و مدیریتی ممکن است منجر به نتایج کاملاً بهینه اقتصادی و فنی نگردد. در این میان، امر حائز اهمیت این است که در مواجهه با چالش‌های پایایی محور ناشی از رفتار پدیداری در سیستم قدرت، گاهاً نه‌تنها استراتژی‌های متداول پاسخ و بازبایی به‌منظور کنترل مؤثر آن رفتار، قابل اعتماد نمی‌باشد بلکه می‌تواند منجر به حادث‌شدن شرایط و بروز آسیب‌های اقتصادی و فنی گردد. براین‌مبنا، اهمیت مطالعه پژوهشی اجزای یک سیستم قدرت مانند ریزشبکه‌ها به‌منظور شناخت رفتار پدیداری در مسائل مرتبط با پایایی آن سیستم و اتخاذ راهکارهای مناسب به‌منظور بهره‌برداری بهینه از این رفتار در جهت ارتقاء پایایی ریزشبکه غیرقابل انکار می‌باشد [۱، ۲، ۴-۶].

بدین منظور این پژوهش قصد دارد تا ضمن مدل‌سازی یک

حداقل سرعت مجاز یا بیش از حداکثر سرعت مجاز برای تولید در هر واحد باشد صفر می‌باشد.

$$P_w(w,t) = \begin{cases} 0 & V_{CO} \leq V(w,t) \text{ or } V_{CI} > V(w,t) \\ P_{\max}(w) \frac{V(w,t) - V_{CI}}{V_R - V_{CI}} I_{inv}(w) & V_{CI} \leq V(w,t) < V_R \\ P_{\max}(w) I_{inv}(w) & V_R \leq V(w,t) < V_{CO} \end{cases} \quad (۶)$$

$$P_{pv}(pv,t) = \eta(pv)S(pv)g(pv,t)I_{impv}(pv) \quad (۷)$$

همچنین هنگامی که سرعت باد بیش از سرعت نامی و کمتر از حداکثر سرعت مجاز باشد تولید این واحدها در بیشینه توان خود ( $P_{\max}$ ) ثابت می‌گردد. علاوه بر این، در بازه سرعتی بیش از حداقل سرعت مجاز و کمتر از سرعت نامی متناسب با سرعت، تولید این واحدها تعیین می‌گردد. همچنین توان واحدهای خورشیدی ( $P_{pv}$ ) در صورت احداث (یک شدن متغیر  $I_{impv}$ )، بسته به بازده ( $\eta$ )، مساحت ( $S$ ) و تابش خورشید در محل آن واحد خورشیدی ( $g$ ) طبق رابطه (۷) محاسبه می‌گردد.

لازم به ذکر است عدم قطعیت وزش باد و تابش خورشید نیز در این مطالعه به ترتیب با کمک از تابع توزیع ویبول و بتا و براساس میانگین‌گیری سناریوها لحاظ شده است [۴۸].

#### ۴-۲-۲- واحدهای تولید همزمان

توان الکتریکی و حرارتی واحدهای تولید همزمان بر مبنای روابط (۸-۱۳) در این مطالعه مدل‌سازی شده است [۲۲]:

$$P_{chp,e}(ch,t) = \vartheta_b(t) \eta_{chp,e}(ch) P_{b,gas}(t) \forall ch \in S_b^{ch}, \forall t \quad (۸)$$

$$P_{chp,h}(ch,t) = \vartheta_b(t) \eta_{chp,h}(ch) P_{b,gas}(t) \forall ch \in S_b^{ch}, \forall t \quad (۹)$$

$$P_{\min chp,e}(ch) I_{ch}(ch,t) I_{inv}(ch) \leq P_{chp,e}(ch,t) \leq P_{\max chp,e}(ch) I_{ch}(ch,t) I_{inv}(ch) \forall ch, \forall t \quad (۱۰)$$

$$P_{\min chp,h}(ch) I_{ch}(ch,t) I_{inv}(ch) \leq P_{chp,h}(ch,t) \leq P_{\max chp,h}(ch) I_{ch}(ch,t) I_{inv}(ch) \forall ch, \forall t \quad (۱۱)$$

$$0 \leq \vartheta_b(t) \leq 1 \quad \forall t \quad (۱۲)$$

$$0 \leq SUC_{ch}(ch,t) \leq SCOST_{ch}(ch) (I_{ch}(ch,t) - I_{ch}(ch,t-1)) \quad (۱۳)$$

توان الکتریکی و حرارتی تولیدی این واحدها ( $P_{chp,e}$ ,  $P_{chp,h}$ ) بسته به ضریب پخش گاز در هر باس ( $\vartheta_b$ )، بازده الکتریکی و حرارتی این واحدها ( $\eta_{chp,e}$ ,  $\eta_{chp,h}$ ) و گاز تزریق شده به هر باس ( $P_{b,gas}$ ) با رابطه (۸، ۹) نمایش و به کمک روابط (۱۰، ۱۱) در حداقل و حداکثر ظرفیت خود محدود می‌شود. همچنین رابطه (۱۲)، ضریب پخش گاز تزریقی به هر باس تقسیم‌شده بین بویلر و واحد تولید همزمان را محدود و (۱۳) نیز هزینه راه‌اندازی این واحدها ( $SUC_{ch}$ ) را در صورت

از احداث واحدهای تولید و ذخیره‌سازی تشکیل شده است.

$$CIC = \sum_T (P_{\text{average}}(I) \left[ \sum_k \lambda(l,k) C_{odt}(l,k) \right]) \quad (۳)$$

$$OPC = \sum_{t=1}^{N_T} \left\{ \begin{aligned} & (\rho_e(h) PG_e(t) + (\rho_g(h) PG_g(t))) \\ & + \sum_{bo=1}^{N_{bo}} SUC_{bo}(bo,t) + \sum_{ch=1}^{N_{ch}} SUC_{ch}(ch,t) \\ & + \sum_{l=1}^{N_l} DRC_l(l,t) + \sum_{l=1}^{N_l} DRC_h(l,t) \end{aligned} \right\} \quad (۴)$$

$$INVC = \left[ \begin{aligned} & \sum_W I_{inv}(w) INVC_w + \sum_{PV} I_{impv}(pv) INVC_{pv} \\ & + \sum_{CH} I_{inv}(ch) INVC_{ch} + \sum_S I_{inv}(s) INVC_s \end{aligned} \right] \left[ \frac{i(1+i)^n}{365((1+i)^n - 1)} \right] \quad (۵)$$

به منظور مدل‌سازی معیار قابلیت اطمینانی این پژوهش  $CIC$  مطابق رابطه (۳) محاسبه می‌گردد. در این رابطه  $C_{odt}$  هزینه ناشی از وقفه در تأمین بار نوع  $k$  در نقطه بار  $l$  بوده که وابسته به زمان تداوم وقفه بوده و درصد موجود از این نوع بار در هر نقطه بار ( $\lambda$ ) می‌باشد. نحوه محاسبه این هزینه با توجه به هزینه وقفه انواع مختلف مشترکین در [۴۴] ارائه شده است. همچنین طبق رابطه (۴)  $OPC$  به ترتیب در سطر اول از هزینه تبادل برق و گاز با شبکه، در سطر دوم از هزینه راه‌اندازی بویلرهای موجود و واحدهای تولید همزمان در صورت احداث و در سطر سوم از هزینه اجرای برنامه پاسخگویی بار تشکیل شده است. لازم به ذکر است با توجه به رایگان بودن منابع باد و خورشید تولید واحدهای تجدیدپذیر هزینه‌ای جهت بهره‌برداری آن لحاظ نشده و برای واحد تولید همزمان و بویلرها نیز از آنجا که سوخت آن منابع گاز طبیعی می‌باشد تابع هزینه آن‌ها به صورت خطی و مبتنی بر هزینه گاز خریداری شده از شبکه سراسری لحاظ شده است. در رابطه (۵)،  $INVC$  که به کمک نرخ بهره ( $i$ ) به هزینه سالانه و سپس به هزینه روزانه تبدیل شده است، به ترتیب متشکل از هزینه ایجاد واحدهای بادی و خورشیدی ( $INVC_{pv}$ ,  $INVC_w$ )، واحدهای تولید همزمان ( $INVC_{ch}$ ) و واحدهای ذخیره‌ساز ( $INVC_s$ ) می‌باشد و در صورت احداث هر واحد (یک‌شدن متغیرهای باینری  $I_{inv}$ ) در تابع هدف لحاظ می‌گردد.

#### ۴-۲-۲- محدودیت‌ها

##### ۴-۲-۱- واحدهای تجدیدپذیر

در روابط (۶-۷) مدل عمومی تولید واحدهای بادی و خورشیدی بیان می‌گردد [۴۸]:  
طبق رابطه (۶) تولید واحدهای بادی ( $P_v$ ) در صورت احداث (یک‌شدن متغیر  $I_{inv}$ ) در زمانی که سرعت باد کمتر از

حالت شارژ و دشارژ، روابط (۱۸، ۱۹) به کمک روابط معمول خطی سازی ضرب متغیرهای باینری مطابق آنچه در پیوست (۱) بیان شده است، خطی سازی شده است. در این روابط  $M$  یک عدد مثبت بزرگ است. قید (۲۲) توان خروجی ذخیره ساز را به مقدار نامی آن محدود و سطح انرژی ذخیره ساز ( $C$ ) با استفاده از قید (۲۳) به کمک بازده شارژ و دشارژ آن ( $\eta_{ch}, \eta_{dis}$ ) تعیین گردیده و با قید (۲۴) نیز به مقدار بیشینه آن ( $C_{max}$ ) محدود می گردد. محدودیت (۲۵) نیز برابری سطح انرژی هر ذخیره ساز در ابتدا و انتهای دوره بهره برداری را تضمین می نماید [۴۵]. ذخیره سازهای حرارتی نیز مدلی مشابه ذخیره سازهای الکتریکی دارند، با این تفاوت که آنچه ذخیره می شود، حرارت می باشد [۴۸].

#### ۴-۲-۵- پاسخگویی بار

در برنامه های پاسخگویی بار این پژوهش که روشی تشویق محور است شرکت کنندگان در برنامه های پاسخگویی بار الکتریکی و حرارتی در ازای عملکردشان مبلغی ( $\pi_e, \pi_h$ ) با توجه به میزان مشارکت ( $DR_e, DR_h$ )، طبق روابط (۲۶، ۲۷) دریافت می کنند. علاوه بر این، مطابق روابط (۲۸، ۲۹) نیز سقف مجاز مشارکت بارها در برنامه پاسخگویی بار در حالت پایه  $\alpha$  درصد از کل مقدار هر نقطه بار است [۴۸].

$$DRC_e(l,t) = DR_e(l,t)\pi_e(l,t) \quad \forall l, \forall t \quad (26)$$

$$DRC_h(l,t) = DR_h(l,t)\pi_h(l,t) \quad \forall l, \forall t \quad (27)$$

$$0 \leq DR_e(l,t) \leq \alpha P_e(l,t) \quad \forall l, \forall t \quad (28)$$

$$0 \leq DR_h(l,t) \leq \alpha P_h(l,t) \quad \forall l, \forall t \quad (29)$$

#### ۴-۲-۶- شبکه الکتریکی و گاز طبیعی

روابط (۳۰-۳۶) به بیان محدودیت های موسوم به پخش بار جریان متناوب یا AC در شبکه الکتریکی می پردازد [۴۹]:

$$\sum_{i \in S_i^g} PG_e(t) + \sum_{w \in S_w^g} (P_w(w,t) - P_{wec}(w,t)) + \quad (30)$$

$$\sum_{pv \in S_{pv}^{pr}} (P_{pv}(pv,t) - P_{pvec}(pv,t)) +$$

$$\sum_{s \in S_s^g} P_s(s,t) + \sum_{ch \in S_{ch}^{sh}} P_{chp,e}(ch,t) +$$

$$\sum_{l \in S_l^g} DR_e(l,t) - \sum_{l \in S_l^g} (1 - LSI(l,t))P_{el}(l,t)$$

$$= \sum_{c=1}^{N_B} P_L(b,c,t), \forall b, \forall t$$

$$\sum_{i \in S_i^g} QG_e(t) + \sum_{w \in S_w^g} (Q_w(w,t) - Q_{wec}(w,t)) + \quad (31)$$

$$\sum_{pv \in S_{pv}^{pr}} (Q_{pv}(pv,t) - Q_{pvec}(pv,t)) +$$

$$\sum_{s \in S_s^g} Q_s(s,t) - \sum_{l \in S_l^g} (1 - LSI(l,t))Q_{el}(l,t)$$

$$= \sum_{c=1}^{N_B} Q_L(b,c,t), \forall b, \forall t$$

روشن شدن مورد محاسبه قرار می دهد [۲۲]. با توجه به ضرب دو متغیر باینری در روابط (۱۰، ۱۱) و خطی بودن مدل پیشنهادی، این روابط مبتنی بر روابط معمول خطی سازی ضرب متغیرهای باینری که در پیوست (۱) به آن اشاره شده است خطی سازی می شوند.

#### ۴-۲-۳- بویلرهای حرارتی

مدل سازی بویلرهای حرارتی در این پژوهش مبتنی بر روابط (۱۴-۱۶) صورت گرفته است [۲۲]:

$$P_{bo}(bo,t) = (1 - \mathcal{D}_b(t))\eta_{bo}(bo)P_{b,gs}(t) \quad \forall bo \in S_b^c, \forall t \quad (14)$$

$$P_{minbo}(bo)I_{bo}(bo,t) \leq P_{bo}(bo,t) \leq P_{maxbo}(bo)I_{bo}(bo,t) \quad \forall bo, \forall t \quad (15)$$

$$0 \leq SUC_{bo}(bo,t) \leq SCOST_{bo}(bo)(I_{bo}(bo,t) - I_{bo}(bo,t-1)) \quad (16)$$

براین مینا،  $P_{bo}$  یا توان حرارتی تولیدی بویلرها وابسته به ضریب پخش گاز، بازده و میزان گاز تزریق شده به هر هاب، به کمک رابطه (۱۴) نمایش یافته است. با رابطه (۱۵) توان حرارتی تولیدی بویلرها به مقادیر مقادیر بیشینه و کمینه تولید این واحدها ( $P_{maxbo}, P_{minbo}$ ) محدود می گردد. رابطه (۱۶) نیز هزینه راه اندازی هر بویلر حرارتی ( $SUC_{bo}$ ) را به کمک متغیر باینری بیانگر روشن و خاموش بودن بویلر ( $I_{bo}$ ) در هر ساعت بیان می دارد [۲۲].

#### ۴-۲-۴- واحدهای ذخیره ساز

روابط (۱۷-۲۵) به بیان محدودیت های حاکم بر واحدهای ذخیره ساز الکتریکی می پردازد [۴۵]:

$$I_{ch}(s,t) + I_{dch}(s,t) \leq 1 \quad \forall s, \forall t \quad (17)$$

$$0 \leq P_{ch}(s,t) \leq M I_{ch}(s,t) \quad \forall s, \forall t \quad (18)$$

$$0 \leq P_{dch}(s,t) \leq M I_{dch}(s,t) \quad \forall s, \forall t \quad (19)$$

$$-M(I_{ch}(s,t) + I_{dch}(s,t)) \leq Q(s,t) \leq M(I_{ch}(s,t) + I_{dch}(s,t)) \quad \forall s, \forall t \quad (20)$$

$$P_s(s,t) = P_{dch}(s,t) - P_{ch}(s,t) \quad \forall s, \forall t \quad (21)$$

$$(P_s(s,t))^2 + (Q_s(s,t))^2 \leq (S_s(s))^2 \quad \forall s, \forall t \quad (22)$$

$$C(s,t) = C(s,t-1) - (\eta_{dch} P_{dch}(s,t) - \eta_{ch} P_{ch}(s,t)) \quad \forall s, \forall t \quad (23)$$

$$0 \leq C(s,t) \leq C_{max}(s,t) \quad \forall s, \forall t \quad (24)$$

$$C(s,0) = C(s, N_T) \quad \forall s \quad (25)$$

محدودیت (۱۷) لزوم کارکرد در یکی از حالات شارژ ( $I_{ch}$ ) یا دشارژ ( $I_{dch}$ ) و (۱۸-۲۱) وضعیت توان خروجی در حالت شارژ ( $P_{ch}$ ) و دشارژ ( $P_{dch}$ ) را در صورت احداث (یک شدن متغیر باینری  $I_{mvs}$ ) معین می نماید. همچنین باتوجه به ضرب متغیرهای باینری احداث ذخیره سازها در متغیرهای باینری

همزمان هستند واحدهای تولید همزمان به‌عنوان رابط بین شبکه گاز و برق در این پژوهش قلمداد می‌شود. در شبکه گازرسانی این پژوهش که تقریبی بر مدل ارائه شده مرجع [۴۸] می‌باشد، توان گاز انتقالی در طول خط لوله گاز به دبی گاز عبوری از خطوط لوله، مشخصات خط لوله و سیال عبوری از آن، وابسته است.

$$P_{gas}(b,c,t) = GHV f(b,c,t) \quad (40)$$

$$P_{gas}(b,t) = \sum_{c \in S_c^{gas}} P_{gas}(b,c,t) \quad (41)$$

$$PG_h(t) = \sum_{b=1}^{N_h} P_{gas}(b,t) \quad (42)$$

$$\sum_{ch \in S_{ch}^{gas}} P_{chp,h}(ch,t) + \sum_{bo \in S_{bo}^{gas}} P_{bo}(bo,t) + \sum_{l \in S_l^{gas}} DR_l(l,t) + \sum_{sh \in S_{sh}^{gas}} P_{hs}(sh,t) - \sum_{l \in S_l^{gas}} P_{hl}(l,t) = 0, \forall t \quad (43)$$

براین‌مبنا، برای تبدیل میزان دبی گاز عبوری از خط لوله ( $f$ ) به توان گاز انتقالی در طول خط لوله گاز ( $P_{gas}$ ) از ضریب ارزش حرارتی ناخالص ( $GHV$ ) به‌صورت رابطه (۴۰) استفاده می‌شود. بنابراین در هر ساعت تعادل توان گاز طبیعی تزریق شده به هر باس (هاب) از طریق خطوط انتقال گاز متصل به آن باس برحسب kW به‌صورت رابطه (۴۱) تعریف

می‌گردد.  $PG_h$  یا میزان گاز طبیعی برنامه‌ریزی شده جهت خرید برای روز بعد که برابر با جمع گاز مصرفی در همه باس‌ها (هاب‌ها) می‌باشد، مطابق رابطه (۴۲) معرفی می‌گردد. همچنین در رابطه (۴۳) بر تأمین بارهای حرارتی ( $P_{hl}$ ) از طریق واحدهای تولید همزمان ( $P_{chp,h}$ ) در صورت احداث و همچنین بویلرهای حرارتی ( $P_{bo}$ ) و ذخیره‌سازهای حرارتی موجود ( $P_{hs}$ ) و یا تعهد به مشارکت در برنامه پاسخگویی بار حرارتی ( $DR_h$ ) تاکید می‌شود [۴۸].

### ۵- شبیه‌سازی

در این بخش به ارائه گزارشی از نتایج شبیه‌سازی در سیستم مورد آزمایش پرداخته شده و نتایج عددی مدل پیشنهادی با ایجاد سناریوهایی تبیین می‌شود.

#### ۵-۱- شبکه مورد مطالعه

در این بخش برخی فرضیات در مدل‌سازی روش پیشنهادی تبیین می‌گردد. بر این‌مبنا، لازم به‌ذکر است که سیستم تست مورد مطالعه در این پژوهش، شبکه توزیع استاندارد ۳۳ باسه اصلاح‌شده بوده و اطلاعاتی شامل بار الکتریکی و حرارتی، تابش خورشید و وزش باد، قیمت برق و گاز طبیعی، مشخصات اجزاء موجود در هاب‌های انرژی و برخی

$$P_L(b,c,t) = G(b,c)(V(b,t) + V(c,t)) + B(b,c)(\delta(b,t) - \delta(c,t)), \quad \forall b,c, \forall t \quad (32)$$

$$Q_L(b,c,t) = B(b,c)(V(b,t) + V(c,t)) + G(b,c)(\delta(b,t) - \delta(c,t)), \quad \forall b,c, \forall t \quad (33)$$

$$(P_L(b,c,t))^2 + (Q_L(b,c,t))^2 \leq (S_L^{\max}(b,c,t))^2 \quad (34)$$

$$(PG_e(t))^2 + (QG_e(t))^2 \leq (SG_e^{\max}(t))^2 \quad (35)$$

$$a_i Q_L + b_i P_L + c_i = 0 \quad \forall i \in \{1,2,\dots,8\} \quad (36)$$

در این روابط، محدودیت‌های (۳۰، ۳۱) به بیان محدودیت‌های تعادل توان اکتیو و راکتیو می‌پردازد. براین اساس بار اکتیو الکتریکی ( $P_{el}$ ) موجود در هر نقطه‌بار مشابه توان راکتیو علاوه‌بر قابلیت تأمین از طریق شبکه سراسری در حالت عادی ( $PG_e$ )، در حالت قطع پشتیبانی شبکه این قابلیت را دارد تا از طریق منابع بادی ( $P_w$ )، خورشیدی

( $P_{pv}$ )، تولید همزمان ( $P_{chp,e}$ ) و ذخیره‌ساز الکتریکی ( $P_s$ ) در صورت احداث در همان هاب انرژی یا احداث شده در هاب‌های انرژی دیگر به‌واسطه شبکه توزیع، تأمین یا به مشارکت در برنامه‌های پاسخگویی بار ( $DR_e$ ) متعهد گردد. فرمول‌بندی خطی توان اکتیو و راکتیو عبوری از خطوط شبکه در قالب محدودیت‌های (۳۲، ۳۳) بیان شده و (۳۴)، (۳۵) توان ظاهری عبوری از خطوط انتقال و توان ظاهری مبادله شده با شبکه را به‌ترتیب به مقادیر نامی ( $SG_e^{\max}$ )، ( $S_L^{\max}$ ) محدود می‌کند. از آنجا که رابطه (۳۴) غیرخطی می‌باشد، این رابطه براساس (۳۶) مبتنی بر آنچه در پیوست (۱) بیان شده است خطی‌شده است [۴۹-۵۰]. محدودیت‌های (۲۲) و (۳۵) نیز با همین روش به فرمت خطی تبدیل می‌شود.

همچنین در این مقاله شاخص  $ENS$  یا مقدار انرژی تأمین نشده طبق رابطه (۳۷) و  $CWE$ ،  $CPVE$  یا شاخص‌های مقدار انرژی بادی و خورشیدی قطع شده از روابط (۳۸)، (۳۹) حاصل می‌شود [۲۲]:

$$ENS = \sum_{t=1}^{N_t} \sum_{l=1}^{N_l} LSI(l,t) P_{el}(l,t) \quad (37)$$

$$WEC = \sum_{t=1}^{N_t} \sum_{w=1}^{N_w} P_{wec}(w,t) \quad (38)$$

$$PVEC = \sum_{t=1}^{N_t} \sum_{pv=1}^{N_{pv}} P_{pvec}(pv,t) \quad (39)$$

شبکه گازرسانی این مسئله نیز وظیفه توزیع گاز بین نقاط بارحرارتی متناظر با مراکز بار الکتریکی را جهت تأمین گاز مورد نیاز مطابق روابط (۴۰-۴۳) به‌عهده دارد. از آنجایی که مصرف‌کنندگان این گاز بویلرها و واحدهای تولید



مدل پیشنهادی این پژوهش در قالب (MILP) یا روش برنامه‌ریزی خطی آمیخته عدد صحیح پیاده‌سازی شده و برای حل آن از CPLEX در نرم‌افزار GAMS استفاده شده است [۵۲].

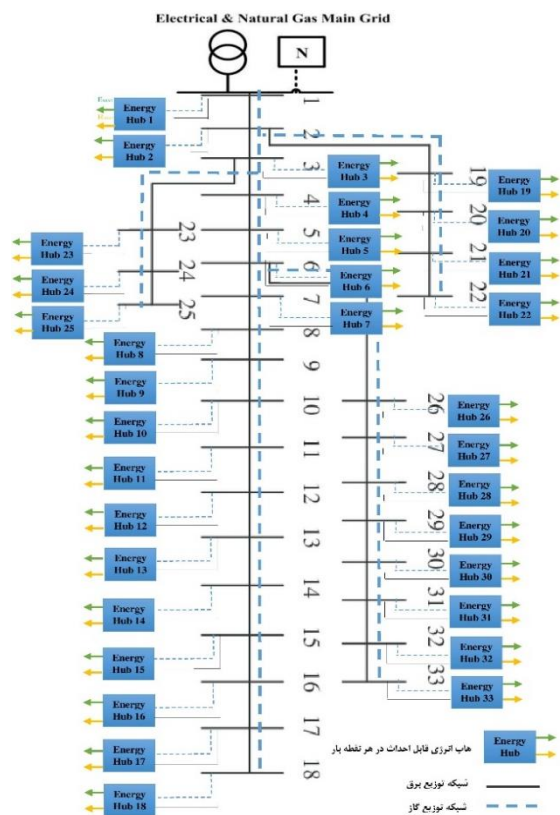
### ۵-۲- تحلیل مبتنی بر سناریو

هدف اصلی این پژوهش تحلیل رفتار پدیداری پایایی در برنامه‌ریزی ریزشکته متشکل از هاب‌های انرژی بر اساس مفاهیم مهندسی سیستم می‌باشد. بر این اساس و به منظور بررسی و تبیین رفتار پدیداری در سیستم‌های دو سناریو توسعه داده شده است. در سناریو اول برنامه‌ریزی ریزشکته منفصل شده از شبکه بالادست با ایجاد سیستم‌های منفرد هاب انرژی در هر نقطه بار که از لحاظ الکتریکی قابلیت تعامل با یکدیگر را ندارند مورد تحلیل و بررسی واقع شده است. در سناریو دوم برنامه‌ریزی بارویکرد سیستم‌های دو سیستم انجام و قابلیت ایجاد هاب‌های انرژی تعامل در نقاط بار مهیا می‌شود. در گام پایانی این سناریو رفتار پدیداری سیستم فوق متشکل از هاب‌های انرژی تعامل که در حالت منفصل از شبکه سراسری طراحی شده است، در حالت اتصال به شبکه نیز مورد ارزیابی واقع می‌گردد.

### ۵-۲-۱- سناریو (۱): برنامه‌ریزی بهره‌برداری ریزشکته متشکل از سیستم‌های منفرد

در اولین سناریو به ارزیابی نتایج حاصل از شبیه‌سازی مدل پیشنهادی با ایجاد هاب‌های انرژی در قالب سیستم‌هایی منفرد پرداخته می‌شود. بر این اساس در هر نقطه بار قابلیت ایجاد یک هاب انرژی منفرد به کمک منابع تولید و ذخیره به منظور تأمین تقاضای آن نقطه بار در حالتی که ارتباط با شبکه بالادست قطع می‌باشد وجود دارد. جدول ۱ نتایج حاصل از اجرای این سناریو را بیان می‌دارد. مطابق آنچه در جدول ۱ گزارش شده است در این سناریو، با وجود احداث همزمان واحدهای تولید و ذخیره‌سازی در برخی نقاط بار دارای تقاضای نسبتاً بیشتر، هزینه وقفه ۸۷ هزار دلاری ناشی از دست رفتن حدود ۱۲ مگاوات بار در طی یک شبانه روز بیانگر میزان پایایی نامطلوب سیستم در حالت قطع ارتباط زیرسیستم‌ها و عدم ارتباط با شبکه بالادست می‌باشد. علاوه بر این، حجم بالای انرژی تجدیدپذیر قطع شده با وجود امکان احداث ذخیره‌ساز در هر نقطه بار نشان از عدم استفاده بهینه از تولید واحدهای تجدیدپذیر

مشخصه‌های دیگر این سیستم علاوه بر پیوست (۲) در مراجع [۴۵]، [۴۸] و [۵۰] نیز در دسترس می‌باشد. بر مبنای مدل پیشنهادی این پژوهش و مطابق شکل (۱) در هر نقطه بار قابلیت ایجاد یک هاب انرژی به کمک منابع تولید و ذخیره به منظور تأمین پایایی تقاضای آن نقطه بار وجود دارد. بر این اساس، هر نقطه بار الکتریکی موجود در ریزشکته، علاوه بر ارتباط با شبکه بالادست در حالت عادی، در حالت منفصل می‌تواند از طریق واحد بادی، تولید همزمان، خورشیدی و ذخیره‌ساز در قالب هاب انرژی تأمین گردد. علاوه بر این، اگرچه در حالت عادی تمام بار حرارتی توسط بویلرهای موجود در نقاط بار قابل تأمین است با این وجود هر واحد تولید همزمان نیز در صورت احداث در قالب یک هاب انرژی قادر است به کمک این منابع به تأمین تقاضای حرارتی آن نقطه بار بپردازد. همچنین لازم به ذکر است که اگرچه در مدل‌سازی ذخیره‌سازهای الکتریکی، انرژی اولیه ذخیره‌شده آن از روز پیش غیرصفر فرض می‌شود، با این وجود، محدودیت برابری انرژی ذخیره‌ساز در ابتدا و انتهای دوره برنامه‌ریزی این انرژی را در انتهای دوره به ذخیره‌ساز برمی‌گرداند.



شکل ۱- سیستم ۳۳ پایه مورد آزمایش و هاب‌های انرژی قابل احداث در هر باس (نقطه بار)

در سناریو بهره‌برداری از سیستم متشکل از زیرسیستم‌های منفرد دارد.

جدول ۱- نتایج شبیه‌سازی سناریو (۱)

هزینه	(دلار)
کل	۱۱۱۴۵۷,۴۵۸
وقفه مشترکین	۸۶۹۸۱,۶۲۴
احداث واحدها	۲۱۷۸۴,۸۸۷
بهره‌برداری	۲۶۹۰,۹۴۷
تعداد	احداث
واحد بادی	۳۲
واحد خورشیدی	۲
واحد تولید همزمان	۶
واحد ذخیره‌ساز الکتریکی	۷
انرژی	(کیلووات ساعت)
تأمین نشده	۱۱۵۴۷,۷۲۰
بادی قطع شده	۷۳۶۶۲۸,۵۱۲
خورشیدی قطع شده	۹۱۰,۷۱۲
مجموع قطع شده	۷۳۷۵۳۹,۲۲۴

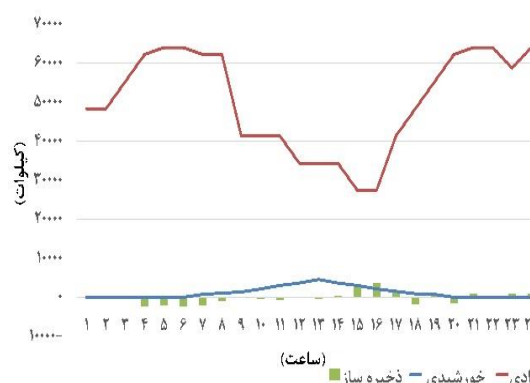
باشد، در برخی نقاط بار متفاوت می‌باشد. براین‌مبنای طبق شکل (۲) در ساعات ۱۸ و ۲۰ در هاب‌های انرژی دارای تقاضای بالا به دلیل عدم توانایی سیستم در تأمین تقاضای آن نقاط بار ذخیره‌سازهای احداث شده برخلاف روند عادی عملکرد ذخیره‌سازی مجبور به ذخیره انرژی تجدیدپذیر تولیدی بی‌مصرف آن نقاط جهت استفاده در ساعات دیگر می‌باشند. براین‌مبنای مطابق شکل (۲) در این حالت نیمی از ذخیره‌ساز الکتریکی با تمام ظرفیت اقدام به شارژ توان می‌نماید. مجموع این تحلیل‌ها از هزینه‌بالای وقفه گرفته تا احداث منابع متعدد و حجم بالای انرژی تجدیدپذیر قطع شده، عدم کفایت، ناپهینگی و عدم پایایی روش پیشنهادی مبتنی بر سناریو (۱) را بیان می‌دارد.

از جمله راه‌هایی که در جهت پیشبرد اهداف اقتصادی و پایایی سیستم و حل چالش‌های این سناریو به‌نظر می‌رسد استفاده از ابزار مدیریت مصرف است. براین‌مبنای، به‌منظور تحلیل بیشتر این سناریو در ادامه فرض می‌شود مصرف‌کنندگان الکتریکی به ازای دریافت ۵۰ دلار به ازای هر مگاوات ساعت قادر به کاهش مصرف خود و شرکت در یک برنامه پاسخگویی بار تشویق‌محور حداکثر تا سقف ۱۰ درصد از کل تقاضا باشند. همچنین مصرف‌کنندگان حرارتی، به ازای دریافت ۳ دلار برای هر مگاوات ساعت قادر به کاهش انرژی حداکثر تا سقف معین ۱۰ درصد می‌باشند. نتایج اجرای برنامه‌ریزی بهینه این سیستم در حضور بارهای پاسخگو مطابق جدول ۲ می‌باشد.

مطابق آنچه در جدول ۲ گزارش شده اجرای برنامه پاسخگویی بار در برخی ساعات پیک کاهش بار تا سقف مجاز را رقم زده و این زمینه تأمین باقی‌مانده تقاضا در آن ساعات باحفظ همان آرایش احداثی منابع در سناریو (۱) بیان شده در جدول ۱ را فراهم نموده است. این مهم موجب کاهش حدود ۵۰ درصدی انرژی تأمین نشده و هزینه وقفه مشترکین نسبت به حالت پایه به جهت کاهش وقفه در تأمین تقاضا شده است.

با این‌وجود، اگرچه افزایش هزینه بهره‌برداری در نتیجه اجرای برنامه پاسخگویی بار در مقابل کاهش هزینه وقفه قابل اغماض می‌باشد، احداث تعداد بالای تجهیزات و وجود قریب به ۷۳۵ مگاوات انرژی بادی قطع شده از جمله چالش‌هایی است که با اجرای برنامه پاسخگویی بار نیز در حالت برنامه‌ریزی مبتنی بر سیستم‌های منفرد برطرف نشده است.

طبق شکل (۲) درصد نامتناسب احداث منابع نسبت به یکدیگر در این سناریو بهره‌بردار را از بهره‌گیری بهینه از همبستگی منفی تولید واحدهای بادی و خورشیدی محروم می‌دارد. در صورت احداث متناسب ظرفیتی واحدهای بادی و خورشیدی بهره‌بردار قادر به پوشش عدم تولید یک واحد توسط واحد همبسته آن با توجه به اختلاف زمانی تولید واحدهای خورشیدی و بادی می‌باشد.



شکل ۲- تولید واحدهای بادی و خورشیدی و ذخیره‌ساز در طول دوره بهره‌برداری- سناریو (۱)

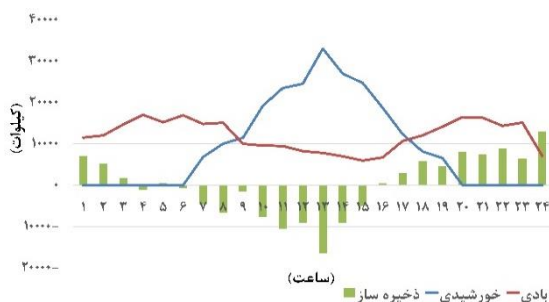
در این سناریو عملکرد ذخیره‌سازهای الکتریکی نیز که به دلیل احداث تعدادی قابل توجه از واحدهای بادی به‌طور معمول باید مبتنی بر شارژ در ساعات اوج تولید واحدهای بادی و بالعکس کم‌باری الکتریکی (ساعات نیمه‌شب تا صبح) سپس دشارژ در ساعات پیک بار (ظهر تا غروب)

جدول ۲- نتایج شبیه‌سازی سناریو (۱)- با حضور بار پاسخگو

هزینه	(دلار)
کل	۶۸۰۷۵,۹۸۹
وقفه مشترکین	۴۳۴۹۰,۸۱۲
احداث واحدها	۲۱۷۸۴,۸۸۷
بهره‌برداری	۲۸۰۰,۲۹
احداث	تعداد
واحد بادی	۳۲
واحد خورشیدی	۲
واحد تولید همزمان	۶
واحد ذخیره‌ساز الکتریکی	۷
انرژی	(کیلووات ساعت)
تأمین نشده	۵۸۸۰,۰۰۰
بادی قطع شده	۷۳۴۴۳۹,۴۴۶
خورشیدی قطع شده	۹۱۰,۷۱۲
مجموع قطع شده	۷۳۵۳۵۰,۱۵۸

جدول ۳- نتایج شبیه‌سازی سناریو (۲)

هزینه	(دلار)
کل	۱۱۳۰۳,۶۰۳
وقفه مشترکین	۰
احداث واحدها	۸۸۳۸,۷۵۸
بهره‌برداری	۲۴۴۴,۸۴۵
احداث	تعداد
واحد بادی	۹
واحد خورشیدی	۱۹
واحد تولید همزمان	۴
واحد ذخیره‌ساز الکتریکی	۳۳
انرژی	(کیلووات ساعت)
تأمین نشده	۰
بادی قطع شده	۵۰۵۷۵,۳۹۹
خورشیدی قطع شده	۴۴۷۷۰,۸۶۳
مجموع قطع شده	۹۵۳۴۶,۲۶۲



شکل ۳- تولید واحدهای خورشیدی، بادی و ذخیره‌ساز در طول دوره بهره‌برداری- سناریو (۲)

همچنین در این سناریو مطابق شکل (۳) عملکرد کلی ذخیره‌سازها به عملکرد معمول خود در جهت پوشش بار پیک و انرژی قطع شده و استفاده بیشینه از ظرفیت واحدهای تجدیدپذیر بازگشته است.

در ادامه به منظور تحلیل بیش‌ازپیش کارآمدی مدل پیشنهادی برنامه‌ریزی ریزشبه در هر دو حالت متصل و منفصل از شبکه سراسری، آنچه از برنامه‌ریزی احداث واحدهای تولیدی و ذخیره‌سازی در حالت منفصل از شبکه سراسری بر مبنای رویکرد سیستم‌از سیستم‌ها در این سناریو پیشنهاد شده در حالت عادی و متصل به شبکه نیز مطابق نتایج جدول ۴ مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرد.

براین مبنای، با به‌کارگیری آرایش پیشنهادی سناریو (۲) از ایجاد هاب‌های انرژی در ریزشبه که زمینه تأمین پایا و اقتصادی تقاضا در حالت قطع ارتباط با شبکه بالادست را فراهم آورده است، ارزیابی عملکرد این آرایش در حالت

#### ۵-۲-۲- سناریو (۲): برنامه‌ریزی بهره‌برداری ریزشبه با

##### رویکرد سیستم‌از سیستم‌ها

در این سناریو که تفاوت آن با سناریو (۱) مهیاشدن امکان تعامل هاب‌های انرژی در قالب رویکرد سیستم‌از سیستم‌ها از طریق لحاظ معادلات پخش بار جریان متناوب A می‌باشد، بهره‌گیری از این تعامل مطابق آنچه در جدول ۳ نمایش یافته هزینه کل بهره‌برداری را به کمتر از ده درصد سناریو (۱) رسانده است.

عمده این کاهش هزینه ناشی از صفرشدن هزینه وقفه مشترکین در نتیجه‌ی ایجاد زمینه‌تعامل زیرسیستم‌های هاب انرژی در سیستم کلان ریزشبه می‌باشد.

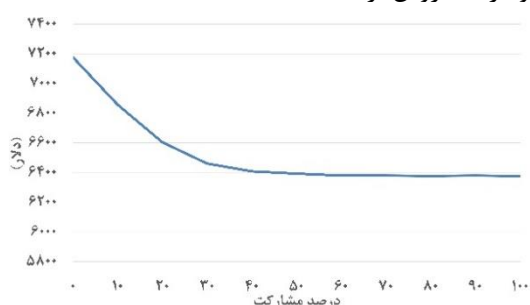
علاوه‌براین، کاهش قریب به ۶۰ درصدی هزینه احداث منابع در این سناریو در مقایسه با سناریو (۱) در کنار بهره‌گیری از تمام گزینه‌های ذخیره‌سازی قابل احداث در جهت کمک به واحدهای تجدیدپذیر به منظور پوشش بار پیک و کاهش انرژی قطع شده نیز از نکات جالب توجه به‌کارگیری مدل مبتنی بر سیستم‌از سیستم‌هاست. علاوه‌براین، اگر چه تعداد واحدهای بادی احداث شده به کمتر از یک سوم رسیده است، با این وجود نیل مقدار انرژی بادی قطع شده از عدد ۷۰۰ مگاوات ساعت به عدد ۵۰ مگاوات ساعت یعنی به کمتر از یک‌چهاردهم حالت اولیه قابل توجه است همچنین مطابق جدول ۳ و شکل (۳) به‌کارگیری متناسب ظرفیتی واحدهای خورشیدی و بادی در این مرحله بیش‌ازپیش به چشم می‌خورد.

جدول ۴- نتایج بهره‌برداری از طرح پیشنهادی سناریو (۲) در

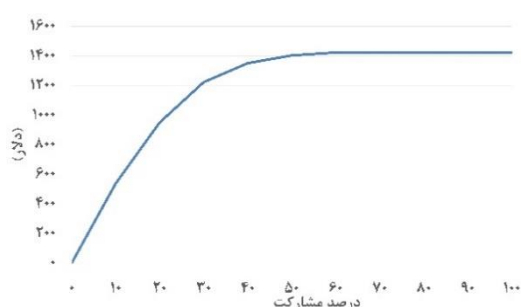
حالت اتصال به شبکه

هزینه	(دلار)
کل	۷۱۷۷,۴۳۲
وقفه مشترکین	۰
احداث واحدها	۸۸۳۸,۷۵۸
بهره‌برداری	-۱۶۶۱,۳۲۶
احداث	تعداد
واحد بادی	۹
واحد خورشیدی	۱۹
واحد تولید همزمان	۴
واحد ذخیره ساز الکتریکی	۳۳
انرژی	(کیلووات ساعت)
تأمین نشده	۰
بادی قطع شده	۲۷۹۱۵,۵۹۵
خورشیدی قطع شده	۴۶۱۵۷,۸۸۴
مجموع قطع شده	۷۴۰۷۳,۴۷۹

بیشترین بهره را برای بهره‌بردار و مشتریان به ارمغان آورد باید مورد بحث قرار گیرد. شکل‌های (۴) و (۵) به بیان تغییر هزینه کل و درآمد بارهای پاسخگو در اثر تغییر سقف درصد مشارکت می‌پردازد. مطابق آنچه در این شکل‌ها نمایش یافته مشاهده می‌گردد که اگرچه در پله‌های ابتدایی، افزایش نفوذ بارهای پاسخگو منجر به کاهش قابل توجه هزینه‌ها می‌گردد، در پله‌های انتهایی به دلیل محدودیت‌های حاکم بر ریزش‌بکه و عدم وجود شرایط انتقال توان منابع تولیدی به نقطه اتصال ریزش‌بکه با شبکه سراسری با وجود افزایش سقف مجاز، کاهش هزینه با شیب کمتری دنبال می‌شود. به‌طور خلاصه، وجود واحدهای تولید همزمان با هزینه نسبتاً کم تولید، واحدهای تجدیدپذیر با هزینه تولید رایگان و افزایش نفوذ بارهای پاسخگو، امکان صادرات بیش‌ازپیش برق از ریزش‌بکه به شبکه سراسری را فراهم می‌آورد. در واقع قیمت ثابت تسویه پاسخگویی در برابر قیمت متغیر تعامل با شبکه در این تحلیل این امکان را به مالک ریزش‌بکه داده است تا ضمن مشارکت‌دادن بخش اعظمی از تقاضا در برنامه‌های پاسخگویی بار، تولید اضافی خود را به فروش برساند.



شکل ۴- تغییرات هزینه کل سیستم با تغییر درصد مشارکت پاسخگویی بار



شکل ۵- تغییرات درآمد بارهای پاسخگو با تغییر درصد مشارکت پاسخگویی بار

براین‌مبنا، شکل‌های (۶) تا (۸) نیز به بیان تغییرات هزینه کل، میزان مشارکت و میزان درآمد بارهای پاسخگو در اثر

عادی و متصل شبکه و ریزش‌بکه در دستورکار قرار می‌گیرد. مطابق آنچه در جدول ۴ گزارش شده در این حالت در مجموع ۲۴ ساعت نه‌تنها وابستگی کامل به شبکه وجود ندارد، بلکه انتقال توان از ریزش‌بکه به شبکه سراسری نیز در ساعاتی برقرار شده و این مهم موجب منفی‌شدن هزینه بهره‌برداری و به‌عبارتی کسب درآمد برای ریزش‌بکه در مجموع ۲۴ ساعت شده است. براین‌اساس، واردات برق از شبکه به ریزش‌بکه در ساعات غیراوج و صادرات به شبکه سراسری در ساعات اوج، ضمن اطمینان از تأمین پایایی تقاضای الکتریکی و حرارتی ریزش‌بکه، شبکه سراسری را نیز در صاف‌شدن منحنی بار خود مورد مساعدت قرار می‌دهد. کاهش بیش‌ازپیش مجموع توان قطع‌شده واحدهای تجدیدپذیر نیز از دیگر مزایا در این حالت است.

همچنین باید اذعان داشت با مجازبودن مصرف‌کنندگان به پاسخگویی، کاهش بیش‌ازپیش هزینه‌های بهره‌برداری با ایجاد زمینه فروش بیشتر انرژی به شبکه سراسری در این سناریو دور از انتظار نمی‌باشد. براین‌مبنا، جهت ارزیابی بیش‌ازپیش اثر حضور بارهای پاسخگوی الکتریکی در نتایج شبیه‌سازی، در ادامه به تحلیل‌هایی مبتنی بر تغییر برخی مولفه‌های اثرگذار در حضور این منابع پرداخته می‌شود. براین‌اساس، در گام اول اینکه اعمال چه درصدی از پاسخگویی بار مؤثر بوده و از منظر اقتصادی مطلوب بهره‌بردار ریزش‌بکه متعامل با شبکه سراسری می‌باشد تا

کمتری دنبال می‌شود. علاوه بر این، مطابق شکل (۸) درآمد بارهای پاسخگو، که حاصل ضرب میزان مشارکت در قیمت تسویه است، با افزایش پله‌ای قیمت تسویه ابتدا با شیب تندتری (به دلیل غلبه میزان افزایش قیمت بر کاهش عرضه) افزایش یافته و در پله‌های بعد با شیب کمتری (به دلیل غلبه میزان کاهش عرضه بر افزایش قیمت) دنبال می‌شود. علاوه بر این، مطابق شکل (۸) در یک قیمت معین (حدود ۴۰ دلار) درآمد بارهای پاسخگو بیشینه شده و پس از آن، در رابطه درآمد میزان کاهش مشارکت بر افزایش قیمت غلبه و درآمد بارهای پاسخگو روبه کاهش آورده است.

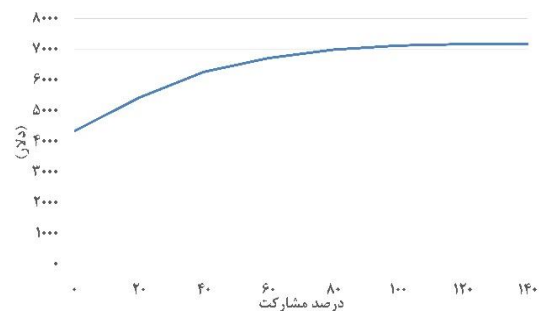
### ۶- تحلیل رفتار پدیداری

رفتار پدیداری بیش از آنکه از خصوصیات ذاتی سیستم‌های خرد هاب انرژی ناشی شود، به اتصال بین اجزا در بستر سیستم کلان ریزشکه باز می‌گردد. از این رو لحاظ تعامل الکتریکی هاب‌های انرژی بایکدیگر در کل سیستم ریزشکه به الگوهای غیرمنتظره رفتاری می‌شود که توسط مؤلفه‌ها و سیستم‌های منفرد هاب انرژی به صورت جداگانه قابل تولید نیستند. به عبارت دیگر اگر چه در برنامه‌ریزی هاب‌های منفرد با احداث تعداد ۳۲ واحد بادی و تعدادی دیگر از واحدهای تولیدی و ذخیره‌سازی در جهت پیشبرد هدف تأمین پایا و اقتصادی تقاضا پیشرفت‌هایی حاصل شد، بهره‌گیری از رفتار پدیداری حاصل از تعامل هاب‌های انرژی می‌تواند در حل برخی چالش‌های باقی‌مانده، بیش از پیش موثر واقع شود. بر این اساس، جدول ۵ به اختصار به مقایسه نتایج در دو سناریو (۱) و (۲) جهت تبیین و تشریح رفتار پدیداری می‌پردازد.

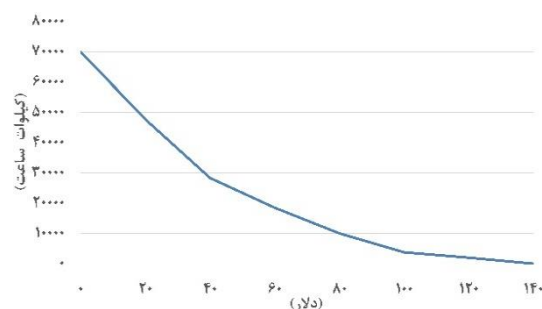
جدول ۵- نتایج در حالات پایه سناریوهای (۱) و (۲)

شاخص	سناریو (۱)؛ سیستم‌های منفرد	سناریو (۲)؛ سیستم‌های متعامل
هزینه کل	۱۱۱۴۵۷،۴۵۸ (دلار)	۱۱۳۰۳،۶۰۳ (دلار)
هزینه وقفه مشترکین	۸۶۹۸۱،۶۲۴ (دلار)	۰
هزینه احداث منابع	۲۱۷۸۴،۸۸۷ (دلار)	۸۸۳۸،۷۵۸ (دلار)
انرژی تأمین نشده (کیلووات ساعت)	۱۱۵۴۷،۷۲۰	۰
انرژی تجدیدپذیر قطع شده (کیلووات ساعت)	۷۳۷۵۳۹،۲۲۴	۹۵۳۴۶،۲۶۲ (کیلووات ساعت)

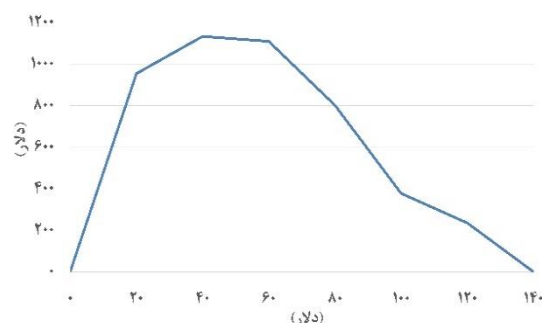
تغییر قیمت تسویه پاسخگویی بار می‌پردازد. بر این اساس مطابق آنچه در شکل (۶) نمایش یافته افزایش هزینه ناشی از افزایش قیمت تسویه و نتیجتاً کاهش مشارکت، در پله‌های ابتدایی با شیب بیشتری دنبال می‌شود. پس از آن به دلیل نبود توجه اقتصادی ناشی از افزایش بیش از پیش هزینه‌ها برای بهره‌بردار، کاهش هزینه با شیب کمتری رخ داده و از پله‌ای به بعد به دلیل بیشتر شدن قیمت تسویه از نقطه بهینه اقتصادی تعامل با شبکه و نتیجتاً صفر شدن مشارکت بارهای پاسخگو، با افزایش قیمت هیچگونه افزایش هزینه‌ای برای سیستم رخ نخواهد داد.



شکل ۶- تغییرات هزینه کل سیستم با تغییر قیمت تسویه پاسخگویی بار



شکل ۷- تغییرات میزان پاسخگویی بار با تغییر قیمت تسویه پاسخگویی بار



شکل ۸- تغییرات سود بارهای پاسخگو با تغییر قیمت تسویه پاسخگویی بار

همچنین مطابق شکل (۷) در پله‌های ابتدایی افزایش قیمت، کاهش مشارکت با شیب تندتری و سپس با شیب

از ریزش‌بکه و حجم بالای انرژی تجدیدپذیر قطع شده از معایب غیرقابل انکار سناریو (۱) (هر دو حالت ۱ و ۲) به‌شمار می‌آید.

به‌منظور مواجهه با چالش‌های فوق‌الذکر، در سناریو (۲) از دیدگاهی جامع و با رویکرد سیستم‌های مسئله‌مورد بررسی قرار می‌گیرد. براین اساس، در صورتی که ریزش‌بکه به عنوان سیستمی متشکل از سیستم‌های کوچک‌تر هاب انرژی مدل‌سازی شود، رفتار این سیستم‌های خرد در تعامل با یکدیگر جالب توجه است. براین اساس، مطابق شکل (۹) و حالت ۳ (حالت برنامه‌ریزی با رویکرد سیستم‌های)، صفرشدن هزینه وقفه مشترکین و انرژی تأمین نشده در نتیجه تأمین پایای تقاضای مصرف‌کنندگان در این حالت جالب توجه است. این مهم نیز رفتاری پدیداری را به نمایش می‌گذارد که مبتنی بر آن پایایی کل سیستم‌های از پایایی مجمع زیرسیستم‌ها بیشتر شده است.

علاوه‌براین، مطابق شکل‌های (۱۰) تا (۱۲) در این حالت، کاهش چشمگیر هزینه بهره‌برداری علاوه‌بر کاهش قابل توجه حجم انرژی تجدیدپذیر قطع شده در عین حال احداث متناسب ظرفیت واحدهای بادی و خورشیدی جهت بهره‌گیری حداکثری بهره‌بردار ریزش‌بکه از همبستگی منفی این منابع تولیدی از نکات جالب توجه این تعامل است.

با لحاظ تعامل در ریزش‌بکه، بهره‌گیری از بیشینه ظرفیت در اختیار ذخیره‌سازها با احداث تمامی گزینه‌ها در عین حال کاهش تعداد واحدهای تولیدی، از دیگر دستاوردهای این دیدگاه محسوب می‌شود. علاوه‌براین، رفتار معمول عملکرد جمعی ذخیره‌سازها که در حالت برنامه‌ریزی منفرد با چالش‌هایی همراه بود در این دیدگاه در جهت کاهش انرژی تجدیدپذیر قطع شده، شارژشدن در ساعات غیرپیک و تأمین تقاضا در ساعات پیک به‌حالت معمول بازگشته است. در این میان، رفتار سیستم ریزش‌بکه ساختاریافته بر مبنای سیستم‌های سیستم‌ها، در اتصال به سیستم بزرگتر شبکه سراسری نیز در قالب حالت ۴ جالب توجه است. براین اساس، عملکرد این ریزش‌بکه که با رویکرد سیستم‌های سیستم‌ها جهت تأمین پایا و اقتصادی بار در شرایط قطع ارتباط با شبکه سراسری طراحی شده است، در شرایط معمول و متصل به سیستم شبکه سراسری در جهت کاهش بیش‌ازپیش هزینه‌ها و بهره‌گیری از ظرفیت یکپارچه‌سازی مورد بررسی قرار می‌گیرد. مهمترین رفتار موثر ریزش‌بکه در حالت ۴ علاوه‌بر اطمینان از تأمین پایا و

بر مبنای جدول ۵، در سناریو (۲) هزینه کل سیستم ریزش‌بکه که تا حد زیادی متأثر از هزینه گزاف وقفه مشترکین می‌باشد، قریب به ۹۰ درصد نسبت به سناریو (۱) کاهش یافته است. به‌عبارت دیگر، هزینه کل سیستم‌های از سیستم‌ها از هزینه مجمع زیرسیستم‌ها کمتر شده است که این همان تعریف رفتار پدیداری است.

در این میان ایجاد شرایط پایا در بهره‌برداری از سیستم ریزش‌بکه و حصول کاهش ۱۰۰ درصدی هزینه وقفه در سناریو (۲) همزمان با کاهش ۶۰ درصدی هزینه احداث منابع، سهم قابل توجهی در این کاهش هزینه داشته است. کاهش هزینه وقفه مشترکین و انرژی تأمین نشده در سناریو (۲) نشان از آن دارد که پایایی کل سیستم‌های از پایایی مجمع زیرسیستم‌ها بیشتر شده است، که این نیز تعریفی دیگر از رفتار پدیداری است.

علاوه‌براین، رفتار پدیداری ناشی از تعامل سیستم‌های هاب انرژی، علاوه‌بر ایجاد زمینه تأمین کامل انرژی مشترکین و به‌صفر رساندن انرژی تأمین نشده، موجب کاهش بیش از ۸۸ درصدی انرژی تجدیدپذیر قطع شده نیز شده است. این شرح، دلیلی آشکار بر اهمیت بهره‌گیری از رفتار پدیداری در رویکرد سیستم‌های سیستم‌ها به‌منظور ایجاد شرایط بهره‌برداری پایا و اقتصادی می‌باشد.

اگر چه تحلیل مختصر فوق، حجت را در به‌کارگیری رویکرد سیستم‌های سیستم‌ها و بهره‌گیری از رفتار پدیداری تمام نموده با این وجود جهت تحلیل دقیق‌تر نتایج سناریوهای دوگانه هر کدام از سناریوها در ادامه به دو حالت تقسیم و تحلیلی مبتنی بر نتایج ۴ حالت ارائه می‌شود.

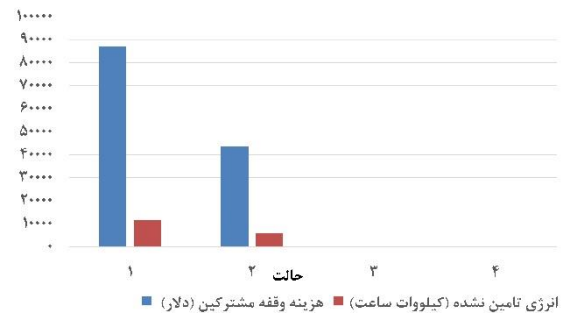
در سناریو (۱) و در حالت برنامه‌ریزی سیستم‌های منفرد با وجود گزینه‌هایی از فناوری‌های مختلف تولید و ذخیره‌سازی در شرایط قطع پشتیبانی شبکه و با وجود تأمین بخش اعظم تقاضا در ساعات مختلف، طبق آنچه در شکل (۹) گزارش شده است در حالت ۱ (حالت برنامه‌ریزی منفرد) وقفه در تأمین تقاضا در ساعات اوج بار در حالت برنامه‌ریزی منفرد اجتناب‌ناپذیر بوده است. براین اساس، استفاده از پاسخگویی بار به‌عنوان یکی از راهکارهای کاهش انرژی تأمین نشده طی حالت ۲ (حالت برنامه‌ریزی منفرد با حضور بار پاسخگو) پیشنهاد می‌شود. براین اساس، اگر چه در این حالت مطابق شکل (۹) با اجرای برنامه پاسخگویی بار تشویق‌محور کاهش چشمگیر انرژی تأمین نشده حاصل می‌شود، مطابق شکل‌های (۹) و (۱۰) هزینه بالای بهره‌برداری

در این میان، نقش برنامه‌های پاسخگویی بار در تقویت این رفتار موثر سیستم ریزش‌بکه نیز غیرقابل انکار است. ذکر این نکته نیز حائز اهمیت است که اگرچه مجتمع کردن سیستم‌ها با استفاده از فن‌آوری‌های پیشرفته‌تر، کنترل و ارتباطی به خودی خود یک چالش است، مهم‌تر از آن این است که از دیدگاه سیستم بهره‌برداری و مدیریت ریزش‌بکه به‌عنوان سیستم کلان دربردارنده سیستم‌های منفرد، ویژگی مهم این یکپارچه‌سازی که با عنوان رفتار پدیداری یا جمعی شناخته می‌شود باید مورد تحلیل دقیق واقع شده و اطمینان حاصل شود که نتیجه استفاده از رویکرد سیستم‌ها از سیستم‌ها قابل اطمینان بوده و ضمن ایجاد زمینه تأمین پایا و اقتصادی تقاضا، کیفیت خدمات و توان را نیز حاصل می‌نماید. بر این اساس، سیستم‌های منفردی که سیستم ریزش‌بکه را تشکیل می‌دهند، اگر چه با توجه به نوع بار، میزان بار و مواردی دیگر متفاوت بوده و به‌طور مستقل بهره‌برداری می‌شوند، اثر متقابل آن‌ها ویژگی‌های مهم پدیداری را ارائه می‌دهد که ماهیتی دارد که ممکن است برای سیستم مفید یا مضر باشد؛ از این رو ذینفعان باید در شناخت اثرات آن اهتمام ورزند.

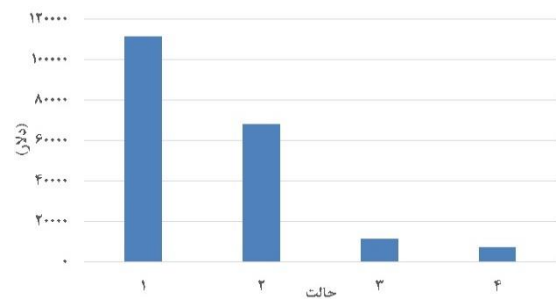
## ۷- نتیجه‌گیری

موفقیت در بهره‌برداری از سیستم‌ها مستلزم شناخت، مدیریت مؤثر و بهره‌گیری از رفتار پدیداری است. از این رو این مقاله به ارائه یک مدل جهت تحلیل رفتار پدیداری پایایی در سیستم‌ها شامل هاب‌های انرژی به‌منظور تبیین وجود، نوع و سطح این رفتار می‌پردازد، تا با شناخت آن استراتژی‌های مدیریتی در جهت بهره‌گیری بیشینه از آثار مثبت آن و احیاناً مواجهه و مدیریت آثار مخرب آن به‌کار گرفته شود. مطابق نتایج، اثرات مثبت ناشی از رفتار پدیداری در جهت کاهش هزینه‌های بهره‌برداری، کاهش میزان انرژی تجدیدپذیر قطع‌شده و بهبود شاخص‌های پایایی همزمان با نیاز کمتر به ایجاد منابع متعدد تولید قابل توجه است. همچنین با مقایسه شاخص‌های پایایی سناریوهای مهم آشکار می‌شود که پایایی کل سیستم‌ها از پایایی مجمع زیرسیستم‌ها بیشتر شده است که این مهم همان تعریف رفتار پدیداری پایایی است. علاوه بر این، این ریزش‌بکه که با رویکرد سیستمی جهت تأمین پایا و اقتصادی بار در شرایط قطع ارتباط با شبکه سراسری طراحی شده است، در شرایط

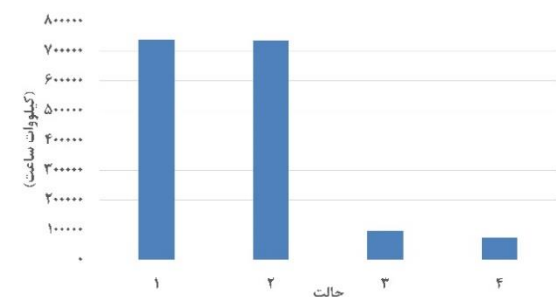
قابل اعتماد تقاضا، کمک به هموارشدن منحنی بار شبکه با تزریق توان به شبکه در ساعات اوج بار و دریافت توان در ساعات غیراوج با بهره‌گیری از ظرفیت ذخیره‌سازها و منابع تولیدی موجود در ریزش‌بکه متعامل است.



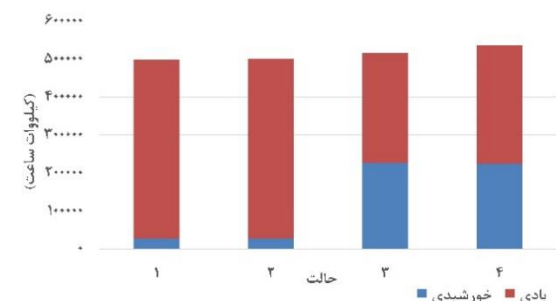
شکل ۹- تغییرات هزینه وقفه مشترکین و انرژی تأمین نشده در حالات ۴گانه



شکل ۱۰- هزینه کل سیستم در حالات ۴گانه



شکل ۱۱- انرژی تجدیدپذیر قطع شده در حالات ۴گانه



شکل ۱۲- سهم انرژی تجدیدپذیر در حالات ۴گانه

این سیستم که تا پیش از این در ساعات اوج به‌طور کامل وابسته به شبکه سراسری بوده با این رویکرد به معین شبکه در جهت پیک‌زدایی بدل شده است.

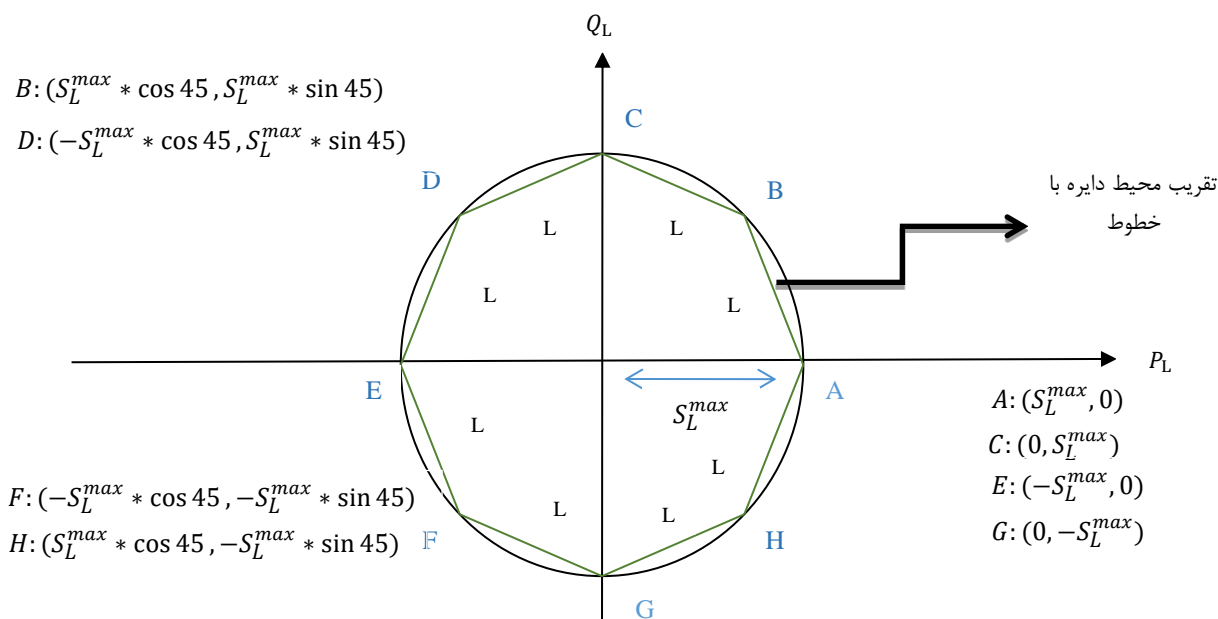
معادله خطوط تقریب‌زده شده از محیط دایره می‌باشد استفاده  $(P_L(b,c,t))^2 + (Q_L(b,c,t))^2 \leq (S_L^{max}(b,c,t))^2$  می‌گردد.  $S_L^{max}$  در دایره شکل پ ۱ اندازه توان مختلط یا به عبارتی حد بیشینه توان ظاهری عبوری از خط می‌باشد. براساس این شکل، بدست آوردن معادلات خطوط  $L_1$  تا  $L_8$  به کمک تعیین نقاط دو سر هر خط مبتنی بر آنچه در [۴۹] شرح یافته است، امکان تقریب دایره با ۸ خط با مختصات جدول پ ۱ را فراهم می‌سازد. خطی‌سازی روابط (۲۲) و (۳۵) نیز مشابه روند فوق انجام می‌گردد.

معمول و متصل به شبکه سراسری، علاوه بر اطمینان از تأمین پایای تقاضا، رفتار موثری شامل کمک به هموارشدن منحنی بار شبکه سراسری با تزریق توان به شبکه در ساعات اوج و دریافت توان در ساعات غیراوج با بهره‌گیری از ظرفیت ذخیره‌سازها و منابع تولیدی موجود از خود نشان می‌دهد.

**پیوست (۱) - روش‌های خطی‌سازی برخی محدودیت‌های روش پیشنهادی**

۱- به منظور خطی‌سازی محدودیت (۳۴) از رابطه

$$a_i Q_L + b_i P_L + c_i = 0 \quad \forall i \in \{1, 2, \dots, 8\} \text{ که بیانگر}$$



شکل پ ۱- مدل خطی دایره حاصل از رابطه توان ظاهری با توان‌های اکتیو و راکتیو [۴۹]

جدول پ ۱- ضرایب در معادلات خطوط تقریب‌زننده محیط دایره شکل پ ۱ [۴۹]

ضریب / خط	$a_i$	$b_i$	$c_i$
$L_1$	۱	۲,۴۱۴۲	-۲,۴۱۴۲
$L_2$	۱	۰,۴۱۴۲	-۱
$L_3$	۱	-۰,۴۱۴۲	-۱
$L_4$	۱	-۲,۴۱۴۲	-۲,۴۱۴۲
$L_5$	-۱	-۲,۴۱۴۲	-۲,۴۱۴۲
$L_6$	-۱	-۰,۴۱۴۲	-۱
$L_7$	-۱	۰,۴۱۴۲	-۱
$L_8$	-۱	۲,۴۱۴۲	-۲,۴۱۴۲

استفاده می‌گردد. بر این مبنا اگر  $LM(ch,t) = I_{ch}(ch,t)I_{invch}(ch)$  حاصل ضرب متغیرهای باینری و به صورت غیرخطی باشد به کمک روابط

۲- به منظور خطی‌سازی محدودیت (۱۰) مشابه خطی‌سازی روابط (۱۱)، (۱۸)، (۱۹) از روابط معمول خطی‌سازی ضرب متغیرهای باینری مطابق روابط ذیل



(پ ۱-۳) به صورت خطی بدل می گردد [۵۳].

پیوست (۲) - اطلاعات اولیه سیستم تست مورد

## مطالعه

برخی از پارامترهای شبکه مورد مطالعه در قالب جداول پ ۲ و تصاویر پ ۲ تا پ ۴ در ادامه نشان داده شده است.

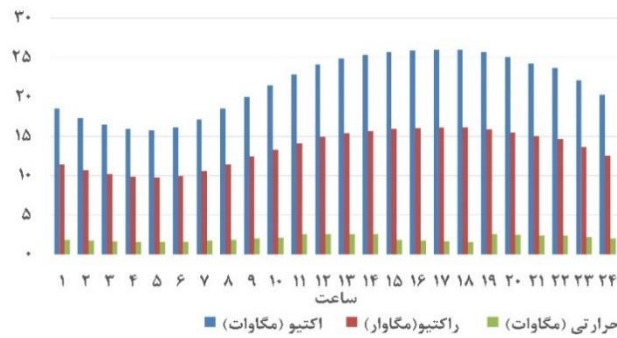
$$I_{ch}(ch,t) \leq LM(ch,t) \quad (پ ۱)$$

$$I_{mch}(ch) \leq LM(ch,t) \quad (پ ۲)$$

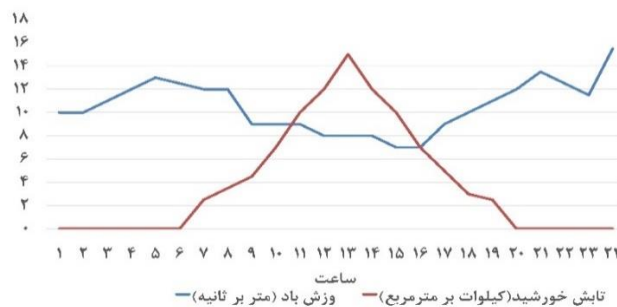
$$LM(ch,t) \geq I_{ch}(ch,t) + I_{mch}(ch) - 1 \quad (پ ۳)$$

جدول پ ۲- مشخصات اجزاء موجود در هاب انرژی [۴۸]

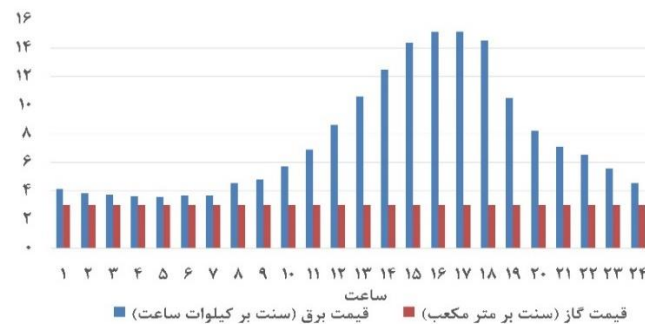
واحد تولید همزمان		واحد ذخیره ساز		واحد بویلر	
$\eta_{chp,e}$	۰,۴۲	$\eta_{ch}$	۰,۹	$\eta_{bo}$	۰,۸۵
$\eta_{chp,h}$	۰,۴۷	$\eta_{dch}$	۰,۹	$P_{minbo}$	۰
$P_{minchp,e}$	۱۰۰	$C_{max}$	۲۶۷۸	$P_{maxbo}$	۱۱۰
$P_{maxchp,e}$	۱۰۰۰			$SCOST_{bo}$	۱۵
$P_{minchp,h}$	۲۰	واحد خورشیدی		واحد بادی	
$P_{maxchp,h}$	۱۵۰۰	$\eta$	۰,۱۸۶	$P_{max}$	۲۰۰۰
$SCOST_{ch}$	۱۵	$S$	۱۰۰۰	$V_{Cl}$	۳
				$V_R$	۱۲
				$V_{CO}$	۵۰



شکل پ ۲- بار الکتریکی و حرارتی پیش بینی شده مصرفی [۴۵] و [۴۸]



شکل پ ۳- تابش خورشید و وزش باد پیش بینی شده [۴۸]



شکل پ ۴- قیمت برق و گاز طبیعی در تبادل با شبکه سراسری [۴۸]

متغیرها	علائم و نمادها
$CIC$ هزینه وقفه مشترکین	$t$ اندیس زمان
$INVC$ هزینه تاسیس واحدهای تولید و ذخیره‌سازی	$bo$ اندیس بویلرها
$OPC$ هزینه بهره‌برداری واحدها	$ch$ اندیس واحدهای تولید همزمان
$C_{oh}(l, k)$ هزینه وقفه در تأمین بار نوع $k$ ام نقطه بار $l$ ام	$pv$ اندیس واحدهای خورشیدی
$PG_e(t)$ میزان تبادل برق با شبکه در ساعت $t$ ام	$w$ اندیس واحدهای بادی
$PG_h(t)$ میزان تبادل گاز با شبکه در ساعت $t$ ام	$s$ اندیس واحدهای ذخیره‌ساز
$SUC_{bo}(bo, t)$ هزینه راه‌اندازی بویلر $bo$ ام در ساعت $t$ ام	$l$ اندیس نقاط بار
$SUC_{ch}(ch, t)$ هزینه راه‌اندازی واحد تولید همزمان $ch$ ام در ساعت $t$ ام	$k$ اندیس نوع بار
$DRC_e(l, t)$ هزینه پاسخگویی بار الکتریکی $l$ ام در ساعت $t$ ام	
$DRC_h(l, t)$ هزینه پاسخگویی بار حرارتی $l$ ام در ساعت $t$ ام	
$P_w(w, t)$ تولید واحد بادی $w$ ام در ساعت $t$ ام	
$P_{pv}(pv, t)$ تولید واحد خورشیدی $pv$ ام در ساعت $t$ ام	
$P_{b, gas}(t)$ گاز تزریق شده به هر باس ساعت $t$ ام	
$P_{chp, e}(ch, t)$ توان الکتریکی واحد تولید همزمان $ch$ ام در ساعت $t$ ام	
$P_{chp, h}(ch, t)$ توان حرارتی واحد تولید همزمان $ch$ ام در ساعت $t$ ام	
$P_{ch}(s, t)$ توان خروجی شارژ واحد ذخیره‌ساز $s$ ام در ساعت $t$ ام	
$P_{dch}(s, t)$ توان خروجی دشارژ واحد ذخیره‌ساز $s$ ام در ساعت $t$ ام	
$DR_e(l, t)$ میزان پاسخگویی بار الکتریکی $l$ ام در ساعت $t$ ام	
$DR_h(l, t)$ میزان پاسخگویی بار حرارتی $l$ ام در ساعت $t$ ام	
$LSI(l, t)$ متغیر قطع بار الکتریکی $l$ ام در ساعت $t$ ام	
$V(b, t)$ ولتاژ باس $b$ ام در ساعت $t$ ام	
$\delta(b, t)$ زاویه باس $b$ ام در ساعت $t$ ام	
$P_l(b, c, t)$ توان حقیقی عبوری خط بین باس‌های $b$ و $c$ در ساعت $t$ ام	
$Q_l(b, c, t)$ توان موهومی عبوری خط بین باس‌های $b$ و $c$ در ساعت $t$ ام	
$ENS$ شاخص انرژی تأمین نشده	
$CWE$ شاخص انرژی بادی قطع شده	
$CPVE$ شاخص انرژی خورشیدی قطع شده	
$P_{wec}(w, t)$ توان قطع شده واحد بادی $w$ ام در ساعت $t$ ام	
$P_{pvec}(pv, t)$ توان قطع شده واحد خورشیدی $pv$ ام در ساعت $t$ ام	
$P(s, t)Q(s, t)$ توان اکتیو و راکتیو واحد ذخیره‌ساز $s$ ام در ساعت $t$ ام	
$C(s, t)$ انرژی واحد ذخیره‌ساز $s$ ام در ساعت $t$ ام	
$I_{inv}(w)$ متغیر باینری احداث واحدهای بادی $w$ ام	
$I_{impv}(pv)$ متغیر باینری احداث واحدهای خورشیدی $pv$ ام	
$I_{invch}(ch)$ متغیر باینری احداث واحد تولید همزمان $ch$ ام	
$I_{inv s}(s)$ متغیر باینری احداث واحد ذخیره‌ساز $s$ ام در ساعت $t$ ام	
$I_{ch}(s, t)$ متغیر باینری شارژ واحد ذخیره‌ساز $s$ ام در ساعت $t$ ام	
$I_{dch}(s, t)$ متغیر باینری دشارژ واحد ذخیره‌ساز $s$ ام در ساعت $t$ ام	
$I_{bo}(bo, t)$ متغیر باینری روشن و خاموش بودن بویلر $bo$ ام در ساعت $t$ ام	
$I_{ch}(ch, t)$ متغیر باینری روشن و خاموش بودن واحد تولید همزمان $ch$ ام در ساعت $t$ ام	
	$i$ نرخ بهره
	$n$ افق زمانی برنامه‌ریزی
	$\lambda(l, k)$ درصد موجود از نوع بار $k$ ام در نقطه بار $l$ ام
	$INVC_w$ هزینه احداث واحدهای بادی
	$INVC_{pv}$ هزینه احداث واحدهای خورشیدی
	$INVC_{ch}$ هزینه احداث واحدهای تولید همزمان
	$INVC_s$ هزینه احداث واحدهای ذخیره‌ساز
	$\rho_e(t)$ قیمت تبادل برق با شبکه در ساعت $t$ ام
	$\rho_g(t)$ قیمت تبادل گاز با شبکه در ساعت $t$ ام
	$V(w, t)$ سرعت باد در محل واحد بادی $w$ ام در ساعت $t$ ام
	$g(pv, t)$ تابش در محل واحد خورشیدی $pv$ ام در ساعت $t$ ام
	$V_R, V_{Cl}, V_{Co}$ سرعت نامی و حداقل و حداکثر سرعت مجاز باد
	$P_{max}(w)$ بیشینه تولید واحد بادی $w$ ام
	$\eta(pv), S(pv)$ بازده و مساحت واحدهای خورشیدی $pv$ ام
	$\theta_b(t)$ ضریب پخش گاز در هر باس در ساعت $t$ ام
	$\eta_{chp, e}(ch)$ بازده الکتریکی واحد تولید همزمان $ch$ ام
	$\eta_{chp, h}(ch)$ بازده حرارتی واحد تولید همزمان $ch$ ام
	$P_{min, chp, e}(ch)$ کمینه توان الکتریکی تولیدی واحد تولید همزمان $ch$ ام
	$P_{max, chp, e}(ch)$ بیشینه توان الکتریکی تولیدی واحد تولید همزمان $ch$ ام
	$P_{min, chp, h}(ch)$ کمینه توان حرارتی تولیدی واحد تولید همزمان $ch$ ام
	$P_{max, chp, h}(ch)$ بیشینه توان حرارتی تولیدی واحد تولید همزمان $ch$ ام
	$\eta_{bo}(bo)$ بازده حرارتی بویلر $bo$ ام
	$\pi_e(l, t)$ قیمت تسویه پاسخگویی بار الکتریکی $l$ ام در ساعت $t$ ام
	$\pi_h(l, t)$ قیمت تسویه پاسخگویی بار حرارتی $l$ ام در ساعت $t$ ام
	$C_{max}(s, t)$ انرژی بیشینه واحد ذخیره‌ساز $s$ ام در ساعت $t$ ام
	$P_e(l, t)$ بار الکتریکی در نقطه بار $l$ ام در ساعت $t$ ام
	$P_h(l, t)$ بار حرارتی در نقطه بار $l$ ام در ساعت $t$ ام
	$B_{bc}, G_{bc}$ کاندوکتانس و سوسپتانس

## مراجع

- [1] A. Fereidunian, H. Lesani, M. A. Zamani, M. A. S. Kolarijani, N. Hassanpour, and S. S. Mansouri, "A complex adaptive system of systems approach to human-automation interaction in smart grid", *Contemporary issues in systems science and engineering*, John Wiley and Sons, April 2015, pp. 425-500.
- [2] A. K. Marvasti, Y. Fu, S. DorMohammadi, and M. Rais-Rohani, "Optimal operation of active distribution grids: A system of systems framework", *IEEE Transactions on Smart Grid*, Vol. 5, No. 3, March 2014, pp.1228-1237.
- [3] A. Mohammadi, F. Safdarian, M. Mehrtash, and A. Kargarian, "A system of systems engineering framework for modern power system operation", *Sustainable Interdependent Networks II*, Springer, Cham, 2019, pp. 217-247.
- [4] E. Kremers, P. Viejo, O. Barambones, and J. G. de Durana, "A complex systems modelling approach for decentralised simulation of electrical microgrids", *15th IEEE International Conference on Engineering of Complex Computer Systems*, Oxford, United Kingdom, March 2010, pp. 302-311.
- [5] J. G. de Durana, O. Barambones, E. Kremers, and P. Viejo, "Modeling Smart Grids as Complex Systems through the Implementation of Intelligent Hubs", *ICINCO (3)*, Funchal, Madeira, Portugal, June 2010, pp. 146-151.
- [6] M. S. Mahmoud, M. S. U. Rahman, and F. M. Al-Sunni, "Networked control of microgrid system of systems", *International Journal of Systems Science*, Vol. 47, No. 11, 2015, pp.2607-2619.
- [7] H. Mehrjerdi, "Resilience Improvement With Zero Load Curtailment by Multi-Microgrid Based on System of Systems", *IEEE Access*, Vol. 8, November 2020, pp.198494-198502.
- [8] R. Jafari-Marandi, M. Hu, and S. Chowdhury, "A system of system approach for smart complex energy system operation decision", *International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*, American Society of Mechanical Engineers Digital Collection, August 2015.
- [9] M. S. Mahmoud, M. S. U. Rahman, and M. S. Fouad, "Review of microgrid architectures—a system of systems perspective", *IEET Renewable Power Generation*, Vol. 9, No. 8, November 2015, pp.1064-1078.
- [10] S. Mittal, M. Ruth, A. Pratt, M. Lunacek, D. Krishnamurthy, and W. Jones, "System-of-Systems Approach for Integrated Energy Systems Modeling and Simulation", (No. NREL/CP-2C00-64045), National Renewable Energy Lab.(NREL), Golden, CO (United States), August 2015.
- [11] M. Uslar, S. Rohjans, C. Neureiter, F. Pröbstl Andrén, J. Velasquez, C. Steinbrink, V. Efthymiou, G. Migliavacca, S. Horsmanheimo, H. Brunner, and T. I. Strasser, "Applying the smart grid architecture model for designing and validating system-of-systems in the power and energy domain: A European perspective", *Energies*, Vol. 12, No. 2, January 2019, pp.258.
- [12] J. Evora, J. J. Hernandez, M. Hernandez, and E. Kremers, "Decision support for complex systems: a smart grid case", *Proceedings of the 2013 Workshop on Complex Systems Modelling and Simulation*, Milan, Italy, July 2013, pp. 21-37.
- [13] G. Guérard, S. B. Amor, and A. Bui, "A Complex System Approach for Smart Grid Analysis and Modeling", In *KES*, San Sebastian, Spain, September 2012, pp. 788-797.
- [14] S. M. Amin, and A. M. Giacomoni, "Smart grid as a dynamical system of complex networks: A framework for enhanced security", *IFAC Proceedings Volumes*, Vol. 44, No. 1, January 2011, pp.526-531.
- [15] R. M. Rylatt, J. R. Snape, P. Allen, B. M. Ardestani, P. J. Boait, E. Boggasch, D. Fan, G. Fletcher, R. Gammon, M. Lemon, and V. H. Pakka, "Exploring smart grid possibilities: A complex systems modelling approach", 2015.
- [16] N. U. Ibne Hossain, M. Nagahi, R. Jaradat, C. Shah, R. Buchanan, and M. Hamilton, "Modeling and assessing cyber resilience of smart grid using Bayesian network-based approach: a system of systems problem", *Journal of Computational Design and Engineering*, Vol. 7, No. 3, June 2020, pp.352-366.
- [17] M. Antal, C. Pop, T. Cioara, I. Anghel, I. Salomie, and F. Pop, "A system of systems approach for data centers optimization and integration into smart energy grids", *Future Generation Computer Systems*, Vol. 105, April 2020, pp.948-963.

[۱۸] مسعود احمدی گرجی و نیما امجدی، "برنامه‌ریزی توسعه پویای شبکه‌های توزیع در حضور منابع تولید پراکنده با استفاده از یک الگوریتم بهینه‌سازی جدید دو سطحی"، *نشریه مدل‌سازی در مهندسی*، دوره ۱۴، شماره ۴۴، بهار ۱۳۹۵، صفحه ۱۴۳-۱۵۷.

- [۱۹] سید محمد باقر ساداتی، جمال مشتاق و میعادرضا شفیعی خواه، "تأثیر خودروهای الکتریکی و برنامه پاسخگویی بار بر بهره‌برداری بهینه از شبکه توزیع در چهارچوب یک مدل دوسطحی جدید"، نشریه مدل‌سازی در مهندسی، دوره ۱۶، شماره ۵۴، پاییز ۱۳۹۷، صفحه ۵۳-۶۸.
- [20] M. Nozarian, and A. Fereidunian, "Smart City as an Smart Energy Hub: A Bibliographic, Analytic and Structural Review", Iranian Electric Industry Journal of Quality and Productivity, Vol. 9, No. 4, November 2020, pp.63-83.
- [۲۱] مهدی نودریان و علیرضا فریدونیان، "ارزیابی اقتصادی و زیست‌محیطی هاب انرژی با سیستم توزیع ترکیبی و انرژی خورشیدی"، پنجمین کنفرانس بین‌المللی فن‌آوری و مدیریت انرژی، تهران، ایران، ۳۰ بهمن و ۱ اسفند، ۱۳۹۷.
- [۲۲] مهدی نودریان و علیرضا فریدونیان، "بهره‌برداری بهینه ریزشبکه‌های شامل هاب‌های انرژی به‌هم‌پیوسته با حضور پاسخگویی بار و منابع تولیدپراکنده"، کنفرانس شبکه‌های هوشمند انرژی ۹۸، تهران، ایران، ۲۷ تا ۲۸ آذرماه، ۱۳۹۸.
- [۲۳] مهدی نودریان و علیرضا فریدونیان، "شهر هوشمند به‌مثابه هاب انرژی: مروری بر انعطاف‌پذیری شهر در بحران کرونا"، کنفرانس شبکه‌های هوشمند انرژی ۹۹، کاشان، ایران، ۲۶ تا ۲۷ آذرماه، ۱۳۹۹.
- [24] R. Bahmani, H. Karimi, and S. Jadid, "Cooperative energy management of multi-energy hub systems considering demand response programs and ice storage", International Journal of Electrical Power and Energy Systems, Vol. 130, September 2021, p.106904.
- [25] M. R. Ramatian, A. G. Shamim, and S. Bahramara, "Optimal Operation of the Energy Hubs in the islanded Multi-Carrier Energy System Using Cournot model", Applied Thermal Engineering, March 2021, p.116837.
- [26] A. Ghanbari, H. Karimi, and S. Jadid, "Optimal planning and operation of multi-carrier networked microgrids considering multi-energy hubs in distribution networks", Energy, Vol. 204, May 2020, p.117936.
- [27] X. Wang, Y. Liu, C. Liu, and J. Liu, "Coordinating energy management for multiple energy hubs: From a transaction perspective", International Journal of Electrical Power and Energy Systems, Vol. 121, October 2020, p.106060.
- [28] A. Mirzapour-Kamanaj, M. Majidi, K. Zare, and R. Kazemzadeh, "Optimal strategic coordination of distribution networks and interconnected energy hubs: A linear multi-follower bi-level optimization model", International Journal of Electrical Power and Energy Systems, Vol. 119, July 2020, p.105925.
- [29] T. Liu, D. Zhang, and T. Wu, "Standardised modelling and optimisation of a system of interconnected energy hubs considering multiple energies—Electricity, gas, heating, and cooling", Energy Conversion and Management, Vol. 205, February 2020, p.112410.
- [30] M. Khorasany, A. Najafi-Ghalelou, R. Razzaghi, and B. Mohammadi-Ivatloo, "Transactive energy framework for optimal energy management of multi-carrier energy hubs under local electrical, thermal, and cooling market constraints", International Journal of Electrical Power and Energy Systems, Vol. 129, July 2021, p.106803.
- [31] M. Mohammadi, Y. Noorollahi, B. Mohammadi-ivatloo, M. Hosseinzadeh, H. Yousefi, and S. T. Khorasani, "Optimal management of energy hubs and smart energy hubs—a review", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 89, June 2018, pp.33-50.
- [32] T. Liu, D. Zhang, and T. Wu, "Optimal operation of interconnected energy hubs by using decomposed hybrid particle swarm and interior-point approach", Energy conversion and management, Vol. 95, February 2020, pp.36-46.
- [33] A. Bostan, M. S. Nazar, M. Shafie-khah, and J. P. Catalão, "Optimal scheduling of distribution systems considering multiple downward energy hubs and demand response programs", Energy, Vol. 190, January 2020, p.116349.
- [34] X. Luo, Y. Liu, J. Liu, and X. Liu, "Energy scheduling for a three-level integrated energy system based on energy hub models: A hierarchical Stackelberg game approach", Sustainable Cities and Society, Vol. 52, January 2020, p.101814.
- [35] X. Zhang, L. Che, M. Shahidehpour, A. S. Alabdulwahab, and A. Abusorrah, "Reliability-based optimal planning of electricity and natural gas interconnections for multiple energy hubs", IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 8, No. 4, December 2015, pp.1658-1667.

- [36] J. F. Marquant, R. Evins, and J. Carmeliet, "Reducing computation time with a rolling horizon approach applied to a MILP formulation of multiple urban energy hub system", *Procedia Computer Science*, Vol. 51, January 2015, pp.2137-2146.
- [37] M. Ghorab, "Energy hubs optimization for smart energy network system to minimize economic and environmental impact at Canadian community", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 151, March 2019, pp.214-230.
- [38] H. R. Gholinejad, A. Loni, J. Adabi, and M. Marzband, "A hierarchical energy management system for multiple home energy hubs in neighborhood grids", *Journal of Building Engineering*, Vol. 28, March 2020, p.101028.
- [39] D. Huo, S. Le Blond, C. Gu, W. Wei, and D. Yu, "Optimal operation of interconnected energy hubs by using decomposed hybrid particle swarm and interior-point approach," *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 95, February 2018, pp.36-46.
- [40] T. J. Inocência, G. R. Gonzales, E. Cavalcante, and F. E. Horita, "Emergent Behavior in System-of-Systems: A Systematic Mapping Study", *Proceedings of the XXXIII Brazilian Symposium on Software Engineering*, September 2019, pp. 140-149.
- [41] J. C. Hsu, and M. Butterfield, "Modeling Emergent Behavior for Systems-of-Systems", *INCOSE International Symposium*, June 2007, pp. 1811-1821.
- [42] V. V. G. Neto, "Validating Emergent Behaviours in Systems-of-Systems through Model Transformations", *SRC@ MoDELS*, October 2016.
- [43] S. Mittal, and L. Rainey, "Harnessing emergence: The control and design of emergent behavior in system of systems engineering", *Proceedings of the conference on summer computer simulation*, July 2015, pp. 1-10.
- [44] A. Shahsavari, A. Fereidunian, and S. M. Mazhari, "A joint automatic and manual switch placement within distribution systems considering operational probabilities of control sequences," *International Transactions on Electrical Energy Systems*, Vol. 25, No. 11, November 2015, pp.2745-2768.
- [۴۵] علی کریمی، زهرا رنجبر، علیرضا فریدونیان و حمید لسانی، "بهره برداری بهینه از ریزشبه‌ها در حضور ذخیره‌کننده‌های انرژی و منابع انرژی تجدیدپذیر"، *کنفرانس شبکه‌های هوشمند انرژی ۹۵*، کرمان، ایران، ۳۰ آذر، ۱۳۹۵.
- [۴۶] عباس توکلی، احدکامی و مصطفی اسماعیلی شاهرخت، "پخش بار احتمالی شبکه‌های توزیع در حضور منابع انرژی تجدیدپذیر"، *کنفرانس شبکه‌های هوشمند انرژی ۹۳*، تهران، ایران، ۱۸ آذرماه، ۱۳۹۳.
- [۴۷] حمید فلقی، مریم رضانی، محمودرضا حقی فام، "تحلیل تأثیر نیروگاه‌های بادی بر قابلیت تبادل شبکه‌های انتقال در سیستم قدرت"، *نشریه مدل‌سازی در مهندسی*، دوره ۱۰، شماره ۳۰، پاییز ۱۳۹۱، صفحه ۶۱-۷۵.
- [۴۸] محمد حسین شمس، مجید شهابی، "زمانبندی بهره برداری بهینه از ریزشبه‌ها در حضور هاب‌های انرژی متصل به هم با در نظر گرفتن قیود امنیت سیستم انرژی و مشارکت بارهای پاسخگو"، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، دوره ۴۷، شماره ۴، زمستان ۱۳۹۶، صفحه ۱۵۲۳-۱۵۳۵.
- [49] A. Karimi, F. Aminifar, A. Fereidunian, and H. Lesani, "Energy storage allocation in wind integrated distribution networks: An MILP-Based approach", *Renewable Energy*, Vol. 134, April 2019, pp.1042-1055.
- [50] M. Nozarian, A. H. Nikoofard, and A. Fereidunian, "Efficient MILP formulations for AC optimal power flow to reduce computational effort", *International Transactions on Electrical Energy Systems*, Vol. 30, No. 8, August 2020, p.e12434.
- [51] M. E. Baran, and F. F. Wu, "Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing", *IEEE Transactions on Power delivery*, Vol. 4, No. 2, April 1989, pp.1401-1407.
- [52] Generalized Algebraic Modeling Systems (GAMS). <<http://www.gams.com>>.
- [53] L. C. Coelho, "Linearization of the product of two variables", jan 2016, <http://www.leandro-coelho.com/linearization-product-variables/2017-01-20/>.