	Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology Vol. 15/ No. 57/ Spring 2024 P-ISSN: 2322-3871, E-ISSN: 2345-5594, http://jipet.iaun.ac.ir/
---	---

<https://dorl.net/dor/20.1001.1.23223871.1403.15.57.2.1>
Research Article

Joint Optimization of Integrated Energy Systems in the Presence of Renewable Energy Sources, Power-to-Gas Systems and Energy Storage

Mahroo Sattar¹, *Ph.D. Student*, Mahmoud Samiei Moghaddam², *Assistant Professor*, Azita Azarfar¹, *Assistant Professor*, Nasrin Salehi³, *Associated Professor*, Mojtaba Vahedi¹, *Assistant Professor*

¹Department of Electrical Engineering- Shahrood Branch, Islamic Azad University, Shahrood, Iran

²Department of Electrical Engineering- Damghan Branch, Islamic Azad University, Damghan, Iran

³Department of Basic Sciences- Shahrood Branch, Islamic Azad University, Shahrood, Iran
satar.m56@yahoo.com, samiei352@yahoo.com, azita.azarfar@gmail.com, vahedi.mojtaba@gmail.com, salehi9002@gmail.com

Abstract

Due to the high penetration of renewable energy resources and the direct impact on the power system, the issue of energy management has received more attention than researchers. Power-to-gas (P2G) system causes the surplus electricity generated from renewable energy resources in the network to be converted to gas and sold to the gas network, so energy management and profitability are a matter of particular importance, considering the two grids as a joint optimization of integrated energy systems. This paper presents a scenario-based stochastic mixed-integer linear programming (MILP) model to optimize integrated gas and electricity integrated systems considering natural gas distributed generation resources, P2G systems, energy storage systems, and electric vehicles. It aims to reduce the cost of purchasing energy and cut off the power of renewable energy resources. The 33-bus power distribution network and the 7-node natural gas network are considered for the analysis of the proposed model, and the proposed model is solved using the powerful Gurobi solver, considering various cases. The results of different cases show the performance of the proposed model.

Keywords: battery, integrated energy systems, mixed integer linear model, optimization, power-to-gas system

Received: 15 May 2022

Revised: 9 June 2022

Accepted: 28 July 2022

Corresponding Author: Dr. Mahmoud Samiei Moghaddam

Citation: M. Sattar, M. Samiei-Moghaddam, A. Azarfar, N. Salehi, M. Vahedi, "Joint optimization of integrated energy systems in the presence of renewable energy sources, power-to-gas systems and energy storage", Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology, vol. 15, no. 57, pp. 15-30, June 2024 (in Persian).

<https://dorl.net/dor/20.1001.1.23223871.1403.15.57.2.1>

مقاله پژوهشی

بهینه‌سازی مشترک سیستم‌های انرژی یکپارچه در حضور منابع انرژی تجدیدپذیر، سیستم‌های تبدیل توان به گاز و سیستم ذخیره‌سازی انرژی

مهرو ستار^۱، دانشجوی دکتری، محمود سمیعی مقدم^۲، استادیار، آزیتا آذرفر^۱، استادیار، نسرین صالحی^۳، دانشیار، مجتبی واحدی^۱، استادیار

۱- دانشکده مهندسی برق- واحد شاهرود، دانشگاه آزاد اسلامی، شاهرود، ایران

۲- دانشکده مهندسی برق- واحد دامغان، دانشگاه آزاد اسلامی، دامغان، ایران

۳- دانشکده علوم پایه- واحد شاهرود، دانشگاه آزاد اسلامی، شاهرود، ایران

satar.m56@yahoo.com, samiei352@yahoo.com, azita.azarfar@gmail.com, vahedi.mojtaba@gmail.com, salehi9002@gmail.com

چکیده: با توجه به نفوذ بالای منابع انرژی تجدیدپذیر و تاثیر مستقیم بر روی توان شبکه، مسئله مدیریت انرژی بیش از پیش مورد توجه محققان قرار گرفته است. سیستم تبدیل توان به گاز سبب می‌شود که برق مازاد تولید شده از منابع انرژی تجدیدپذیر موجود در شبکه به گاز تبدیل و به شبکه گاز فروخته شود، در همین راستا نیز منابع تولیدپراکنده گازسوز و سیستم‌های توان به گاز سبب تعامل دو شبکه برق و گاز خواهد شد، بنابراین مدیریت انرژی و کسب سود با در نظر گرفتن این دو شبکه به‌عنوان بهینه‌سازی مشترک سیستم‌های انرژی یکپارچه، موضوعی است که از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در این مقاله یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط (MILP) تصادفی مبتنی بر سناریو به‌منظور بهینه‌سازی سیستم یکپارچه برق و گاز طبیعی با در نظر گرفتن منابع تولید پراکنده گازسوز، سیستم‌های توان به گاز، سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی و خودروهای برقی با هدف کاهش هزینه خرید انرژی و قطع توان منابع انرژی تجدیدپذیر ارائه شده است. شبکه توزیع برق ۳۳ شینه و شبکه گاز طبیعی ۷ گرهی برای تحلیل مدل پیشنهادی در نظر گرفته شده و مدل پیشنهادی با استفاده از حل‌کننده قدرتمند گروبی با در نظر گرفتن سناریوهای مختلف حل شده است. نتایج سناریوهای مختلف کارایی مدل پیشنهادی را نشان می‌دهد.

کلمات کلیدی: باتری، بهینه‌سازی، سیستم توان به گاز، سیستم‌های یکپارچه انرژی، مدل خطی باینری

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۱/۲/۲۵

تاریخ بازنگری مقاله: ۱۴۰۱/۳/۱۹

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۵/۶

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر محمود سمیعی مقدم

نشانی نویسنده‌ی مسئول: دامغان- بلوار چشمه علی- دانشگاه آزاد اسلامی واحد دامغان- دانشکده مهندسی برق

۱- مقدمه

نصب منابع انرژی تجدیدپذیر، سیستم‌های توان به گاز^۱ و سیستم‌های ذخیره انرژی فرصتی برای تسریع کربن‌زدایی در سیستم‌های قدرت است [۱]. استفاده از واحدهای تولیدپراکنده گاز طبیعی برای متعادل کردن تنوع سیستم‌های تولید تولیدپراکنده تجدیدپذیر و سیستم ذخیره‌سازی انرژی^۲ ممکن است باعث نوسانات‌هایی در تقاضای گاز طبیعی شود که منجر به خطراتی برای سیستم گاز طبیعی در بهره‌برداری واقعی می‌شود. به این ترتیب هماهنگی شبکه گاز و برق به‌عنوان یک سیستم یکپارچه در هر زمان بسیار مطلوب است [۲]. یک سیستم یکپارچه انرژی برق-گاز زمینه را برای بهبود بهره‌وری انرژی، افزایش استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر و ایجاد یک سیستم انرژی پایدار و کم‌کربن فراهم می‌کند [۳]. در مرجع [۴] یک برنامه‌ریزی بهینه استفاده از توان در شبکه هوشمند ادغام شده با منابع انرژی تجدیدپذیر برای مدیریت انرژی برای کاهش هزینه صورت‌حساب، نسبت پیک بار به میانگین و انتشار کربن پیشنهاد شده است. در مرجع [۵] یک پخش بهینه گاز با عدم قطعیت در تولید برق بادی برای به حداقل رساندن کل هزینه‌های سیستم یکپارچه گاز/الکتریکی پیشنهاد شده است. در مرجع [۶] یک چارچوب بهینه‌سازی غیرمتمرکز پیشنهاد شده که فن‌آوری‌های باد و سیستم توان به گاز را برای کاهش هزینه‌های بهره‌برداری کل سیستم برق و گاز طبیعی چند ناحیه‌ای در نظر می‌گیرد. در مرجع [۷] یک استراتژی پخش بار اقتصادی زیست محیطی برای یک سیستم اتصال برق-گاز با در نظر گرفتن انتشار مکانی-زمانی آلاینده‌های هوا و توان به گاز در مناطق ساحلی پیشنهاد شده است. نویسندگان در مرجع [۸] یک استراتژی مناقصه هماهنگ مبتنی بر برنامه‌ریزی تصادفی را برای بهینه‌سازی سود مزارع بادی و تأسیسات توان به گاز با استفاده از رویکرد بازی مشارکتی پیشنهاد کرده‌اند. در مرجع [۹] یک بهینه‌سازی استراتژی زمان‌بندی کربن‌زدایی برای سیستم‌های برق-گاز با در نظر گرفتن وسایل نقلیه الکتریکی و یک مدل بازار توان و گاز پیشنهاد شده است. در مرجع [۱۰] یک تئوری تصمیم‌گیری شکاف اطلاعات ترکیبی-مسئله بهینه‌سازی تصادفی برای ادغام شبکه‌های گاز طبیعی و برق برای به حداقل رساندن هزینه کل بهره‌برداری با نفوذ انرژی باد ارائه شده است. در مرجع [۱۱] یک مدل‌سازی یکپارچه و استفاده پیشرفته از توان به آمونیاک برای سیستم‌های چند انرژی با نفوذ انرژی تجدیدپذیر بالا در یک ریزشبکه مستقل در یک دوره برنامه‌ریزی ۲۴ ساعته پیشنهاد شده است. مرجع [۱۲] یک برنامه بهینه‌سازی روز آینده را برای یک سیستم انرژی یکپارچه گاز-برق با در نظر گرفتن جریان انرژی دو جهته بر اساس برنامه‌ریزی مخروطی مرتبه دوم برای به حداقل رساندن هزینه بهره‌برداری روز آینده سیستم انرژی یکپارچه پیشنهاد کرده است. در مرجع [۱۳] یک مدل به اشتراک‌گذاری انرژی در قالب‌های هیدروژن و الکتریسیته در کنار دستگاه‌های توان به گاز تجمیع‌کننده برای به حداکثر رساندن کل رفاه اجتماعی پیشنهاد شده است. در مرجع [۱۴] 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. به دلیل استقرار گسترده واحدهای گازسوز و فناوری‌های نوظهور توان به گاز، وابستگی متقابل بین شبکه‌های برق و شبکه‌های گاز افزایش یافته است. در مرجع [۱۵] یک مسئله ارزیابی قابلیت پذیرش تولید باد را با توجه به سیستم‌های گاز الکتریکی یکپارچه بر اساس تقریب مبتنی بر برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط^۳ (MILP) برای به حداقل رساندن تلفات تولید باد برای سیستم‌های یکپارچه گاز الکتریکی مورد بازبینی قرار داده است. در مرجع [۱۶]، انعطاف‌پذیری سیستم انرژی یکپارچه با تجزیه و تحلیل ویژگی‌های اساسی منابع انعطاف‌پذیر سیستم و ارائه ساختار اساسی سیستم انرژی یکپارچه بررسی شده است. در مرجع [۱۷] ارزش شرطی در روش بهینه‌سازی بهره‌برداری مبتنی بر ریسک برای سیستم انرژی یکپارچه برای مشخص کردن برنامه‌های عملیاتی تحت اولویت‌های ریسک مختلف پیشنهاد شده است. در مرجع [۱۸] یک روش یکپارچه برای بهینه‌سازی عملکرد سیستم انرژی بر اساس یک بازی مشارکتی پیشنهاد شده که می‌تواند به‌طور موثر هزینه‌های انرژی و انتشار کربن سیستم را کاهش دهد و موضوع‌های مختلف را برای مشارکت در بهره‌برداری هماهنگ سیستم ترغیب کند. مرجع [۱۹] یک رویکرد جدید نظریه تصمیم‌گیری شکاف اطلاعاتی و برنامه‌ریزی تصادفی یکپارچه را پیشنهاد کرده که می‌تواند عدم قطعیت‌های متعدد را در بهینه‌سازی عملیات و برنامه‌ریزی یک سیستم انرژی یکپارچه مدیریت کند. مرجع [۲۰] یک سیستم یکپارچه توسعه یافته را ارائه می‌دهد که محصولات مختلفی از جمله الکتریسیته، خنک‌کننده فضا، آب شیرین و بی‌کربنات آمونیوم^۴ را تولید می‌کند، این سیستم یکپارچه با استفاده از بررسی فرااقتصادی و ساخت روش چندهدفه بهینه‌الگوریتم‌های ژنتیک به‌منظور

افزایش ترمودینامیکی مورد مطالعه قرار گرفته است. در مرجع [۲۱] یک رویکرد بهینه‌سازی سلسله مراتبی برای شبیه‌سازی دینامیکی محیط حرارتی ساختمان و برنامه‌ریزی یکپارچه سیستم‌های انرژی با همکاری عرضه و تقاضا پیشنهاد شده است. در مرجع [۲۲] مدیریت هوشمند سیستم‌های انرژی یکپارچه از طریق بهینه‌سازی مشترک با افق‌های بلند و کوتاه-مدت ارائه شده تا کنترل بلادرنگ سیستم^۵ را با ارزیابی‌های بلند-مدت افزایش دهند. در مرجع [۲۳] یک برنامه مدیریت انرژی دو مرحله‌ای برای سیستم گرما-الکتریسیته یکپارچه با در نظر گرفتن قیمت‌گذاری پویا بازی رقابت استاکلبرگ^۶ و بهینه‌سازی استراتژی عملیات پیشنهاد شده است. در مرجع [۲۴] یک پیش‌بینی بار چند انرژی با افق کوتاه مدت برای سیستم‌های انرژی یکپارچه بر اساس شبکه عصبی بهینه‌شده ارائه شده است. در مرجع [۲۵] ارائه یک مدل بهینه‌سازی چندهدفه جامع برای مدیریت بهینه انرژی در سیستم‌های چند انرژی محلی در حضور خودروهای برقی مدنظر قرار گرفته شده که به دنبال به حداکثر رساندن سود اپراتورهای چند انرژی محلی و به حداقل رساندن دی اکسید کربن^۷ است. در مرجع [۲۶] یک مدل تصادفی برای حل مسئله مدیریت انرژی در شبکه‌های برق و گاز جفت شده با استفاده از سیستم‌های توان به گاز، تولیدات پراکنده گاز-سوز ارائه شده است. در مرجع [۲۷] یک مدل خطی عدد صحیح مختلط به‌منظور بهینه‌سازی شبکه‌های برق-گاز جفت شده با در نظر گرفتن یک تابع چند-هدفه و سیستم‌های توان به گاز و منابع انرژی تجدیدپذیر ارائه شده است. در مرجع [۲۸] یک مدل تصمیم‌گیری تصادفی مبتنی بر سناریو برای تعیین استراتژی بهینه بهره‌برداری از واحدهای یکپارچه تولید گاز طبیعی^۸ و تأسیسات تبدیل توان به گاز در بازارهای انرژی با هدف افزایش بازدهی شبکه پیشنهاد شده است. در مرجع [۲۹] یک روش برای تجزیه و تحلیل فرآیندهای مختلف سیستم توان به گاز و ارزیابی اثرات عملیاتی آن‌ها بر شبکه‌های انتقال برق و گاز معرفی شده که مدل یکپارچه پیشنهاد شده در این مرجع به‌طور خاص برای شبیه‌سازی وابستگی‌های عملیاتی بین دو شبکه با در نظر گرفتن سیستم توان به گاز انجام شده است. در مرجع [۳۰] یک چارچوب پخش بار احتمالی برای سیستم‌های الکتریکی و گازی یکپارچه با در نظر گرفتن ژنراتورهای گازسوز، کمپرسورهای الکتریکی و هاب‌های انرژی یکپارچه^۹ با واحدهای توان به گاز و توربین‌های بادی پیشنهاد شده است. در مرجع [۳۱] یک مدل دو مرحله‌ای برای مدیریت انرژی در شبکه توزیع پیشنهاد شده که مرحله اول آن مربوط به مدیریت انرژی منازل در شرایط حضور یا غیاب برنامه پاسخ‌گویی بار با در نظرگیری سلیقه‌های شخصی مشترکین است، سپس بر اساس اطلاعات ارسالی از این مشترکین و تعیین نمایه بار مسکونی شبکه، بهره‌برداران پارکینگ شارژ خودروی برقی با توجه به محدودیت خود اقدام به مدیریت خودروی برقی می‌کند تا هم هزینه‌های شارژ و هم پارامترهای بهره‌برداری شبکه بهبود یابد. در مرجع [۳۲] یک مدل مدیریت انرژی جامع برای بهره‌برداری از یک سیستم توزیع ۳۳ شینه شعاعی اصلاح شده با در نظر گرفتن خانه‌های هوشمند ارائه شده که مشترکین خانه‌های هوشمند قادر به مشارکت در یک برنامه پاسخ‌گویی بار بوده و شاخص رفاه مشترکین به‌عنوان یک قید اصلی در نظر گرفته شده است. در مرجع [۳۳] مدلی برای برنامه‌های پاسخ‌گویی بار، ذخیره‌سازها، منابع تولید پراکنده همزمان برق و حرارت، منابع تجدیدپذیر واحدهای بادی و فتوولتاییک^{۱۰} (PV) و بازآرایی فیدرهای ریزشبهه برای مدیریت انرژی در ریزشبهه با اهدافی نظیر کاهش هزینه‌های بهره‌برداری، کاهش آلودگی‌های زیست-محیطی و بهبود شاخص‌های فنی نظیر کاهش تلفات توان حقیقی پیشنهاد شده است. برای درک بهتر نوآوری و جدید بودن این مطالعه نسبت به مقاله‌های مشابه جدول طبقه‌بندی (۱) مانند روش‌های برنامه‌ریزی مخروطی مرتبه دوم^{۱۱} (SOCP)، برنامه‌ریزی غیرخطی^{۱۲} (NLP)، بهینه‌سازی مقاوم^{۱۳} (RO) و برنامه‌ریزی مخروطی مرتبه دوم عدد صحیح مختلط^{۱۴} (MISOCP) به‌منظور مقایسه ارائه شده است. مشاهده می‌شود که هر یک از تحقیقات انجام شده مطابق جدول (۱) دارای نواقص در مدل‌سازی است که در این مطالعه سعی شده است به آن پرداخته و برطرف گردد. همچنین مدل پیشنهادی این مطالعه یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط است، که جواب‌های بهینه مطلق را تضمین می‌نماید. همان‌طور که مشاهده شد، موضوع بهینه‌سازی سیستم‌های یکپارچه انرژی امروزه مورد توجه محققان قرار گرفته است. در این مقاله، یک مدل خطی باینری برای حل مدیریت انرژی یکپارچه شبکه‌های برق/گاز در حضور انرژی‌های تجدیدپذیر، ذخیره‌سازی و دستگاه‌های توان به گاز به همراه خودروهای برقی پیشنهاد شده است. نوآوری‌های مقاله را می‌توان به‌صورت خلاصه به شرح زیر بیان کرد:

۱- ارائه تأثیر مدل‌سازی سیستم ذخیره‌سازی انرژی، سیستم توان به گاز، منابع تولید پراکنده گازسوز^{۱۵} و خودروهای برقی بر شبکه توزیع برق و گاز.

Table (1): Comparison between the proposed model with similar papers
جدول (۱): مقایسه بین مدل پیشنهادی با مقالات مشابه

مرجع	سیستم تبدیل توان به گاز	منابع تولید پراکنده گازی	مدل شبکه گاز	مدل شبکه برق	تابع چند-هدفه	مدل تصادفی	منابع تجدیدپذیر	باتری	خودرو برقی	نوع مدل
مدل پیشنهادی	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	MILP
[۱]	✓	-	✓	✓	✓	-	✓	-	-	SOCP
[۲]	✓	-	✓	✓	-	-	✓	✓	✓	LP
[۳]	✓	✓	✓	✓	✓	-	✓	✓	-	RO
[۴]	✓	✓	✓	✓	-	-	✓	-	-	NLP
[۵]	-	✓	✓	✓	✓	-	✓	✓	✓	NLP
[۶]	-	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	-	MISOCP
[۷]	-	✓	✓	✓	-	✓	✓	✓	-	MILP
[۸]	-	✓	✓	✓	✓	-	-	✓	-	NLP
[۹]	-	✓	-	-	✓	-	✓	✓	-	MILP
[۱۰]	✓	✓	✓	✓	✓	-	✓	-	✓	MISOCP
[۱۱]	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	-	-	MINLP
[۱۲]	-	✓	-	-	✓	-	-	✓	✓	NLP
[۱۳]	-	✓	✓	✓	✓	-	✓	-	-	NLP
[۱۴]	✓	-	✓	✓	-	✓	✓	-	-	MILP
[۱۵]	✓	✓	✓	✓	✓	-	-	✓	-	NLP
[۱۶]	✓	-	✓	✓	✓	-	✓	-	✓	SOCP
[۱۷]	-	✓	✓	✓	✓	✓	✓	-	-	MILP
[۱۸]	-	✓	✓	✓	✓	-	-	-	-	LP
[۱۹]	✓	✓	✓	✓	✓	-	✓	-	-	MINLP
[۲۰]	-	✓	✓	✓	✓	-	✓	-	-	NLP
[۲۱]	✓	-	✓	✓	-	✓	✓	-	-	MILP
[۲۲]	-	✓	✓	✓	✓	-	✓	✓	-	MINLP
[۲۳]	-	✓	✓	✓	✓	-	✓	✓	-	MINLP
[۲۴]	✓	-	✓	✓	✓	-	✓	-	✓	MILP
[۲۵]	✓	✓	✓	✓	✓	-	✓	✓	-	MINLP
[۲۶]	✓	✓	✓	✓	-	✓	✓	✓	-	MINLP
[۲۷]	✓	✓	✓	✓	✓	-	✓	✓	-	MILP
[۲۸]	✓	✓	✓	✓	✓	✓	-	-	-	MILP
[۲۹]	✓	✓	✓	✓	-	✓	✓	✓	-	MINLP
[۳۰]	✓	✓	✓	✓	-	✓	✓	✓	-	MINLP
[۳۱]	-	-	-	-	✓	-	-	-	-	MILP
[۳۲]	-	-	✓	✓	✓	✓	-	-	-	MILP
[۳۳]	-	✓	✓	-	✓	✓	-	✓	-	MINLP

- ۲- ارائه یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح به منظور بهره‌برداری یکپارچه شبکه‌های توزیع برق و گاز.
 ۳- ارائه مدل تصادفی منابع تجدیدپذیر، هزینه انرژی و خودروهای برقی به صورت روش مبتنی بر سناریو.
 ۴- مدل‌سازی بار دینامیکی ۲۴ ساعته شبکه توزیع برق استاندارد ۳۳ شینه IEEE و شبکه توزیع گاز ۷ گره.

ساختار مقاله در ادامه به این شرح است. در بخش دوم مدل بهینه‌سازی پیشنهادی ارائه می‌شود. در بخش سوم شبکه آزمایشی مورد نظر ارائه شده و نتایج شبیه‌سازی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته‌اند. در بخش نهایی نتیجه‌گیری بیان شده است.

۲- مدل‌سازی

مدل بهینه‌سازی پیشنهادی بر اساس مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیحی مختلط در این بخش ارائه شده است. تابع هدف این مطالعه کاهش هزینه‌های بهره‌برداری شبکه برق و گاز است که به صورت معادله (۱) تعریف می‌شود. در این راستا تابع هدف از سه بخش تشکیل شده است. بخش اول شامل ضریب جریمه توان استفاده نشده از منابع تولیدپراکنده تجدیدپذیر است، قسمت دوم هزینه خرید توان از پست برق را نشان می‌دهد و قسمت آخر شامل هزینه خرید گاز چاه گاز است. تعاریف پارامترهای مرتبط با مدل پیشنهادی در جدول (۲) نشان داده شده است.

$$\min \sum_{s \in N_s} \Omega_s \left(\sum_{t=1}^{N_t} \sum_{i=1}^{N_e} \left(c^r (p_{t,i,s}^r - \hat{p}_{t,i}^r) + c^{ev} (p_{t,i,s}^{ev} - \hat{p}_{t,i}^{ev}) \right) + \lambda_{t,s}^e p_t + \lambda_{t,s}^g g_t \right) \quad (1)$$

در این رابطه t نشان‌دهنده شاخص زمانی است که در این مطالعه یک ساعت در نظر گرفته شده است، i و z نمایانگر شاخص باس شبکه برق و n و m نمایانگر شاخص گره شبکه گاز است. بخش اول تابع هدف هزینه مربوط به ضریب جریمه برای توان استفاده نشده از منابع تجدیدپذیر و خودروهای برقی است. پارامترهای مدل‌سازی در جدول (۲) معرفی شده‌اند. رابطه‌های زیر باید بین توان منابع انرژی تجدیدپذیر و توان شارژ خودروهای برقی برقرار باشند:

$$\begin{cases} \hat{P}_{t,i}^r \geq 0 & \hat{P}_{t,i}^{ev} \geq 0 \\ \hat{P}_{t,i}^r \leq P_{t,i,s}^r & \hat{P}_{t,i}^{ev} \leq P_{t,i,s}^{ev} \end{cases} \quad (2)$$

سیستم ذخیره انرژی طراحی شده برای افزایش انعطاف‌پذیری شبکه در این مقاله با معادله‌های (۳) تا (۸) مدل شده است. محدودیت (۳) رابطه منطقی بین حالت‌های شارژ و دشارژ را بیان می‌کند. به عبارت دیگر باتری نمی‌تواند در هر دو حالت شارژ و دشارژ به‌طور همزمان کار کند. توان شارژ و دشارژ توسط باتری به حداقل و حداکثر مقادیر نشان داده شده با رابطه‌های (۴) و (۵) محدود می‌شود. معادله (۶) انرژی موجود در باتری را در زمان‌های مختلف نشان می‌دهد. مقدار انرژی با مقادیر حداکثر و حداقل که در (۷) نشان داده شده است، محدود می‌شود. قید (۸) شرایط برابری حالت‌های اولیه ($t=0$) و نهایی ($t=24$) را تعیین می‌کند.

$$u_{t,i}^{dis} + u_{t,i}^{ch} \leq 1 \quad (3)$$

$$p_i^{dis,min} u_{t,i}^{dis} \leq p_{t,i}^{dis} \leq p_i^{dis,max} u_{t,i}^{dis} \quad (4)$$

$$p_i^{ch,min} u_{t,i}^{ch} \leq p_{t,i}^{ch} \leq p_i^{ch,max} u_{t,i}^{ch} \quad (5)$$

$$e_{t,i} = e_{t-1,i} + \eta^{ch} p_{t,i}^{ch} - \frac{p_{t,i}^{dis}}{\eta^{dis}} \quad (6)$$

$$e_i^{min} \leq e_{t,i} \leq e_i^{max} \quad (7)$$

$$e_{t=0} = e_{t=24} \quad (8)$$

با تبدیل توان به گاز طبیعی، فناوری سیستم توان به گاز می‌تواند آن را ذخیره و تزریق کند و مصرف گاز طبیعی از جمله بارهای شبکه گاز را تامین کند. معادله (۹) قابلیت تبدیل فناوری سیستم توان به گاز را در باس i از شبکه برق متصل به گره n شبکه گاز در زمان t نشان می‌دهد. ظرفیت فعلی گاز طبیعی سیستم توان به گاز از رابطه (۱۰) محاسبه می‌شود. مقدار توان تبدیل شده توسط فناوری سیستم توان به گاز به رابطه (۱۱) محدود شده و همچنین مقدار گاز طبیعی ذخیره شده به حداقل و حداکثر رابطه (۱۲) محدود می‌شود. در نهایت محدودیت رابطه (۱۳) شرط برابری حالت‌های اولیه ($t=0$) و نهایی ($t=24$) را برای P2G محاسبه می‌کند.

$$g_{t,n}^{ch} = \eta_{P2G} p_{t,i}^{P2G} \quad (9)$$

$$s_{t,n} = s_{t-1,n} + g_{t,n}^{ch} - g_{t,n}^{dis} \quad (10)$$

Table (2): Parametrs and variables of the model

جدول (۲): پارامتر و متغیرهای مدل سازی

نماد	پارامتر	نماد	پارامتر
Nt	مجموعه زمانی	$\lambda_{t,s}^e$	قیمت برق
Ne	مجموعه باس‌های شبکه برق	p_t	توان حقیقی خریداری شده
Ng	مجموعه گره‌های شبکه گاز	$\lambda_{t,s}^g$	هزینه گاز طبیعی
c^r	ضریب جریمه واحد تجدیدپذیر	g_t	گاز طبیعی خریداری شده
c^{ev}	ضریب جریمه واحد خودرودهای برق	$u_{t,i}^{dis}$	متغیر باینری دشارژ
$p_{t,i,s}^f$	تولید واقعی منبع تجدیدپذیر	$u_{t,i}^{ch}$	متغیر باینری شارژ
$\hat{p}_{t,i}^{ev}$	توان شارژ مورد نیاز خودرودهای برقی	$p_i^{dis,min}$	حداقل توان تخلیه باتری
$\hat{p}_{t,i}^f$	توان مورد بهره‌برداری قرار گرفته از منبع تجدیدپذیر	$p_i^{dis,max}$	حداکثر توان تخلیه باتری
$p_{t,i}^{ev}$	توان شارژ لحاظ شده برای خودرودهای برقی	$p_{t,i}^{dis}$	توان دشارژ باتری
Ω_s	احتمال در نظر گرفته شده برای هر سناریو	$p_i^{ch,min}$	حداقل توان شارژ باتری
Ns	مجموعه سناریوها	g_t	گاز طبیعی خریداری شده
df	تعداد تکه‌ها در خطی سازی	g^{min}, g^{max}	حداقل و حداکثر مقدار گاز در چاه گازی
$h_{nm}^{min}, h_{nm}^{max}$	حداقل و حداکثر شار فلولی خط لوله گاز	$g_n^{dis,min}, g_n^{dis,max}$	حداقل و حداکثر مقدار گاز تزریق شده با P2G
$p_i^{ch,max}$	حداکثر توان شارژ باتری	$g_{t,n}^1$	بار گاز طبیعی
$p_{t,i}^{ch}$	توان شارژ باتری	ρ_n	ضریب تبدیل ثابت توان الکتریکی به گاز
$e_{t,i}$	انرژی باتری	$\psi_{n,i}^2, \psi_{n,i}^1$	فشار در ابتدا و انتهای خط لوله گاز
e_i^{min}	حداقل ظرفیت انرژی باتری	α_{nm}	پارامترهای فیزیکی هر خط لوله
η^{ch}	راندمان شارژ	$\psi_n^{min}, \psi_n^{max}$	حداقل و حداکثر فشار گره گازی
η^{dis}	راندمان دشارژ	mf_z	برابر با شیب خط
$g_{t,n}^{ch}$	تولید گاز توسط P2G	NFZ _{t,nm,z}	خط تقریب زده شده در خطی سازی
η_{P2G}	بازده P2G	p_i	توان واقعی خریداری شده از بازار برق
$p_{t,i}^{P2G}$	ورودی توان الکتریکی به P2G	$d_{t,i}^p, d_{t,i}^q$	بار اکتیو و بار راکتیو
$s_{t,n}$	ظرفیت ذخیره P2G	$p_{t,i}^{DG}$	تولید توان واقعی DG گازی
$g_{t,n}^{dis}$	مقدار تزریق گاز توسط P2G	$p_{t,ij}$	شار توان اکتیو در خط ij
$p_i^{P2G,max}$	حداکثر توان الکتریکی مصرف شده توسط P2G	q_i	توان راکتیو پست
s_n^{min}, s_n^{max}	حداقل و حداکثر ظرفیت ذخیره گاز P2G	$p_{ij}^{max}, q_{ij}^{max}$	حداکثر شار توان حقیقی و راکتیو عبوری از خط ij
e_i^{max}	حداکثر ظرفیت انرژی باتری	$q_{t,i}^{DG}$	توان راکتیو تزریق شده توسط DG‌های گازسوز
U_i^{min}, U_i^{max}	حداقل و حداکثر ولتاژ باس	$q_{t,ij}$	شار توان راکتیو در خط ij
$\gamma_{t,nm,z}$	عیین موقعیت هر قطعه در همان خط	$U_{t,i}$	ولتاژ مربعی باس
h_{nm}, h_{lmn}	جریان گاز از خط لوله nm و از خط لوله mn	r_{ij}, x_{ij}	امپدانس و راکتانس خط ij

$$0 \leq p_{t,i}^{P2G} \leq p_i^{P2G,max} \quad (11)$$

$$s_n^{min} \leq s_{t,n} \leq s_n^{max} \quad (12)$$

$$S_{t=0} = S_{t=24} \tag{۱۳}$$

تعادل توان اکتیو و راکتیو تولید شده در شبکه توزیع باید همیشه برابر با بار در هر باس باشد که به صورت معادلات (۱۴) و (۱۵) مدل شده است.

$$P_t - P_{t,i}^{ch} - P_{t,i}^{P2G} + P_{t,i}^{dis} - d_{t,i}^p + P_{t,i}^{DG} + \hat{P}_{t,i}^r - \hat{P}_{t,i}^{ev} = \sum_{i \in Ne(j)} P_{t,ij} - \sum_{i \in Ne(j)} P_{t,ji} \tag{۱۴}$$

$$Q_t - d_{t,i}^q + Q_{t,i}^{DG} = \sum_{i \in Ne(j)} Q_{t,ij} - \sum_{i \in Ne(j)} Q_{t,ji} \tag{۱۵}$$

در رابطه (۱۶) تعریف ولتاژ باس نام شبکه توزیع در زمان t را نشان داده شده است. معادله (۱۷) قید ولتاژ باس نام در زمان t شبکه توزیع را نشان می‌دهد. معادله (۱۸) حداکثر شار توان اکتیو و راکتیو عبوری از خط ij را تضمین می‌کند.

$$U_{t,i+1} = U_{t,i} - 2(r_{ij}P_{t,ij} + x_{ij}Q_{t,ij}) \tag{۱۶}$$

$$U_i^{min} \leq U_{t,i} \leq U_i^{max} \tag{۱۷}$$

$$P_{t,ij} \leq P_{ij}^{max}, Q_{t,ij} \leq Q_{ij}^{max} \tag{۱۸}$$

رابطه (۱۹) قید تعادل گاز طبیعی در شبکه گاز را نشان می‌دهد. رابطه (۲۰) حداقل و حداکثر گاز تزریق شده توسط P2G را نشان می‌دهد. رابطه (۲۱) حداقل و حداکثر فلوی عبوری خط لوله گاز را نشان می‌دهد و رابطه (۲۲) حداقل و حداکثر بهره‌برداری از چاه گاز را نشان می‌دهد. رابطه (۲۳) فلوی گاز قابل انتقال از خط لوله را بسته به فشار در ابتدا و انتهای هر خط لوله نشان می‌دهد. در نهایت رابطه (۲۴) فشار حداقلی و حداکثری هر گره گازی را نشان می‌دهد.

$$g_t + g_{t,n}^{dis} - g_{t,n}^1 - \sum_{n \in Ng} (P_{t,n}^{DG} \rho_n) = \sum_{nm \in Ng(m)} h_{t,nm} - \sum_{nm \in Ng(m)} h_{t,mm} \tag{۱۹}$$

$$g_n^{dis,min} \leq g_{t,n}^{dis} \leq g_n^{dis,max} \tag{۲۰}$$

$$h_{nm}^{min} \leq h_{t,nm} \leq h_{nm}^{max} \tag{۲۱}$$

$$g^{min} \leq g_t \leq g^{max} \tag{۲۲}$$

$$h_{t,nm}^2 = \alpha_{nm} [\psi_{n,t}^2 - \psi_{m,t}^2] \tag{۲۳}$$

$$\psi_n^{min} \leq \psi_{n,t} \leq \psi_n^{max} \tag{۲۴}$$

همان‌طور که مشاهده می‌شود، توان دوم در معادله (۲۳) باعث غیرخطی بودن مسئله می‌شود. بنابراین باید رابطه (۲۳) را به رابطه خطی تبدیل کرد، در نتیجه دو متغیر جریان گاز و فشار گره گاز درجه دوم و غیرخطی هستند که باید خطی شوند. ابتدا با توجه به اینکه متغیر فشار گره گاز در هیچ‌جای مسئله بجز در معادلات (۲۳) و (۲۴) استفاده نشده است، در نتیجه با یک تغییر متغیر ساده می‌توان این متغیر را به خطی تبدیل نمود، بنابراین رابطه‌های زیر برقرار خواهد بود:

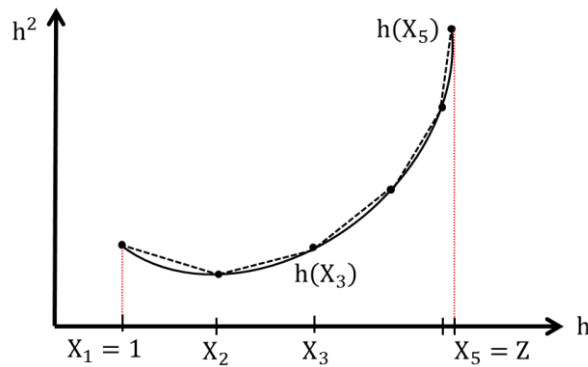
$$\psi_{n,t}^2 = \kappa_{n,t} \tag{۲۵}$$

$$h_{t,nm}^2 = \alpha_{nm} [\kappa_{n,t} - \kappa_{m,t}] \tag{۲۶}$$

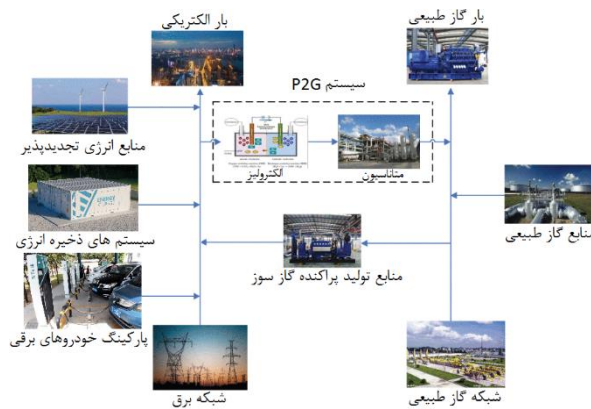
$$(\psi_n^{min})^2 \leq \kappa_{n,t} \leq (\psi_n^{max})^2 \tag{۲۷}$$

در نتیجه مطابق رابطه (۲۵) با تغییر متغیر، فشار گره گاز به راحتی خطی شد و معادله‌های (۲۳) و (۲۴) را مطابق یک متغیر جدید بازنویسی شده که معادله‌های (۲۶) و (۲۷) نامیده می‌شود. اکنون فقط قسمت غیرخطی معادله (۲۶) مربوط به توان دوم جریان خط لوله گاز است که باید با روش خطی تکه تکه‌ای^{۱۶} به مجموعه‌ای از جملات خطی به صورت معادله خطی تبدیل شود. شکل (۱) را در نظر بگیرید. در این شکل منحنی سهمی را به صورت مجموعه‌ای از جملات خطی با استفاده از روش تکه‌ای به صورت خطی تقریب زده شده است. به عنوان مثال، شکل با ۵ خط راست تقریب شده است. نکته قابل توجه در این روش این است که هرچه خطوط یا تکه بیشتری در نظر گرفته شود به تقریب دقیق‌تری خواهیم رسید. با توجه به آنچه بیان شد، بر اساس رابطه (۲۸) می‌توان متغیر جریان توان دوم خط گاز را به صورت ۵ مجموعه جمله خطی در شیب آن خط به دست آورد.

$$h_{t,nm}^2 = \sum_{z=1}^{10} [NFZ_{t,nm,z} mf_z] \tag{۲۸}$$



شکل (۱): خطی‌سازی یک تابع درجه دوم با تقریب خطی با استفاده از روش مجموعه جملات خطی
Figure (1): Linearization of a quadratic function with linear approximation using the piecewise linear method



شکل (۲): سیستم انرژی یکپارچه بهم پیوسته گاز و برق
Figure (2): Integrated gas and electricity interconnected energy system

در رابطه (۲۹) محدودیت بین خط و متغیر باینری مرتبط با هر تکه را نشان داده شده است.

$$\gamma_{t,nm,z+1} * df \leq NFZ_{t,nm,z} \leq \gamma_{t,nm,z} * df \quad (29)$$

در نهایت، محدودیت بین جریان خط لوله و متغیر باینری و عدد بزرگ M طبق رابطه (۳۰) خواهد بود.

$$h_{t,nm} - [(z-1) * df] \leq \gamma_{t,nm,z} * M \quad (30)$$

شکل (۲) ارتباط مدل‌سازی سیستم انرژی یکپارچه بهم پیوسته گاز و برق را در این مقاله نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، شبکه برق از طریق سیستم توان به گاز به شبکه گاز و شبکه گاز نیز از طریق منابع تولید پراکنده گاز سوز به شبکه برق متصل است. مشاهده می‌شود که در شبکه برق، بارهای الکتریکی، منابع انرژی تجدیدپذیر، سیستم‌های ذخیره انرژی (باتری) و پارکینگ خودروهای برقی به همراه سیستم توان به گاز که توان الکتریکی را طی فرایندی به گاز طبیعی تبدیل می‌کند، در نظر گرفته شده است. همچنین در شبکه گاز طبیعی، علاوه بر بار گاز طبیعی و منابع گاز طبیعی، منابع تولید پراکنده گاز سوز قرار دارد که گاز دریافتی از شبکه گاز را سوزانده و به برق تبدیل می‌نماید. با معرفی مدل پیشنهادی در این بخش که شامل تابع هدف مسئله و همچنین قیود مرتبط با آن بود، در قالب یک مسئله ریاضی استاندارد می‌توان با استفاده از حل‌کننده‌های تجاری قدرتمند مانند گروبی^{۱۷} و سیپلکس^{۱۸} آن را حل نمود. در بخش بعدی نتایج شبیه‌سازی تجزیه و تحلیل می‌شود.

۳- شبیه‌سازی و تجزیه و تحلیل

در این بخش نتایج مربوط به شبیه‌سازی نیز ارائه و تحلیل شده است. پیاده‌سازی مدل پیشنهادی با استفاده از زبان برنامه‌نویسی جولیا^{۱۹} پیاده‌سازی شده و با استفاده از حل‌کننده تجاری قدرتمند گروبی حل شده است. برای تحلیل مدل پیشنهادی، یک شبکه

توزیع استاندارد ۳۳ شینه IEEE و یک شبکه گاز ۷ گره مدل‌سازی شده است [۲۶،۲۷]. شکل (۳) نموداری از سیستم یکپارچه پیشنهادی را نشان می‌دهد.

سه باتری و سه واحد تولید پراکنده گازسوز در این شبکه نصب شده است. حداکثر ظرفیت ذخیره انرژی باتری‌ها برابر با ۱۰۰۰ کیلووات و حداکثر توان شارژ و دشارژ برابر با ۵۰۰ کیلووات است، همچنین بازده ۷۵ درصد برای باتری‌ها انتخاب شده است [۲۶،۲۷]. این باتری‌ها به ترتیب بر روی باس‌های ۱۰، ۲۰ و ۳۰ شبکه توزیع نصب شده‌اند. به همین ترتیب سه منبع تولید پراکنده به ترتیب بر روی باس‌های ۶، ۱۴ و ۳۲ شبکه برق نصب شده که به ترتیب به گره‌های گاز ۵، ۶ و ۷ متصل می‌شوند و حداکثر ظرفیت آن‌ها برابر با ۱/۲ مگاوات است، سیستم توان به گاز در گره ۴ شبکه گاز قرار دارد و ظرفیت آن ۴۵۰۰ متر مکعب در ساعت و همچنین ظرفیت دشارژ و شارژ ۱۵۰۰ متر مکعب در ساعت است. این سیستم توان به گاز به باس شماره ۱۴ شبکه برق متصل و انرژی آن از این باس تامین می‌شود، همچنین دو پارکینگ خودروهای برقی در باس شماره‌های ۱۸ و ۲۵ قرار دارد که حداکثر ظرفیت آن‌ها برابر با ۵۰۰ کیلووات است. منبع انرژی تجدیدپذیر فتوولتائیک روی باس ۱۲ قرار دارد و حداکثر تولید آن برابر ۳۰۰ کیلووات در نظر گرفته شده است. برای تجزیه و تحلیل مدل پیشنهادی و نتایج آن، چندین سناریو مختلف به شرح زیر در نظر گرفته شده است:

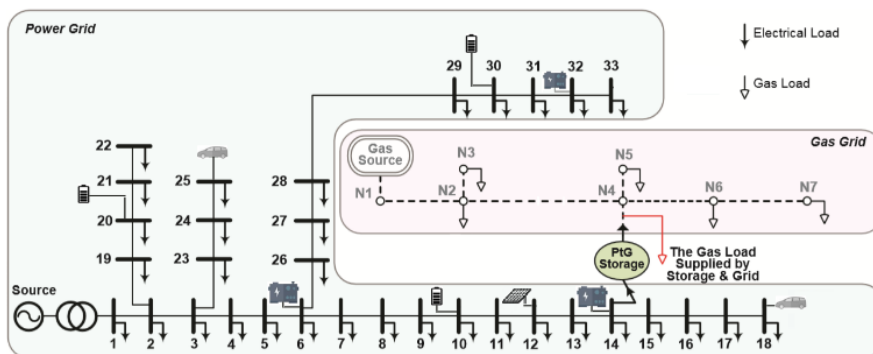
سناریوی اول- بهره‌برداری بدون تغییر در شبکه

سناریوی دوم- بدون در نظر گرفتن سیستم توان به گاز

سناریوی سوم- بدون در نظر گرفتن منابع تولید پراکنده گازسوز

سناریوی چهارم- بدون در نظر گرفتن باتری

همان‌طور که در جدول (۳) مشاهده می‌شود مقایسه بین مقدار گاز و برق خریداری شده و تابع هدف مسئله در سناریوهای مختلف نشان داده شده است. در سناریوی اول با توجه به اینکه تمام منابع موجود مانند باتری‌ها، تولید پراکنده، سیستم توان به گاز در نظر گرفته شده است، تابع هزینه در کمترین حد خود قرار دارد. همان‌طور که در سناریوی اول مشاهده می‌شود تابع هدف ۸۷۹۳۴۰ دلار، مقدار برق خریداری شده ۳۷۳۷۴ کیلووات و مقدار گاز خریداری شده برابر با ۵۵۶۲۳۳ متر مکعب است. در سناریوی دوم با حذف سیستم توان به گاز، تابع هدف مسئله افزایش یافته و مقدار گاز خریداری شده در شبکه گاز نیز افزایش پیدا کرده است، زیرا توان اضافی در شبکه برق دیگر توسط سیستم توان به گاز به گاز تبدیل نمی‌شود. در سناریوی سوم مشاهده می‌شود که با حذف منابع تولید پراکنده گازی از شبکه مقدار تابع هدف نزدیک به ۴ درصد افزایش یافته است. در این سناریو تابع هدف مسئله ۹۱۱۱۰۶ دلار شده که در این سناریو با حذف منابع تولید پراکنده دیگر نیازی به گاز برای تولید برق ندارند بنابراین گاز خریداری شده نیز کاهش می‌یابد. همان‌طور که مشاهده می‌شود میزان گاز خریداری شده در سناریوی سوم به دلیل حذف منابع تولید پراکنده کمترین میزان را در بین سایر سناریوها است. در سناریوی چهارم تأثیر باتری بر عملکرد تابع هدف مسئله به خوبی قابل مشاهده است. با حذف باتری از شبکه مقدار تابع هدف مسئله به ۸۸۱۴۱۱ دلار افزایش یافته است. لازم به ذکر است که حذف باتری بر میزان خرید برق و گاز نیز تأثیر گذاشته است. از نتایج جدول (۳) می‌توان نتیجه گرفت که مدل پیشنهادی در هر سناریو به درستی کار کرده و تأثیر هر سناریو بر تابع هدف به خوبی نشان داده شده است.



شکل (۳): نمودار سیستم یکپارچه پیشنهادی
Figure (3): Proposed integrated system diagram

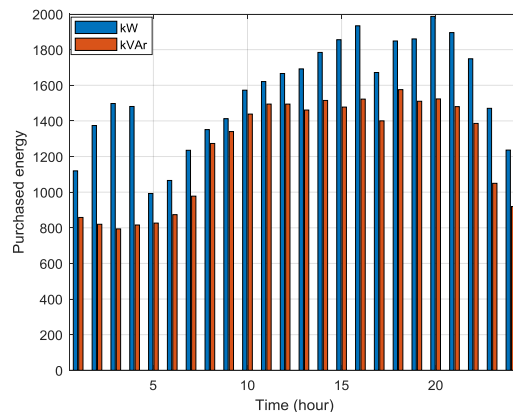
همان‌طور که در جدول (۳) مشاهده می‌گردد، مدت زمان اجرا مسئله (از لحظه اجرا برنامه تا حاصل شدن نتایج) در هر سناریو نشان داده شده است. به عنوان مثال زمان اجرا در سناریو اول بیشتر از دیگر سناریوها شده که دلیل آن در نظر گرفتن تمام قیود مسئله در این سناریو است. به ترتیب زمان حل مسئله در سناریو اول تا چهارم برابر با ۶۳، ۵۹، ۶۱ و ۶۰ ثانیه شده است. زمان اجرا شامل مدت زمان ساخت مدل توسط جولیا و مدت زمان حل توسط گروبی است. شکل (۴) میزان برق خریداری شده در ۲۴ ساعت پس از بهینه‌سازی را در سناریو اول نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که در ساعت‌های اولیه روز که پیک بار الکتریکی وجود ندارد بیشترین برق خریداری شده و در سیستم توان به گاز یا به گاز و یا در باتری ذخیره شده و در ساعت‌های پیک نیز به شبکه تزریق شده است.

شکل (۵) نشان‌دهنده میزان گاز خریداری شده از چاه گازی را در سناریو اول برای ۲۴ ساعت مدل‌سازی شده نشان می‌دهد. شکل (۶) وضعیت شارژ و دشارژ بهینه باتری‌ها در شبکه را در سناریو اول نشان می‌دهد. در این شکل محور منفی y نشان‌دهنده وضعیت شارژ و محور مثبت y نشان‌دهنده دشارژ است.

Table (3): The result of comparing different scenarios

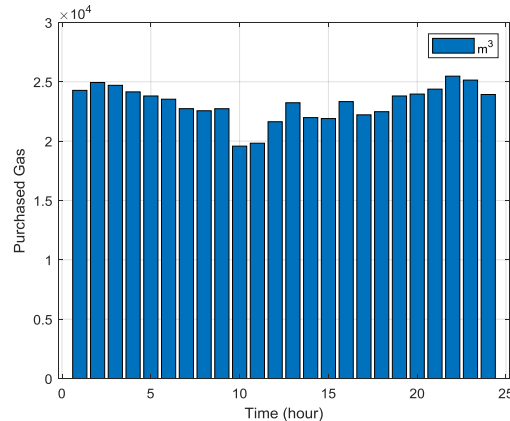
جدول (۳): نتیجه مقایسه سناریوهای مختلف

سناریو	تابع هدف (دلار)	خرید توان (کیلووات)	خرید گاز (متر مکعب)	زمان اجرا (ثانیه)
اول	۸۷۹۳۴۰	۳۷۳۷۴	۵۵۶۲۳۳	۶۳
دوم	۸۸۰۱۴۳	۳۷۰۷۵	۵۵۷۲۲۹	۵۹
سوم	۹۱۱۱۰۶	۸۰۷۹۱	۵۱۸۵۰۶	۶۱
چهارم	۸۸۱۴۱۱	۳۷۹۸۲	۵۵۴۹۳۵	۶۰



شکل (۴): خرید انرژی الکتریکی در ۲۴ ساعت در سناریو اول

Figure (4): Purchase energy in 24 hours in the first scenario

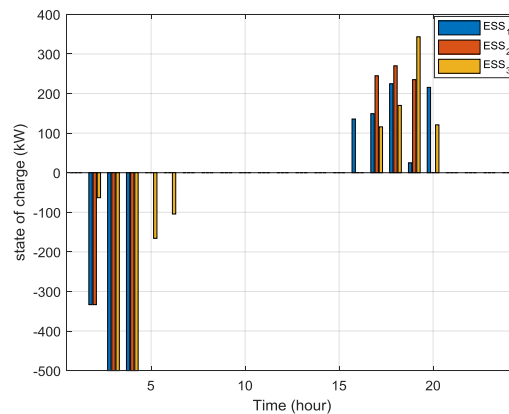


شکل (۵): خرید گاز در سناریو اول برای ۲۴ ساعت

Figure (5): Purchase gas in 24 hours in the first scenario

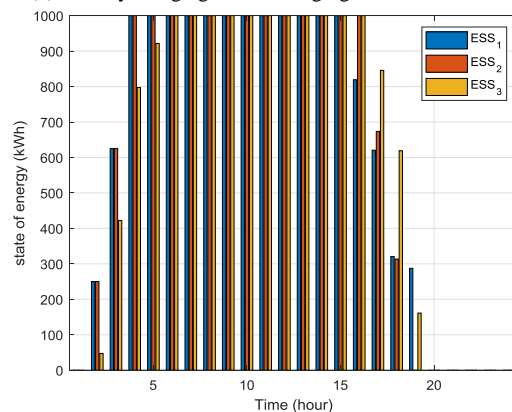
به خوبی مشخص است که باتری‌ها در ساعت ۱۲ الی ۶ صبح شروع به شارژ شدن کردن (زمان غیرپیک بار) و در ساعت‌های پیک به شبکه توان تزریق نموده‌اند. به همین ترتیب شکل (۷) وضعیت انرژی موجود در هر باتری را نشان می‌دهد. مشخص است که با شارژ شدن ظرفیت انرژی بالارفته و با دشارژ شدن انرژی موجود در باتری کاهش یافته است. شکل (۸) نیز مقدار توان فتوولتائیک بهره‌برداری شده در سناریو اول را نشان می‌دهد. در این شکل خط مشکی با دایره نشان‌دهنده توان مورد بهره‌برداری قرار گرفته فتوولتائیک است. بقیه خطوط نشان داده شده در این شکل نشان دهنده سناریوهای در نظر گرفته شده برای فتوولتائیک در مدل مبتنی بر سناریو در نظر گرفته شده است. همچنین در شکل (۹) مقدار توان واقعی شارژ خودروهای برقی موجود در پارکینگ خودرویی را در هر سناریو با مقدار مورد بهره‌برداری آن نیز نشان می‌دهد که در این شکل خط مشکی با دایره نشان‌دهنده توان مورد بهره‌برداری قرار گرفته خودروهای برقی در مسئله بهینه‌سازی در سناریو اول است. در نهایت شکل (۱۰) میزان ذخیره و تزریق گاز طبیعی را توسط سیستم توان به گاز نشان داده شده است. در این شکل محور منفی نشان از ذخیره و محور مثبت نشان از تزریق گاز طبیعی توسط سیستم توان به گاز به شبکه گاز در سناریو اول است. با بررسی نتایج و سناریوهای در نظر گرفته شده می‌توان تاثیر مدل و روش پیشنهادی را در بهینه‌سازی هم‌زمان در سیستم‌های انرژی یکپارچه برق و گاز مشاهده نمود.

به منظور بررسی و صحت بهینگی مطلق نتایج و همچنین راستی آزمایی نتایج بدست آمده، علاوه بر حل مسئله با آخرین نسخه گروبی، با آخرین نسخه حل‌کننده موزک^{۲۰} نیز اجرا و نتایج مقایسه شده است. جدول (۴) نیز مقایسه‌ای بین نتایج بدست آمده از حل با گروبی و موزک را نشان می‌دهد. همانطور که از این جدول مشاهده می‌گردد، جواب‌های بدست آمده در هر دو حل‌کننده برابر است، که این صحت درستی مدل و روش پیشنهادی را نشان می‌دهد. اما همانطور که نشان داده شده است، گروبی در حدود ۸ ثانیه سریع‌تر از موزک توانسته مسئله را حل و جواب‌های بهینه را بدست آورد.



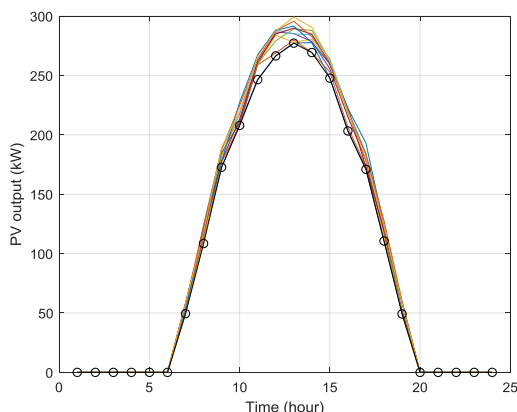
شکل (۶): وضعیت شارژ و دشارژ باتری‌ها در سناریو اول

Figure (6): Battery charging and discharging status in the first scenario

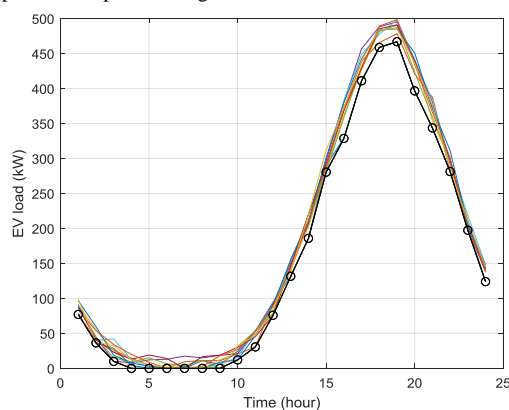


شکل (۷): وضعیت انرژی باتری‌ها در سناریو اول

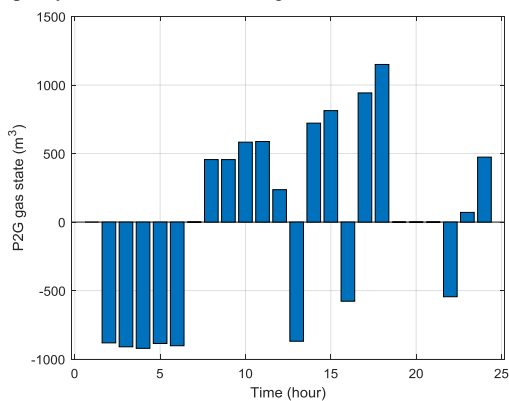
Figure (7): Battery energy status in the first scenario



شکل (۸): توان بهره‌برداری شده PV به همراه سناریوهای در نظر گرفته شده در سناریو اول
Figure (8): Operated PV power along with the scenarios considered in the first scenario



شکل (۹): توان شارژ خودروهای برقی به همراه سناریوهای در نظر گرفته شده در سناریو اول
Figure (9): Charging capacity of electric vehicles along with the scenarios considered in the first scenario



شکل (۱۰): وضعیت ذخیره و تزریق گاز توسط P2G به شبکه در سناریو اول
Figure (10): Status of gas storage and injection by P2G into the network in the first scenario

در ادامه به منظور بررسی و تجزیه و تحلیل مدل تصادفی پیشنهادی وزن هر سناریو را تغییر داده و نتایج در سناریو اول بررسی می‌شود. نتایج جدول (۳) بر حسب برابر بودن وزن هر سناریو انجام شده بود، به این منظور که با توجه به در نظر گرفتن ۱۰ سناریو، وزن هر سناریو هم نیز برابر ۰/۱ در نظر گرفته شده است. در این بخش برای بررسی عملکرد مدل تصادفی پیشنهادی وزن هر سناریو به ترتیب برابر ۰/۱۲، ۰/۲۲، ۱، ۰/۱۱، ۰/۰۸، ۰/۰۹، ۰/۰۵، ۰/۰۶، ۰/۰۷۳ و ۰/۰۹۷ در نظر گرفته شده است. با توجه به جدول (۵) مشاهده شد که با تغییر ضریب وزنی برای هر سناریو مقدار تابع هدف نیز تغییر پیدا کرده است که این نشان از عملکرد درست مدل پیشنهادی است.

Table (4): Comparison of different solvents in the first scenario

نوع حل کننده	تابع هدف (دلار)	زمان اجرا (ثانیه)
Gurobi	۸۷۹۳۴۰	۶۳
Mosek	۸۷۹۳۴۰	۷۱

Table (5): Comparison of results with different weighting coefficients in scenarios

ضریب	تابع هدف (دلار)	زمان اجرا (ثانیه)
ضریب وزنی برابر	۸۷۹۳۴۰	۶۳
ضریب وزنی نابرابر	۹۰۱۰۳۸	۶۷

Table (6): Compare the proposed method with other methods

روش	تابع هدف (دلار)	زمان اجرا (ثانیه)
روش پیشنهادی	۸۷۹۳۴۰	۶۳
الگوریتم بهینه‌سازی نهنگ [۳۴]	۸۸۸۵۰۰	۱۵۰
الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات [۳۵]	۸۹۲۵۳۰	۲۶۹
الگوریتم بهینه‌سازی تبرید [۳۶]	۸۸۹۰۱۰	۱۹۱

برای نشان دادن کارایی و برتری روش پیشنهادی نتایج با سایر روش‌های فراابتکاری مقایسه شده است. همان‌طور که در جدول (۶) مشاهده می‌گردد، الگوریتم بهینه‌سازی نهنگ^{۲۱} [۳۴]، الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات [۳۵] و الگوریتم شبیه‌سازی تبرید^{۲۲} [۳۶] برای مقایسه با روش پیشنهادی انتخاب شده است. حل توسط الگوریتم‌های فراابتکاری توسط زبان برنامه‌نویسی جولیا و بسته بهینه‌سازی "فراابتکاری" انجام شده است [۳۷]. پارامترهای این الگوریتم‌ها بر اساس مرجع‌های [۳۴] الی [۳۶] تنظیم شده است. در جدول (۶) نتایج به‌دست آمده از شبیه‌سازی سناریو اول است که مدل پیشنهادی با استفاده از سایر روش‌های موجود حل شده و نتایج آن نشان داده شده است. شایان ذکر است که به دلیل حل جملات غیرخطی توسط الگوریتم‌های فراابتکاری از خطی‌سازی برای حل در این الگوریتم‌ها استفاده نشده است. همان‌طور که می‌دانیم الگوریتم‌های تکاملی ماهیت تصادفی دارند و با هر بار اجرا در تکرارهای پایین جواب‌های نزدیک به بهینه متنوعی به‌دست می‌آورند، لذا برای جلوگیری از این امر تعداد ۲۰۰ بار تکرار برای الگوریتم‌های تکاملی در نظر گرفته شده تا از بهینه‌ترین جواب به‌دست آمده اطمینان حاصل گردد. مشاهده می‌شود که نتیجه به‌دست آمده از روش پیشنهادی کمترین مقدار تابع هدف را دارد. در اینجا تابع هدف مسئله در سناریو اول با استفاده از روش بهینه‌سازی نهنگ برابر ۸۸۸۵۰۰ دلار شده است و به همین ترتیب تابع هدف در الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات و الگوریتم بهینه‌سازی تبرید برابر ۸۹۲۵۳۰ و ۸۸۹۰۱۰ دلار شده است. از این جدول می‌توان نتیجه گرفت که روش پیشنهادی بهترین نتیجه را حاصل کرده و در کمترین مدت زمان توانسته مسئله را حل نماید.

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله یک مدل بهینه‌سازی برای کاهش هزینه خرید انرژی‌های برق و گاز در سیستم‌های یکپارچه انرژی ارائه شده است. مدل پیشنهادی یک مدل برنامه‌ریزی خطی اعداد صحیح مختلط است که با تمام حل‌کننده‌های ریاضی به راحتی قابل حل و جواب‌های بهینه مطلق آن تضمین شده است. مزیت این مدل نسبت به سایر مدل‌های مطالعات مشابه را می‌توان به ارائه یک مدل بهینه‌سازی خطی عدد صحیح مختلط منابع تولید پراکنده با سوخت گاز، سیستم‌های ذخیره انرژی و سیستم‌های توان به گاز، به همراه خودروهای برقی در یک سیستم یکپارچه برق و گاز با مدل‌سازی جریان خط لوله گاز و شبکه توزیع برق، با استفاده از خطی‌سازی معادله‌های شبکه گاز به روش تکه‌ای با مدل‌سازی عدم قطعیت در تولید منابع تجدیدپذیر و هزینه خرید انرژی و توان شارژ مورد نیاز خودروهای برقی به‌صورت روش مبتنی بر سناریو. برای تحلیل مدل پیشنهادی، یک شبکه توزیع برق ۳۳

شینه و یک شبکه گاز ۷ گر مدلسازی شد. سناریوهای مختلفی برای تحلیل و اثربخشی مدل پیشنهادی ارائه شد که نتایج به دست آمده از هر سناریو، کارایی مدل پیشنهادی را ثابت کرد. در این مقاله، تأثیر هر یک از منابع تولید پراکنده، باتری، سیستم توان به گاز، انرژی‌های تجدیدپذیر بر روی تابع هدف مسئله و خرید انرژی به طور جداگانه نشان داده شد. نتایج نشان داد که مدیریت یکپارچه انرژی پیشنهادی برای شبکه‌های گاز و برق می‌تواند در کاهش هزینه‌های خرید انرژی برق و گاز موثر باشد. همچنین به منظور نشان دادن تضمین جواب‌های بهینه مطلق، مدل پیشنهادی با استفاده از چند حل‌کننده مختلف اجرا و نتایج بررسی شد که این مهم را ثابت می‌کرد. از طرفی دیگر به منظور صحت‌سنجی مدل تصادفی پیشنهادی، ضریب وزنی سناریوها تغییر یافت و نتایج تجزیه و تحلیل شد که نتایج نشان داد که ضریب وزنی هر سناریو می‌تواند در تابع هدف تأثیر بسزایی داشته باشد.

سپاسگزاری

این مقاله مستخرج از رساله دکتری در دانشگاه آزاد اسلامی واحد شاهرود است. نویسندگان بر خود لازم می‌دانند مراتب تشکر صمیمانه خود را از همکاران حوزه پژوهشی دانشگاه آزاد اسلامی و داوران محترم که ما را در انجام و ارتقای کیفی این مقاله یاری نموده‌اند، اعلام نمایند.

References

مراجع

- [1] Y. Sun, B. Zhang, L. Ge, D. Sidorov, J. Wang, 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 (doi: 10.17775/CSEEJPES.2019.00860).
- [2] Y. Tao, J. Qiu, S. Lai, J. Zhao, "Integrated electricity and hydrogen energy sharing in coupled energy systems", IEEE Trans. on Smart Grid, vol. 12, no. 2, pp. 1149-1162, March 2021 (doi: 10.1109/TSG.2020.3023716).
- [3] P. Zhao, C. Gu, Z. Cao, Z. Hu, X. Zhang, X. Chen, I. Hernando-Gil, Y. Ding, "Economic-effective multi-energy management considering voltage regulation networked with energy hubs", IEEE Trans. on Power Systems, vol. 36, no. 3, pp. 2503-2515, May 2021 (doi: 10.1109/TPWRS.2020.3025861).
- [4] J. Zhai, X. Zhou, Y. Li, "Reliability analysis of power-gas integrated energy system based on dynamic simulation", IEEE Access, vol. 9, pp. 65855-65870, 2021 (doi: 10.1109/ACCESS.2021.3065957).
- [5] A. U. Rehman, Z. Wadud, R. M. Elavarasan, G. Hafeez, I. Khan, Z. Shafiq, H. H. Alhelou, "An optimal power usage scheduling in smart grid integrated with renewable energy sources for energy management", IEEE Access, vol. 9, pp. 84619-84638, 2021 (doi: 10.1109/ACCESS.2021.3087321).
- [6] J. Wang, C. Wang, Y. Liang, T. Bi, M. Shafie-khah, J. P. S. Catalão, "Data-driven chance-constrained optimal gas-power flow calculation: A bayesian nonparametric approach", IEEE Trans, on Power Systems, vol. 36, no. 5, pp. 4683-4698, Sept. 2021 (doi: 10.1109/TPWRS.2021.3065465).
- [7] Q. Sun, Y. Fu, H. Lin, R. Wennersten, "A novel integrated stochastic programming-information gap decision theory (IGDT) approach for optimization of integrated energy systems (IESs) with multiple uncertainties", Applied Energy, vol. 314, Article Number: 119002, May 2022 (doi: 10.1016/j.apenergy.2022.119002).
- [8] K.H.M. Al-Hamed, I. Dincer, "Exergoeconomic analysis and optimization of a solar energy-based integrated system with oxy-combustion for combined power cycle and carbon capturing", Energy, vol. 250, Article Number: 123814, July 2022 (doi: 10.1016/j.energy.2022.123814).
- [9] Y. Huang, J. Kang, L. Liu, X. Zhong, J. Lin, S. Xie, C. Meng, Y. Zeng, N. Shah, N. Brandon, Y. Zhao, "A hierarchical coupled optimization approach for dynamic simulation of building thermal environment and integrated planning of energy systems with supply and demand synergy", Energy Conversion and Management, vol. 258, Article Number: 115497, April 2022 (doi: 10.1016/j.enconman.2022.115497).
- [10] Z. Cao, J. Wang, Q. Zhao, Y. Han, Y. Li, "Decarbonization scheduling strategy optimization for electricity-gas system considering electric vehicles and refined operation model of power-to-gas", IEEE Access, vol. 9, pp. 5716-5733, 2021 (doi: 10.1109/ACCESS.2020.3048978).
- [11] 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 (doi: 10.1109/JSYST.2020.2-975090).

- [12] X. Jiang, Q. Li, Y. Yang, L. Zhang, X. Liu, N. Ning, "Optimization of the operation plan taking into account the flexible resource scheduling of the integrated energy system", *Energy Reports*, vol. 8, no. 4, pp. 1752-1762, 2022 (doi: 10.1016/j.egy.2022.02.211).
- [13] Y. Mu, C. Wang, M. Sun, W. He, W. Wei, "CVaR-based operation optimization method of community integrated energy system considering the uncertainty of integrated demand response", *Energy Reports*, vol. 8, no. 1, pp. 1216-1223, 2022 (doi: 10.1016/j.egy.2021.11.133).
- [14] F. Qi, M. Shahidehpour, F. Wen, Z. Li, Y. He, M. Yan, "Decentralized privacy-preserving operation of multi-area integrated electricity and natural gas systems with renewable energy resources", *IEEE Trans. on Sustainable Energy*, vol. 11, no. 3, pp. 1785-1796, July 2020 (doi: 10.1109/TSTE.2019.2940624).
- [15] Z. Li, Z. Yu, D. Lin, W. Wu, H. Zhu, T. Yu, H. Li, "Environmental economic dispatch strategy for power-gas interconnection system considering spatiotemporal diffusion of air pollutant and p2g in coastal areas", *IEEE Access*, vol. 8, pp. 123662-123672, 2020 (doi: 10.1109/ACCESS.2020.3006025).
- [16] B. Li, M. Chen, Z. Ma, G. He, W. Dai, D. Liu, C. Zhang, H. Zhong, "Modeling integrated power and transportation systems: impacts of power-to-gas on the deep decarbonization", *IEEE Trans. on Industry Applications*, vol. 58, no. 2, pp. 2677-2693, March-April 2022 (doi: 10.1109/TIA.2021.3116916).
- [17] S. Chen, A. J. Conejo, Z. Wei, "Gas-power coordination: from day-ahead scheduling to actual operation", *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 37, no. 2, pp. 1532-1542, March 2022 (doi: 10.1109/TPWRS.2021.3098768).
- [18] C. Saletti, M. Morini, A. Gambarotta, "Smart management of integrated energy systems through co-optimization with long and short horizons", *Energy*, vol. 250, Article Number: 123748, 2022 (doi: 10.1016/j.energy.2022.123748).
- [19] Y. Huang, Y. Wang, N. Liu, "A two-stage energy management for heat-electricity integrated energy system considering dynamic pricing of Stackelberg game and operation strategy optimization", *Energy*, vol. 244, Article Number: 122576, April 2022 (doi: 10.1016/j.energy.2021.122576).
- [20] D. Niu, M. Yu, L. Sun, T. Gao, K. Wang, "Short-term multi-energy load forecasting for integrated energy systems based on CNN-BiGRU optimized by attention mechanism", *Applied Energy*, vol. 313, 2022 (doi: 10.1016/j.apenergy.2022.118801).
- [21] R. Zhang, T. Jiang, F. Li, G. Li, H. Chen, X. Li, "Coordinated bidding strategy of wind farms and power-to-gas facilities using a cooperative game approach", *IEEE Trans. on Sustainable Energy*, vol. 11, no. 4, pp. 2545-2555, Oct. 2020 (doi: 10.1109/TSTE.2020.2965521).
- [22] Y. Wang, Z. Liu, C. Cai, L. Xue, Y. Ma, H. Shen, X. Chen, L. Liu, "Research on the optimization method of integrated energy system operation with multi-subject game", *Energy*, vol. 245, Article Number: 123305, 2022 (doi: 10.1016/j.energy.2022.123305).
- [23] W. Yang, J. Guo, A. Vartosh, "Optimal economic-emission planning of multi-energy systems integrated electric vehicles with modified group search optimization", *Applied Energy*, vol. 311, Article Number: 118634, 2022 (doi: 10.1016/j.apenergy.2022.118634).
- [24] H. Khani, H. E. Z. Farag, "Optimal day-ahead scheduling of power-to-gas energy storage and gas load management in wholesale electricity and gas markets", *IEEE Trans. on Sustainable Energy*, vol. 9, no. 2, pp. 940-951, April 2018 (doi: 10.1109/TSTE.2017.2767064).
- [25] D. Xu, B. Zhou, Q. Wu, C. Y. Chung, C. Li, S. Huang, S. Chen, "Integrated modelling and enhanced utilization of power-to-ammonia for high renewable penetrated multi-energy systems", *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 35, no. 6, pp. 4769-4780, Nov. 2020 (doi: 10.1109/TPWRS.2020.2989533).
- [26] Q. Zeng, J. Fang, J. Li, Z. Chen, "Steady-state analysis of the integrated natural gas and electric power system with bi-directional energy conversion", *Applied Energy*, vol. 184, no. 15, pp. 1483-1492, Dec. 2016 (doi: 10.1016/j.apenergy.2016.05.060).
- [27] C. Wang, S. Wang, F. Liu, T. Bi, T. Wang, "Risk-loss coordinated admissibility assessment of wind generation for integrated electric-gas systems", *IEEE Trans. on Smart Grid*, vol. 11, no. 5, pp. 4454-4465, Sept. 2020 (doi: 10.1109/TSG.2020.2979944).
- [28] Y. Li, W. Liu, M. Shahidehpour, F. Wen, K. Wang, Y. Huang, "Optimal operation strategy for integrated natural gas generating unit and power-to-gas conversion facilities", *IEEE Trans. on Sustainable Energy*, vol. 9, no. 4, pp. 1870-1879, Oct. 2018 (doi: 10.1109/TSTE.2018.2818133).
- [29] S. Clegg, P. Mancarella, "Integrated modeling and assessment of the operational impact of power-to-gas (p2g) on electrical and gas transmission networks", *IEEE Trans. on Sustainable Energy*, vol. 6, no. 4, pp. 1234-1244, Oct. 2015 (doi: 10.1109/TSTE.2015.2424885).
- [30] S. Chen, Z. Wei, G. Sun, K. W. Cheung, Y. Sun, "Multi-linear probabilistic energy flow analysis of integrated electrical and natural-gas systems", *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 32, no. 3, pp. 1970-1979, May 2017 (doi: 10.1109/TPWRS.2016.2597162).
- [31] S. Souri, H. Mohammadnezhad-Shourkaei, S. Soleymani, B. Mozafari, "Reactive power management in low voltage distribution networks using capability and oversizing of PV smart inverters", *Journal of Intelligent*

- Procedures in Electrical Technology, vol. 14, no. 56, pp. 21-42, March 2024 (http://jipet.iaun.ac.ir/article_691569.html).
- [32] S. Alavimatin, P. Radmehr, A. Ahmarinejad, S. Mansouri, "Distribution systems energy management in the presence of smart homes, renewable energy resources and demand response programs by considering uncertainties", *Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology*, vol. 14, no. 53, pp. 79-98, June 2023 (doi: 20.1001.1.23223871.1402.14.53.5.9).
- [33] M. Zare, S. Saeed, H. Akbari, "Demand response programs modeling in multiple energy and structure management in microgrids equipped by combined heat and power generation", *Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology*, vol. 14, no. 53, pp. 99-120, June 2023 (doi: 20.1001.1.23223871.14-02.14.53.6.0).
- [34] K.E. Adetunji, I.W. Hofsjajer, A.M. Abu-Mahfouz, L. Cheng, "Category-based multiobjective approach for optimal integration of distributed generation and energy storage systems in distribution networks", *IEEE Access*, vol. 9, pp. 28237-28250, 2021 (doi: 10.1109/ACCESS.2021.3058746).
- [35] P. Li, D. Xu, Z. Zhou, W. -J. Lee, B. Zhao, "Stochastic optimal operation of microgrid based on chaotic binary particle swarm optimization", *IEEE Trans. on Smart Grid*, vol. 7, no. 1, pp. 66-73, Jan. 2016 (doi: 10.1109/T-SG.2015.2431072).
- [36] J.M. Nahman, D.M. Peric, "Optimal planning of radial distribution networks by simulated annealing technique", *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 23, no. 2, pp. 790-795, May 2008 (doi: 10.1109/TPWRS.2-008.920047).
- [37] J. Bezanson, A. Edelman, S. Karpinski, V. B. Shah, "Julia: A fresh approach to numerical computing", *SIAM Review*, vol. 59, no. 1, pp. 65-98, 2017 (doi: 10.1137/141000671).

زیر نویس‌ها

1. Power to gas
2. Energy storage system
3. Mixed-integer linear programming
4. Ammonium bicarbonate
5. Real-time control of the system
6. Stackelberg
7. Carbon dioxide
8. Natural gas generation
9. Integrated energy hub
10. Photo voltaic
11. Second order cone programming
12. Non-linear programming
13. Robust optimization
14. Mixed-integer second order cone programming
15. Gas-fired distributed generation
16. Piecewise
17. Gurobi
18. Cplex
19. Julia
20. Mosek
21. Whale optimization algorithm
22. Simulated annealing