فصلنامه علمی – ترویجی انرژی ایران

دوره ۲۳، شماره ۴، زمستان ۱۳۹۹، صفحه ۱۰۵ – ۷۹

نقش منابع تجدیدپذیر و تکنولوژی تبدیل نیروی الکتریکی به گاز (G2P) در تاب‌آوری یک هاب انرژی در شرایط قطعی شبکه گاز

[۱] شبنم رضائی، [۲] احمد قاسمی*

تاریخ دریافت:
۱۳۹۹/۱۰/۵

تاریخ پذیرش:
۱۳۹۹/۱۲/۲۵

کلمات کلیدی:
هاب انرژی، منابع تجدیدپذیر، تکنولوژی P2G، تاب‌آوری.

چکیده

هاب انرژی به‌عنوان مدلی برای مطالعه یکپارچه زیرساخت‌های مختلف انرژی تعریف شده، که به شبکه‌های برق و گاز طبیعی متصل بوده و به‌وسیله مبدل‌ها و ذخیره‌سازهای مختلف، تقاضای مختلف مصرف‌کنندگان را تأمین می‌کند. امنیت تأمین تقاضای مصرف‌کنندگان در طول قطعی شبکه گاز به این دلیل که مهم‌ترین اجزای هاب با سوخت گاز کار می–کنند، مسئله مهمی است که باید مورد مطالعه قرار گیرد. در این مقاله، چارچوبی برای ارزیابی تاب‌آوری هاب در شرایط قطعی شبکه گاز ارائه شده‌است. همچنین به‌منظور بهبود تاب‌آوری از منابع تجدیدپذیر و تکنولوژی(برق به گاز) G2P استفاده شده‌است. کارآیی چارچوب پیشنهادی از طریق شبیه‌سازی مطالعات موردی متعدد بررسی شده‌است. در نهایت تأثیر مشارکت منابع تجدیدپذیر و G2P در شرایط قطعی شبکه گاز به‌وسیله یک شاخص عددی محاسبه شده‌است. نتایج نشان می‌دهد که میزان تاب‌آوری تنها با وجود منابع تجدیدپذیر و مشارکت منابع تجدیدپذیر و G2P به طور همزمان به ترتیب ۶/۷۸٪و ۲۰/۱۲٪ بهبود می‌یابد.

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی جندی شاپور دزفول sh.rezaei9372@gmail.com

۲. استادیار گروه برق قدرت، دانشگاه صنعتی جندی شاپور دزفول(نویسنده مسئول) aghasemi@jsu.ac.ir

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-17]

۱. مقدمه

در حال حاضر، زیرساخت‌های متداول انرژی مانند شبکه برق و شبکه گازطبیعی به‌طور مستقل برنامه‌ریزی و بهره‌برداری می‌شوند، که منجر به کاهش بازده انرژی، هزینه بهره‌برداری بالا و توان کم می‌شود. موارد گفته شده و همچنین نگرانی‌های زیست‌محیطی همراه با آزادسازی بازارهای انرژی، باعث ظهور تجهیزات تولیدپراکنده در مقیاس کوچک تا متوسط در شبکه‌های انتقال و توزیع شده‌است. یکی از روش‌های به حداکثر رساندن استفاده از انرژی اولیه برای تولید انرژی، استفاده از تکنولوژی CHP به‌عنوان یک واحد تولیدپراکنده در مکان‌های مختلف است. تولید انرژی با استفاده از CHP جز مهمی از فناوری‌های تولید انرژی در اروپا و دیگر قاره‌ها به‌شمار می‌رود(پت‌چرز[1]،۲۰۰۳)،(مونیب[2] و همکاران،۲۰۱۳). تولید ترکیبی برق و گرمایش از طریق CHP(بازده به‌طور معمول ۸۰٪) در مقایسه با یک مولد سنتی(بازده به‌طور معمول ۳۵٪ تا ۴۰٪)بسیار مقرون به‌صرفه‌تر است و این نیروگاه‌ها می‌توانند از انواع سوخت‌هایی با کربن پایین نیز استفاده کنند(مونیب[3] و همکاران،۲۰۱۷). کیم[4] و همکاران(۲۰۱۴)، در مقاله‌ای یک برنامه‌ریزی خطی برای بهره‌برداری از CHP با قیود بهره‌برداری ارائه کرده‌اند. وانگ[5] و همکاران(۲۰۱۵)، در مقاله‌ای بهره‌برداری از یک واحد CHP در کنار یک واحد تولیدی مجزای حرارتی در محیط تجدید ساختار یافته را پیشنهاد کرده‌اند.

با توجه به استفاده روزافزون از تولیدات احتراق گاز و همچنین استفاده از تکنولوژی CHP، دیدگاه ادغام حامل‌های انرژی مانند برق، گازطبیعی و... توجه بسیاری را در سال‌های اخیر به‌خود جلب کرده‌است. این امر با هماهنگ کردن حامل‌های انرژی مختلف درون یک سیستم به‌نام هاب انرژی امکان‌پذیر است، که می‌تواند به‌عنوان واسطی بین زیرساخت‌های مختلف انرژی و تقاضا در نظر گرفته شود(مرادی[6] و

1. Petchers
2. Muneeb
3. Muneeb
4. Kim
5. Wang
6. Moradi

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-17]

همکاران،۲۰۱۷)،(سیدی[1] و همکاران،۲۰۱۸). هاب انرژی مجموعه‌ای از مبدل‌ها و ذخیره‌سازهای انرژی است، که برق و گاز را به‌عنوان ورودی از شبکه دریافت کرده و تقاضاهای مختلف مصرف‌کنندگان را در خروجی تأمین می‌کند(اندرسون[2] و همکاران،۲۰۰۶). هماهنگی حامل‌های انرژی مختلف در قالب یک هاب انرژی سبب ایجاد درجه خاصی از آزادی در تأمین بار می‌شود(اندرسون[3] و همکاران،۲۰۰۹). همچنین بهره‌گیری از منابع تجدیدپذیری همچون انرژی بادی و خورشیدی تأثیر زیادی بر بهره‌برداری بهینه هاب انرژی دارند و از نظر اقتصادی مقرون به‌صرفه هستند. صالحی مالح[4] و همکاران(۲۰۱۸)، در مقاله‌ای مدلی برای برنامه‌ریزی یک هاب انرژی ارائه کرده‌اند، که این هاب شامل CHP، بویلر گازی، چیلر الکتریکی و جذبی، پمپ الکتریکی–حرارتی، خودروی الکتریکی و ذخیره‌سازهای برق، گرمایش و سرمایش است، که تقاضای برق، گرمایش و سرمایش را تأمین می‌کند و روشن/خاموش شدن تجهیزات قابل کنترل را مدیریت می‌کند. نجفی قلعه لوئی[5] و همکاران(۲۰۱۹)، در مقاله‌ای یک سیستم هاب انرژی چند حاملی(MCHES[6]) که تقاضاهای مختلف انرژی مانند گرمایش، سرمایش و برق را با استفاده از شبکه‌های برق، گاز و پنل‌های فتوولتائیک، پنل‌های خورشیدی–حرارتی و توربین‌های بادی برآورده می‌کند، راارائه کرده‌اند. در این مقاله یک رویکرد بهینه‌سازی قوی(ROA[7]) برای برنامه‌ریزی دقیق MCHES با توجه به محدودیت‌های اقتصادی و زیست‌محیطی در حضور عدم‌قطعیت بازار و برنامه پاسخ‌گویی بار برق ارائه شده‌است.

حوادث طبیعی و اقدامات خرابکارانه از جمله حوادث غیرقابل پیش‌بینی و با احتمال وقوع کم هستند، که می‌توانند خسارات سنگینی بر زیرساخت‌های سیستم توزیع تحمیل نمایند. ایجاد خسارت در زیرساخت‌های سیستم مانند شبکه برق و گازطبیعی موجب زیان‌های مالی زیاد برای برخی مصرف–کنندگان می‌شود. همانطور که قبلاً گفته شد، هاب انرژی به شبکه‌های برق و گاز طبیعی متصل است.

1. Seyedi
2. Andersson
3. Andersson
4. Salehimaleh
5. Najafi-Ghalelou
6. Multi-Carrier Hub Energy System
7. Robust Optimization Approach

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-17]

مهم‌ترین اجزای هاب انرژی یعنیCHP و بویلر از سوخت گاز استفاده می‌کنند. لذا خسارت در زیرساخت‌های شبکه گاز سبب ایجاد اختلال در تأمین تقاضای مصرف‌کنندگان هاب می‌گردد. بنابراین، ضروری است که رفتار سیستم در شرایط وقوع این‌گونه اغتشاشات مطالعه شده و در صورت نیاز تمهیدات لازم جهت حفظ تاب‌آوری اندیشیده شود. تاب‌آوری در واقع توانایی مقاومت، تطبیق‌پذیری و بازگشت سریع به عملکرد عادی یک سیستم پس از وقوع یک اغتشاش شدید است(پانتلی[1] و مانکارلا[2]،۲۰۱۵). یکی از مبدل‌هایی که می‌توان از آن به‌عنوان روشی جدید برای بهبود قابلیت بهره‌برداری سیستم قدرت و تداوم فعالیت سیستم در شرایط قطعی شبکه گاز استفاده کرد، تکنولوژی P۲G است. چنگ[3] و همکاران(۲۰۲۰)، در مقاله‌ای یک مدل بهینه‌سازی عددی براساس بهره‌برداری هماهنگ از ذخیره‌ساز انرژی برق–گرمایی مبتنی بر CO2 و P۲G در یک سیستم انرژی چندحاملی ارائه کرده‌اند.در این مقاله از ذخیره‌ساز مبتنی بر CO2 برای بازیابی گرما در فرایند الکترولیز استفاده شده‌است. همچنین برق مازاد توربین‌های بادی، برق مصرفی P۲G را تأمین می‌کنند. بوچر[4] و همکاران(۲۰۱۵)، در مقاله‌ای یک مدل تعمیم یافته شامل دو فرآیند الکترولیز و تبدیل هیدروژن به متان با استفاده از یک چارچوب مدل‌سازی یکپارچه براساس مفهوم هاب انرژی را ارائه کرده‌اند. در این مقاله بر روی فناوری P۲G به عنوان یک منبع اضافی برای بهبود عملکرد سیستم تمرکز کرده‌اند، و مدل حاصل با استفاده از داده‌های موجود و از نظر اقتصادی ارزیابی شده‌است. چن[5] و همکاران(۲۰۱۷)، در مقاله‌ای یک آنالیز جریان انرژی احتمالی راارائه کرده‌اند، که کوپلینگ بین شبکه برق و گاز را بررسی می‌کند که از واحد P۲G برای بهبود فشار شبکه گاز در ساعات مصرف بالای گاز به منظور بهره‌برداری ایمن شبکه استفاده کرده‌اند. قلی زاده[6] و همکاران(۲۰۱۹)، در مقاله‌ای یک هاب انرژی را به منظور مطالعه امنیت سیستم در صورت قطع جریان گاز، مدل‌سازی کرده‌اند. در این مقاله به منظور تأمین بخشی از گاز مورد نیاز از P۲G به همراه ذخیره ساز هیدروژن استفاده شده، که برق مصرفی P۲G از توان تولیدی توربین بادی تأمین می‌شود. قطعی

1. Panteli
2. Mancarella
3. Cheng
4. Bucher
5. Chen
6. Gholizadeh

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-17]

شبکه گاز در هاب انرژی حتماً سبب ریزش بار برق نیز می‌شود، با این حال در این مقاله تنها تأمین امنیت تقاضای حرارتی مورد بررسی قرار گرفته و استفاده از توان تولیدی توربین‌های بادی برای راه‌اندازی P۲G با وجود هزینه کم‌تر، خود سبب افزایش ریزش بار برق می‌شود.

در تمامی کارهای ارزشمند فوق که از تکنولوژی P۲G استفاده کرده‌اند، از منابع تجدیدپذیر تولیدکننده برق به منظور تأمین برق مصرفی P۲G استفاده شده که این امر در صورتی که از P۲G به منظور کمک به تأمین تقاضا در شرایط عادی سیستم استفاده شود، مشکلی ایجاد نمی‌کند. اما در زمانی که از P۲G برای تأمین تقاضا در شرایط قطعی حامل‌های انرژی استفاده شود، عدم‌قطعیت توان تولیدی منابع تجدیدپذیر می‌تواند تولید گاز توسط P۲G و تأمین تقاضا را با مشکل روبه‌رو کند. لذا می‌توان از ژنراتورهای اضطراری به منظور تأمین توان مصرفی P۲G استفاده کرد و از کارکردن P۲G در زمان قطعی، اطمینان حاصل کرد.همچنین در هیچ یک از مقالات فوق تأثیر وجود P۲G به صورت عددی بر امنیت و تاب‌آوری سیستم در شرایط قطعی گاز محاسبه نشده‌است. بنابراین در این مقاله برنامه‌ریزی روز بعد یک هاب انرژی شامل CHP، بویلر، پمپ الکتریکی–حرارتی(EHP[1])، ذخیره‌سازهای برق و گرمایش ارائه شده و به بحث افزایش میزان تاب‌آوری و تداوم انرژی هاب در زمان قطعی شبکه گاز پرداخته شده‌است. همچنین به منظور بهبود تاب‌آوری از توربین‌های بادی و پنل‌های فتوولتائیک به عنوان منابع تجدیدپذیر و تکنولوژی P۲G به همراه ژنراتوراضطراری استفاده شده‌است. بنابراین نوآوری‌های این مقاله به شرح زیر است:

- افزایش بهبود تاب‌آوری سیستم با استفاده از تکنولوژی P۲G و منابع تجدیدپذیر در شرایط قطعی شبکه گاز.
- استفاده از ژنراتور اضطراری برای تأمین برق مصرفی P۲G و اطمینان از کارکردن P۲G در شرایط قطعی.
- محاسبه عددی تاب‌آوری هاب در شرایط مختلف با استفاده از یک شاخص دقیق.

ادامه این مقاله به شرح زیر سازماندهی شده‌است: در بخش۲، ساختار هاب انرژی ارائه شده‌است. در بخش۳، فرمول‌بندی مسئله پیشنهادی ارائه شده‌است. در بخش۴، داده‌های مربوط به هاب انرژی و

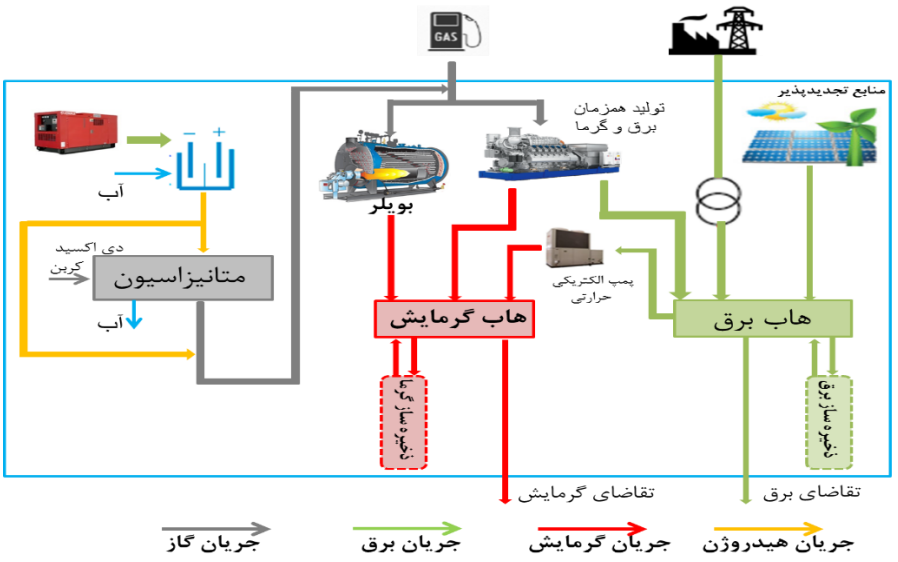
1. Electric heat pump

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-17]

مطالعات موردی ارائه شده‌است. نتایج شبیه‌سازی و کارآیی چارچوب پیشنهادی در بخش ۵ مورد بحث و بررسی قرار گرفته‌است. در نهایت، بخش۶ نتیجه‌گیری را در این مقاله شرح می‌دهد.

۲. معماری هاب انرژی پیشنهادی

شکل۱ ساختار هاب انرژی پیشنهاد شده را نشان می‌دهد، که در آن برق و گاز به‌عنوان حامل‌های انرژی ورودی در نظر گرفته شده‌اند. از سوی دیگر، توربین‌های بادی(WT) و پنل‌های فتوولتائیک(PV) به عنوان منابع انرژی تجدیدپذیر، بخشی از تقاضاهای برق هاب انرژی را در ساعات مختلف تأمین می‌کنند. همچنین برق و گرمایش به‌عنوان تقاضاهای هاب انرژی در خروجی مشخص شده‌اند. CHP، بویلر، EHP و P۲G به‌عنوان مبدل‌های انرژی همراه با دستگاه‌های ذخیره‌ساز برق و گرمایش ساختار هاب انرژی مورد نظر را تشکیل داده‌اند. در این مقاله، تأثیر منابع تجدیدپذیر و P۲G بر بهبود تاب‌آوری سیستم بررسی شده، که به منظور جلوگیری از ریزش بار برق برای تأمین برق مصرفی P۲G از یک ژنراتور اضطراری استفاده شده، که P۲G و ژنراتور اضطراری تنها در ساعات قطعی شبکه گاز شروع به فعالیت می‌کنند.



شکل۱. معماری هاب انرژی پیشنهادی(قلی‌زاده و همکاران،۲۰۱۹"با تغییر")

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-17]

۳. فرمول‌بندی ریاضی

فرمول کلی برای هاب انرژی با توجه به تأثیر مشارکت منابع تجدیدپذیر و P۲G بر تاب‌آوری سیستم با ایجاد سناریوهای مختلف در نظر گرفته شده‌است. این بخش شامل فرمول‌های تابع هدف، مبدل‌های انرژی و قیود مسئله است.

۳-۱. تابع هدف

تابع هدف مسئله (۱) به حداقل رساندن هزینه کل هاب انرژی در سراسر افق برنامه‌ریزی، به عنوان مثال یک شبانه‌روز است. هزینه هاب انرژی از چهار عبارت تشکیل شده‌است. اولین عبارت CostG، که در(۲) تعریف شده‌است، به هزینه سوخت(گاز طبیعی) CHP و بویلر و هزینه تولید گاز متان توسط فرآیند متانیزاسیون و تولید هیدروژن توسط فرآیند الکترولیز اشاره می‌کند. دومین عبارتCostE، که در(۳) تعریف شده‌است، به هزینه خرید/فروش برق از/به شبکه برق، هزینه مربوط به پنل‌های فتوولتائیک و توربین‌های بادی و هزینه ژنراتور اضطراری اشاره می‌کند. سومین عبارتCostT، که در(۴) تعریف شده‌است، به هزینه تولید انرژی گرمایش توسط EHP اشاره می‌کند. چهارمین عبارتCostStorage، که در(۵) تعریف شده‌است، به هزینه ذخیره‌سازی انرژی توسط ذخیره‌سازهای موجود در هاب‌های انرژی اشاره دارد. ششمین عبارت CostP، که در (۶) تعریف شده‌است، به هزینه جریمه بار تأمین نشده اشاره دارد.

$$Min \quad TotalCost = CostNG + CostGE + Cost T + CostStorage + CostP$$

$$CostG = (F_t^{CHP} + F_t^{Boiler}) \times \gamma_t^{NGDS} + \sum_t \gamma^{methanization} \times G^{P2G} + \sum_t \gamma^{electrolyse} \times G^{H_2} \quad (۱)$$

$$CostE = \sum_t \quad \gamma_t^{GE} \times E_t^{EDS} + \sum_t \quad \gamma^{PV} \times E_t^{PV} + \sum_t \quad \gamma^{WT} \times E_t^{WT} + \sum_t \gamma^{DG} \times E^{DG} \quad (۲)$$

$$Cost T = \sum_t \quad \gamma^{EHP} \times T_t^{EHP} \quad (۳)$$

$$CostStorage = \sum_{t,X} \quad \gamma^{X} \times \left(E_t^{X,ch} + E_t^{X,dch}\right) \quad (۴)$$

$$CostP = \sum_t \quad \gamma^{EP} \times E_t^{LNS} + \sum_t \quad \gamma^{TP} \times T_t^{LNS} \quad (۵)$$

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-17]

۳-۲. مدل‌سازی CHP

واحدهای CHP، گاز $\left(G_t^{E,CHP}, G_t^{H,CHP}\right)$ را به‌عنوان انرژی ورودی دریافت کرده و برق E_t^{CHP} و گرما T_t^{CHP} را به‌طور همزمان تولید می‌کنند. میزان برق و گرمای تولیدی به ترتیب به وسیله معادلات ۸ و۹ محدود می‌شوند(براتی[1] و راکی‌پور[2]،۲۰۱۹).

$$E_t^{CHP} = G_t^{P,CHP} \times \eta^{P,CHP} \quad (۶)$$

$$T_t^{CHP} = G_t^{T,CHP} \times \eta^{T,CHP} \quad (۷)$$

$$E_{min}^{CHP} t^{CHP} {}_{max}^{CHP} \quad (۸)$$

$$T_{min}^{CHP} t^{CHP} {}_{max}^{CHP} \quad (۹)$$

۳-۳. مدل‌سازی بویلر

بویلرها، گاز طبیعی، F_t^{Boiler}، را به‌عنوان منبع انرژی ورودی خود دریافت کرده و گاز مصرفی را به گرمایش، T_t^{Boiler}، با راندمان تبدیل η^{Boiler}در(۱۰) تبدیل می‌کنند. انرژی گرمایی تولیدی بویلرها با استفاده از معادله(۱۱) محدود می‌شود(والی‌پور و همکاران،۲۰۱۸).

$$F_t^{Boiler} = \eta^{Boiler} \times T_t^{Boiler} \quad (۱۰)$$

$$T_{min}^{Boiler} \leq T_t^{Boiler} \leq T_{max}^{Boiler} \quad (۱۱)$$

۳-٤. مدل‌سازیEHP

EHPها از جمله تجهیزات پرکاربرد در طراحی هاب‌های انرژی محسوب می‌شوند، که با انرژی الکتریکی کار می‌کنند. EHPها تنها برای تولید گرمایش در زمستان و تولید سرمایش در تابستان مورد استفاده قرار می‌گیرند(والی‌پور و همکاران،۲۰۱۸). با توجه به اینکه در این مقاله، یک روز زمستانی مورد مطالعه قرار می‌گیرد، از EHP تنها به‌منظور تولید گرمایش استفاده می‌شود. که با توجه به معادله(۱۲) برق مصرفی،

1. Barati
2. Rakipour

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-17]

E_t^{EHP}، و گرمایش تولید شده، T_t^{EHP}، به‌وسیله ضریب عملکرد EHP، $COP_{thermal}^{EHP}$، به یکدیگر مرتبط می‌شوند. همچنین، انرژی گرمایش تولید شده توسط EHP در معادله(۱۳) محدود می‌شود(والی‌پور و همکاران،۲۰۱۸).

$$T_t^{EHP} = E_t^{EHP} \times COP_{thermal}^{EHP} \quad (۱۲)$$

$$T_{min}^{EHP} \leq T_t^{EHP} \leq T_{max}^{EHP} \quad (۱۳)$$

۵-۳. مدل‌سازی P۲G و ژنراتور اضطراری

P۲G از برق و آب به‌عنوان ورودی الکترولیز، برای تولید هیدروژن استفاده می‌کند(بودنی[1] و همکاران،۲۰۱۵)،(گروب[2] و همکاران،۲۰۱۸). هیدروژن تولید شده، تحت مرحله‌ای به‌نام متانیزاسیون به‌طور مستقیم به خطوط لوله گاز تزریق می‌شود و یا توسط مبدل‌های دیگر استفاده می‌شود(لی‌سنگ[3] و همکاران،۲۰۱۸). در رابطه(۱۴)، ارتباط بین برق مصرفی و هیدروژن تولیدی فرآیند الکترولیز ارائه شده‌است. در رابطه(۱۵)، ارتباط بین هیدروژن مصرفی و متان تولیدی فرآیند متانیزاسیون ارائه شده‌است. در روابط(۱۶) و (۱۷) مقدار برق مصرفی P۲G و مقدار برق تولیدی ژنراتور محدود شده‌است، که تمامی برق تولیدی ژنراتور تنها توسط واحد P۲G مصرف می‌شود. به‌دلیل اینکه گاز هیدروژن را نمی‌توان به مقدار زیاد وارد لوله‌های گاز طبیعی کرد، مقدار هیدروژن تزریقی به لوله‌ها($G_t^{H_2,direct}$) را باید محدود کرد، که رابطه(۱۸)این محدودیت را تعریف می‌کند(قلی‌زاده[4] و همکاران،۲۰۱۹).

$$E_t^{P2G} = G_t^{H_2,electrolyse} \times \eta^{electrolyse} \quad (۱۴)$$

$$G_t^{P2G} = G_t^{H_2,methanization} \times \eta^{methanization} \quad (۱۵)$$

$$E_{min}^{P2G} {}_t^{P2G} {}_{max}^{P2G} \quad (۱۶)$$

$$E_{min}^{DG} {}_t^{DG} {}_{max}^{DG} \quad (۱۷)$$

$$\frac{G_t^{H_2,direct}}{G_t^{H_2,direct} + G_t^{P2G} + F_t^{NGDS}} \leq \varepsilon \quad (۱۸)$$

1. Budny
2. Grube
3. Lyseng
4. Gholizadeh

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-17]

۳-٦. مدل‌سازی ذخیره‌سازها

فرآیند شارژ و تخلیه انرژی برای دو ذخیره‌ساز برق و گرمایش مشابه است، که به قیود شارژ/تخلیه انرژی، ظرفیت ذخیره‌ساز و قیود فنی بستگی دارد. میزان انرژی ذخیره شده، در معادله(۱۹) برای دوره‌های افق برنامه‌ریزی بیان شده و همچنین قیود مربوط به میزان انرژی ذخیره شده، در معادله(۲۰) تعریف شده‌است. قیود مربوط به میزان شارژ و تخلیه انرژی به ترتیب در معادلات(۲۱) و(۲۲) تعریف شده‌است و لازم به ذکر است که ذخیره‌ساز نمی‌تواند به‌طور همزمان شارژ و تخلیه انرژی را انجام دهد، که برای جلوگیری از شارژ و تخلیه همزمان، از متغیر باینری u_t^X استفاده شده‌است. معادله(۲۳) تضمین می‌کند که سطح شارژ اولیه ذخیره‌ساز با انتهای افق برنامه‌ریزی برابر باشد(وو[1] و همکاران،۲۰۱۷).

$$E_t^X = E_{t-1}^X + \eta^{X,ch} \times E_t^{X,ch} - E_t^{X,dch} \quad (۱۹)$$

$$E_{min}^X \le E_t^X \le E_{max}^X \quad (۲۰)$$

$$0 \le E_t^{X,ch} \le u_t^X \times E_{max}^{X,ch} \quad (۲۱)$$

$$0 \le E_t^{X,dch} \le (1 - u_t^X) \times E_{max}^{X,dch} \quad (۲۲)$$

$$E_{24}^X = E_0^X \quad (۲۳)$$

بالانویس X نوع ذخیره‌ساز را برحسب انرژی ذخیره شده در آن نشان می‌دهد، که ذخیره‌ساز برق(EES) و ذخیره‌ساز گرمایش(TES) می‌باشد. E_t^X انرژی ذخیره شده پس از شارژ/تخلیه انرژی است، درحالیکه E_{t-1}^X انرژی ذخیره شده قبل از شارژ/تخلیه انرژی در زمان t است. $E_t^{X,ch}$ میزان شارژ و $E_t^{X,dch}$ میزان تخلیه در زمان t است.

۳-۷. قیود مربوط به خطوط ارتباطی

میزان برق مبادله شده با شبکه برق، E_t^{EDS}، و گاز مبادله شده با شبکه گاز، F_t^{NGDS}، نباید از میزان حداکثر خط ارتباطی بین هاب انرژی با شبکه برق و گاز تجاوز کند، که این قیود در معادله(۲۴) و(۲۵) تعریف شده‌است.

$$E_{min}^{EDS} \le E_t^{EDS} \le E_{max}^{EDS} \quad (۲۴)$$

$$0 \le F_t^{NGDS} \le F_{max}^{NGDS} \quad (۲۵)$$

1. Wu

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-17]

۸-۳. تعادل انرژی

تعادل برق

$$E_t^{EDS} + E_t^{EES,dch} \times \eta^{EES,dch} + E_t^{CHP} + E_t^{WT} + E_t^{PV} = P_t^D + E_t^{EES,ch} + E_t^{EHP} \quad (۲۶)$$

تعادل گرمایش

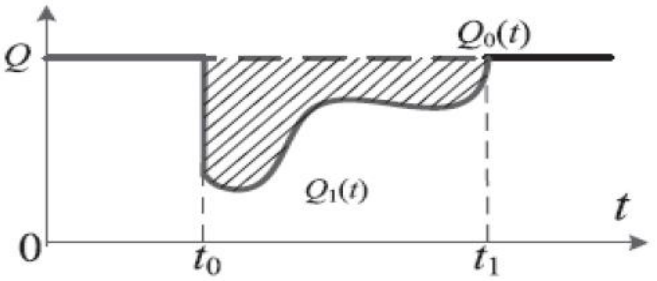
$$T_t^{CHP} + T_t^{Boiler} + E_t^{TES,dch} \times \eta^{HES,dch} + T_t^{EHP} = T_t^D + E_t^{TES,ch} \quad (۲۷)$$

تعادل گاز

$$F_t^{NGDS} + G_t^{P2G} + G_t^{H_2,direct} + E_t^{HES,dch} \times \eta^{HES,dch} = G_t^{Boiler} + G_t^{P,CHP} + G_t^{T,CHP} + E_t^{HES,ch} \quad (۲۸)$$

۹-۳. مدل‌سازی تاب‌آوری

تاب‌آوری و برگشت‌پذیری به توانایی سیستم در ایستادگی، در برابر وقایع با احتمال وقوع کم و اثرات تخریبی زیاد بواسطه‌ی به حداقل رساندن خاموشی‌ها و بازگشت به حالت عادی بهره‌برداری سیستم قدرت اطلاق می‌شود(آریوو[1]،۲۰۱۰). در سیستم‌های قدرت، ریزش بار به طور گسترده به عنوان اختلال شناخته می‌شود، که به طور مستقیم بر اثربخشی فرآیند بازیابی تاثیر می‌گذارد(هووا[2] و همکاران،۲۰۲۰). از دیدگاه شاخص تاب‌آوری سیستم ارائه شده توسط Bruneau (هووا و همکاران،۲۰۲۰)، عملکرد سیستم به صورت منبع بار در هر زمان t که در شکل ۳ نشان‌داده شده‌است، تعریف می‌شود.



شکل۲. مثلث تاب‌آوری(هووا و همکاران،۲۰۲۰)

1. Arroyo
2. Houa

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-17]

سپس، تاب‌آوری سیستم را می‌توان به صورت زیر تعیین کرد:

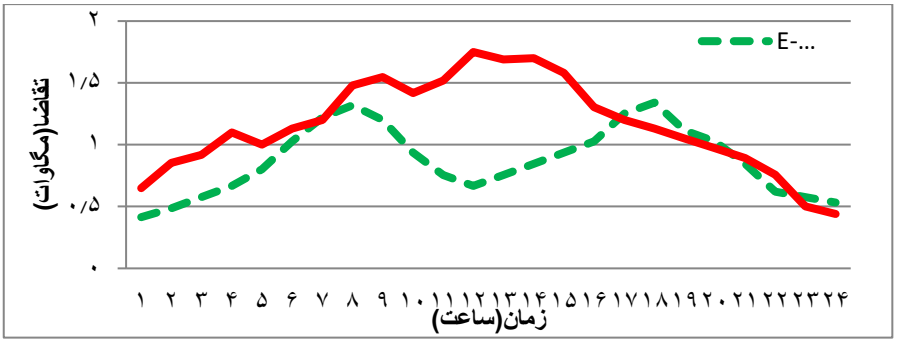
$$Resilience = \int_{t_0}^{t_1} \left[Q_0(t) - Q_1(t) \right] dt \quad (۲۹)$$

این شاخص برای ارزیابی تاب‌آوری کلی سیستم تحت یک اختلال خاص مورد استفاده قرار می‌گیرد. $Q_0(t)$ بیانگر تامین بار تحت حالت عادی است. $Q_1(t)$ مقدار ریزش بار پس از فروپاشی است که سپس پس از یک دوره زمانی $t = t_1 - t_0$ به سطح نرمال برمی‌گردد.

٤. مطالعات عددی

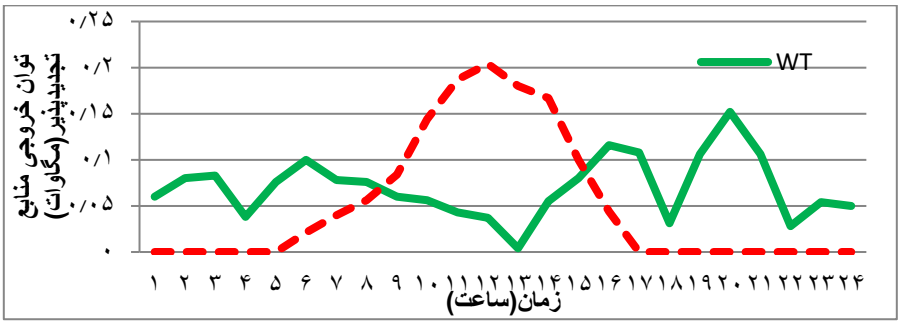
٤-١. داده‌ها و فرضیات

حداکثر مقدار برق و گاز دریافتی از شبکه برق وگاز به ترتیب ۰/۸۲ و ۳ مگاوات بر ساعت است. در این مقاله، تاب‌آوری هاب انرژی در زمان قطعی شبکه گاز برای ۹ ساعت متوالی طی یک شبانه‌روز(یک روز معمولی زمستانی) مورد مطالعه قرار گرفته‌است. تقاضاهای برق و گرمایش در این روز زمستانی در شکل۳ نشان داده شده‌است. توان خروجی توربین‌های‌بادی و پنل‌های فتوولتائیک در شکل۴ نشان داده شده‌است. همچنین هزینه برق و گاز طبیعی در شکل۵ و اطلاعات مربوط به پارامترهای اجزای هاب انرژی در جدول۱ نشان داده شده‌است. قابل ذکر است که طرح پیشنهادی به‌عنوان یک مسئله MINLP فرموله شده و در کم‌تر از یک دقیقه پس از اجرای یک کامپیوتر Corei5، 2.6GHz با رم 8GB توسط نرم‌افزار GAMS و حل‌کننده SBB حل شده‌است.



شکل۳. تقاضای برق و گرمایش هاب انرژی پیشنهادی(والی‌پور و همکاران،۲۰۱۸"با تغییر")

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-17]



شکل۴. توان خروجی توربین‌های بادی و پنل‌های فتوولتائیک هاب(وو[1] و همکاران،۲۰۱۷"با تغییر")



شکل ۵. هزینه خرید برق و گاز از شبکه(عبادی و همکاران،۲۰۱۹"با تغییر")، (والی‌پور و همکاران،۲۰۱۸)

جدول۱. پارامترهای اجزای هاب انرژی

پارامترهای منابع تجدیدپذیر				
γ^{ST} =۱۲۶	γ^{WT} =۲۸	γ^{PV} =۱۵۱		
پارامترهای CHP				
$\eta^{E,CHP}$ =۰/۴	E^{CHP}_{max} ۰/۶	E^{CHP}_{min} ۰/۰۲	T^{CHP}_{max} ۰/۵۵	T^{CHP}_{min} ۰
$\eta^{T,CHP}$ =۰/۳۵				
پارامترهای بویلر				
η^{Boiler} =۰/۹۵	T^{Boiler}_{max} =۰/۵	T^{Boiler}_{min} = ۰		

1. Wu

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-17]

پارامترهای EHP			
γ^{EHP} =۱	$COP_{thermal}^{EHP}$ =۲/۵	T_{max}^{EHP} =۰/۴۵	T_{min}^{EHP} =۰
پارامترهای ذخیره‌ساز برق			
$E_{max}^{EES,dch}$ =۰/۷	$E_{max}^{EES,ch}$ =۰/۷	E_{max}^{EES} =۱/۸	E_{min}^{EES} =۰/۴
γ^{EES} =۱	E_0^{EES} =۰/۴	$\eta^{EES,dch}$ =۰/۹	$\eta^{EES,ch}$ =۰/۹
پارامترهای ذخیره‌ساز گرما			
$E_{max}^{TES,dch}$ =۰/۷	$E_{max}^{TES,ch}$ =۰/۷	E_{max}^{TES} =۱/۸	E_{min}^{TES} =۰/۴
γ^{TES} =۱	E_0^{TES} =۰/۴	$\eta^{TES,dch}$ =۰/۹۶	$\eta^{TES,ch}$ =۰/۹۶
پارامترهای DG			
γ^{DG} =۴۲	E_{max}^{DG} ۰/۲۵	E_{min}^{DG} ۰	
پارامترهای P2G			
$\gamma^{electrolyse}$ =۱	$\eta^{methanization}$ =۰/۸۵	$\eta^{Electrolyse}$ =۰/۷	$\gamma^{methanization}$ =۱

۲-٤. مطالعات موردی

با هدف تجزیه و تحلیل بهره‌برداری بهینه هاب انرژی و بررسی تأثیر منابع تجدیدپذیر و تکنولوژی P۲G بر کاهش ریزش بار و افزایش تاب‌آوری سیستم در ساعات قطعی شبکه گاز، موضوع در سه سناریو مختلف بررسی می‌شود.

- سناریو۱: هاب انرژی با قطعی شبکه گاز، بدون WT وPV ، بدون P۲G.
- سناریو۲: هاب انرژی با قطعی شبکه گاز، با WT وPV ، بدون P۲G.
- سناریو۳: هاب انرژی با قطعی شبکه گاز، با WT وPV ، با P۲G.

۵. نتایج شبیه‌سازی

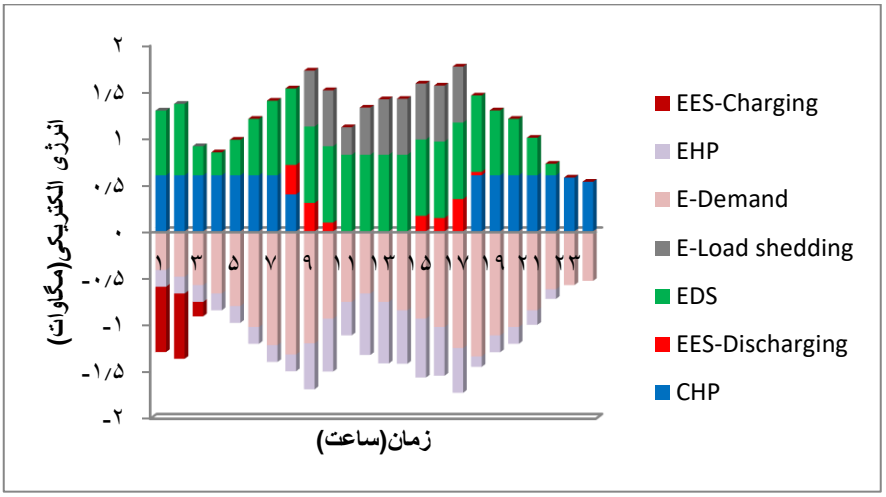
۱-۵. تعادل انرژی

تعادل برق برای سه سناریو در شکل۶ نشان داده شده‌است. در این شکل نمودارهای میله‌ای فوقانی تولید و نمودارهای میله‌ای پایینی مصرف را نشان می‌دهند. CHP از جمله دستگاه‌هایی است که با هدف کاهش خرید انرژی از شبکه برق و به دنبال آن کاهش هزینه بهره‌برداری در هاب‌های انرژی استفاده

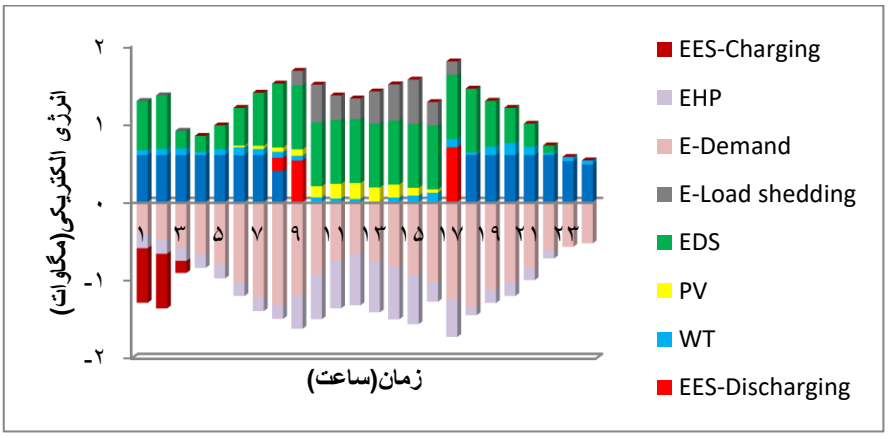
[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-17]

می‌شود. CHP به دلیل سوخت گازی که استفاده می‌کند، با قطعی شبکه گاز در ساعات ۹الی۱۷ خاموش می‌شود. CHP در تمامی ساعات در مدار بودن(ساعات ۱الی۸ و ۱۸الی۲۴) تقریباً نزدیک به حداکثر مقدار ممکن(۰/۶مگاوات بر ساعت) برق تولید می‌کند، که در این ساعات همان‌طور که در شکل۶ قابل مشاهده است، خرید برق از شبکه کم‌تر شده و دلیل این امر به‌صرفه بودن تولید برق، با CHP است. با این‌حال، در ساعات قطعی شبکه گاز(ساعات ۹الی۱۷) همراه با از مدار خارج شدن CHP، خرید برق از شبکه افزایش یافته و تقریباً به میزان حداکثر مقدار ممکن(۰/۸۲مگاوات بر ساعت) رسیده است. در هر سه سناریو، در ساعات۱ الی۳ که ساعات قیمت پایین برق و ساعات غیرپیک برق است، ذخیره‌ساز برق در حالت شارژ شدن است و در ساعات ۸ الی۱۰ و ۱۴ الی۱۸ که ساعات قیمت بالای برق و ساعات پیک برق است، ذخیره‌ساز در حالت تخلیه انرژی است. در سناریو۱ که هیچ تمهیداتی برای افزایش تاب‌آوری استفاده نشده، ریزش بار برق مقدار قابل توجهی است. در سناریو۲ برای کمک به بهره‌برداری بهتر سیستم از توربین‌های بادی و پنل‌های فتوولتائیک به‌عنوان منابع تجدیدپذیر استفاده شده که باعث کم شدن ساعات تخلیه EES شده و همچنین به میزان زیادی بر ریزش بار برق تأثیر گذاشته‌اند و سبب کاهش ریزش بار نسبت به سناریو۱ شده‌اند. در سناریو۳ علاوه‌بر استفاده از منابع تجدیدپذیر برای تولید برق به‌منظور کمک به تأمین گاز قطع شده از تکنولوژی جدید P۲G استفاده شده‌است که برق مورد نیاز P۲G توسط یک ژنراتور اضطراری تأمین می‌شود که همان‌طور که در شکل۶ قابل مشاهده است، برق مصرفی P۲G و برق تولیدی DG دقیقاً با هم برابر هستند. مقدار کمی از گاز تولیدی P2G، صرف تولید برق توسط CHP شده‌است و CHP در ساعات ۹ الی۱۷ نیز در مدار قرار گرفته‌است. با اینکه تولید برق CHP در ساعات قطعی شبکه گاز خیلی کم است، اما همین مقدار کم ریزش بار برق در سناریو۳ را نسبت به سناریوهای ۱ و۲ کم‌تر کرده و سبب افزایش تاب‌آوری سیستم شده‌است.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-17]

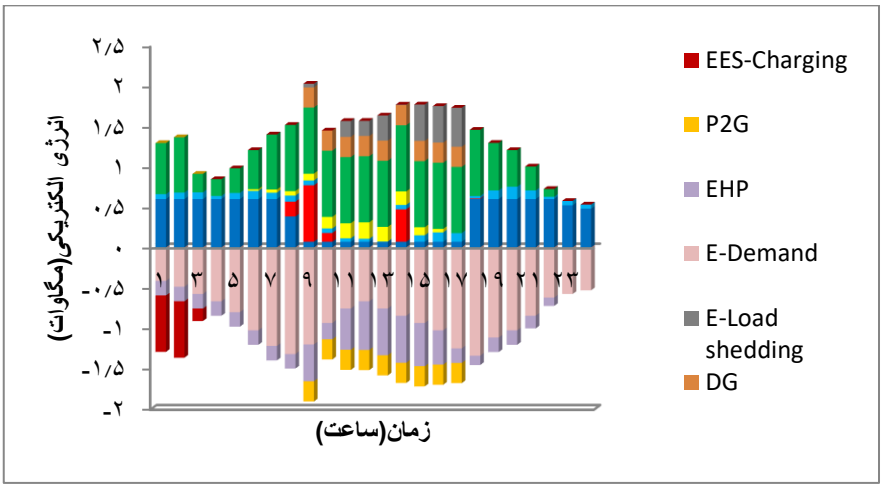


الف) سناریو۱



ب) سناریو۲

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-17]



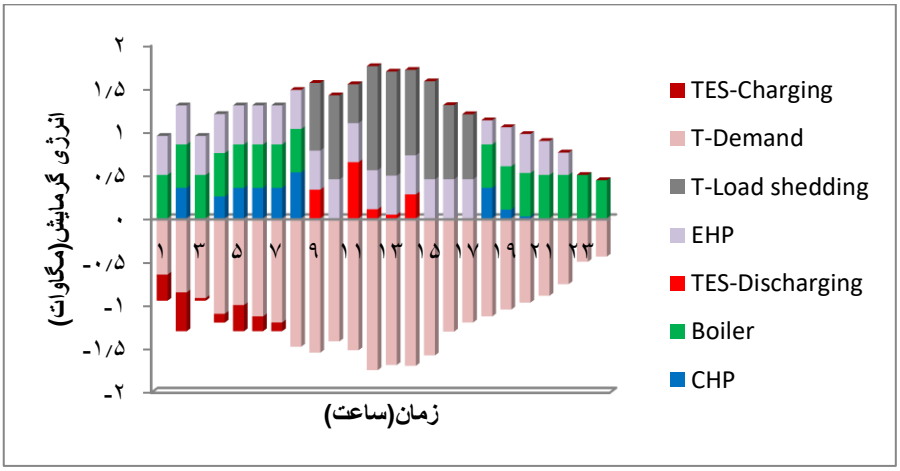
پ) سناریو۳

شکل۶. تعادل برق در سه سناریو

تعادل گرما برای سه سناریو در شکل۷ نشان داده شده‌است. در این شکل نمودارهای میله‌ای فوقانی تولید گرما و نمودارهای میله‌ای پایینی مصرف گرما را نشان می‌دهند. CHP علاوه‌بر تولید برق، گرما نیز تولید می‌کند ولی همان‌طور که در شکل۷ قابل مشاهده است، برخلاف تعادل برق که CHP در ساعات در مدار بودن به میزان حداکثر مقدار ممکن، برق تولید می‌کند، اما در این ساعات تولید گرمایش کمی دارد، یکی از دلایل این امر، بیشتر بودن مقدار بازده تولید برق CHP نسبت به بازده تولید گرمایش آن است. دلیل دوم بیشتر بودن مقدار بازده تولید گرمایش بویلر نسبت به CHP است، پس به‌صرفه‌تر است که از بویلر، بیشتر برای تولید گرمایش استفاده شود، که طبق شکل۷، بویلر در تمامی ساعات در مدار بودن تقریباً نزدیک به حداکثر مقدار ممکن(۰/۵مگاوات بر ساعت)گرمایش تولید می‌کند. در سه سناریو، در ساعات ۱الی۷ که ساعات غیرپیک گرمایش است، TES در حال شارژ شدن و در ساعات قطعی شبکه گاز که ساعات پیک گرمایش است، TES با قرار گرفتن در حالت تخلیه به تأمین انرژی گرمایش کمک می‌کند. علاوه‌بر CHP و بویلر، EHP نیز تولید کننده انرژی گرمایش است. همان‌طور که در شکل۷ قابل مشاهده است، EHP نیز در اکثر ساعات با وجود ضریب عملکرد پایین تقریباً نزدیک به حداکثر مقدار ممکن(۰/۴۵مگاوات بر ساعت)گرمایش تولید می‌کند، که دلیل این امر، این است که EHP از برق

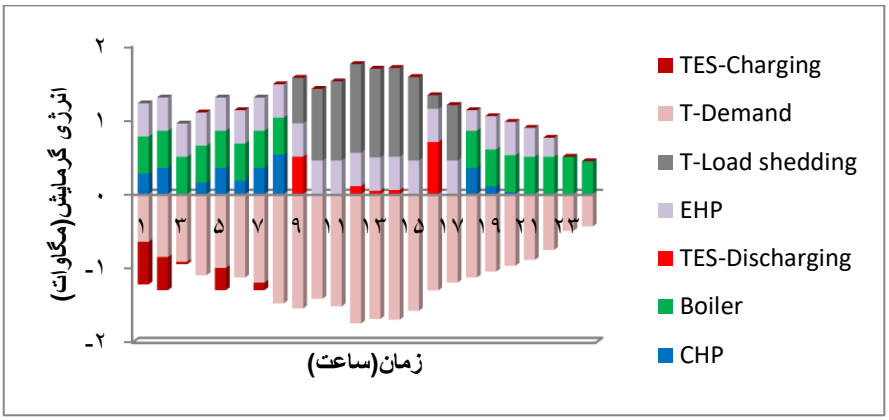
[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-17]

برای تولید گرمایش استفاده می‌کند و قطعی شبکه گاز خسارت بیشتری به بخش گرمایش هاب انرژی نسبت به بخش برق وارد می‌کند. در سناریو۱ که از منابع تجدیدپذیر و P۲G استفاده نشده، ریزش بار گرمایش به مقدار قابل توجهی بالاست. در سناریو۲ نیز که تنها از منابع تجدیدپذیر استفاده شده به این دلیل که منابع تجدیدپذیر مورد استفاده، تنها تولید کننده برق هستند، تأثیری بر ریزش بار گرمایش ندارند. در سناریو۳ که علاوه‌بر منابع تجدیدپذیر از P۲G نیز استفاده شده، CHP و بویلر در ساعات قطعی شبکه گاز نیز از مدار خارج نشده ولی با این حال CHP در این ساعات به تولید گرمایش کمک نمی‌کند، که دلیل آن کم‌تر بودن بازده گرمایش CHP نسبت به بویلر است. طبق شکل۷ بویلر در تمامی ساعات قطعی شبکه گاز به فعالیت خود ادامه داده و تا حدودی از ریزش بار گرمایش جلوگیری می‌کندو همانطور که قابل مشاهده است، ریزش بار گرمایش در سناریو۳ نسبت به سناریوهای ۱ و۲ کاهش یافته‌است.

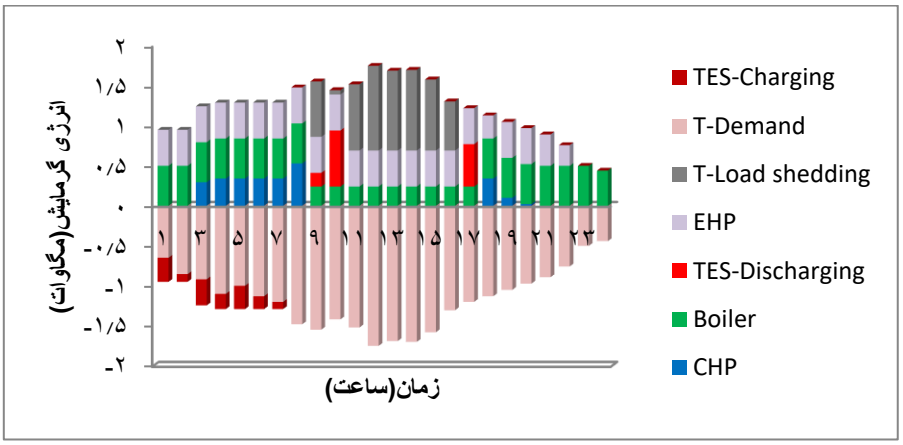


الف) سناریو۱

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-17]



ب) سناریو۲



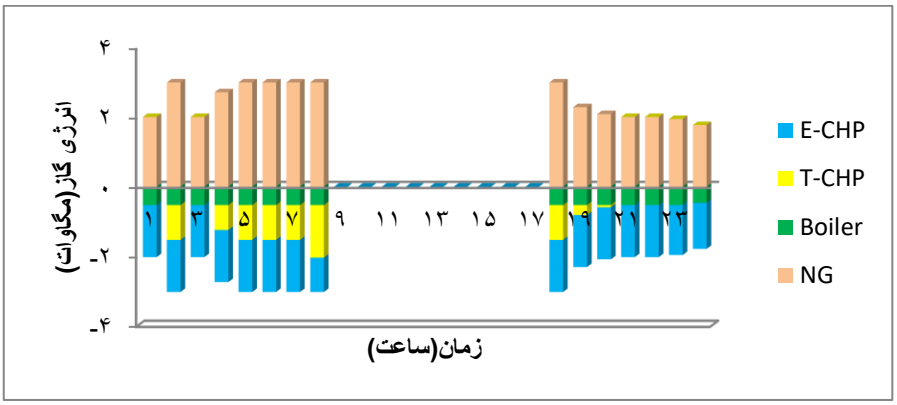
پ) سناریو۳

شکل۷. تعادل گرمایش در سه سناریو

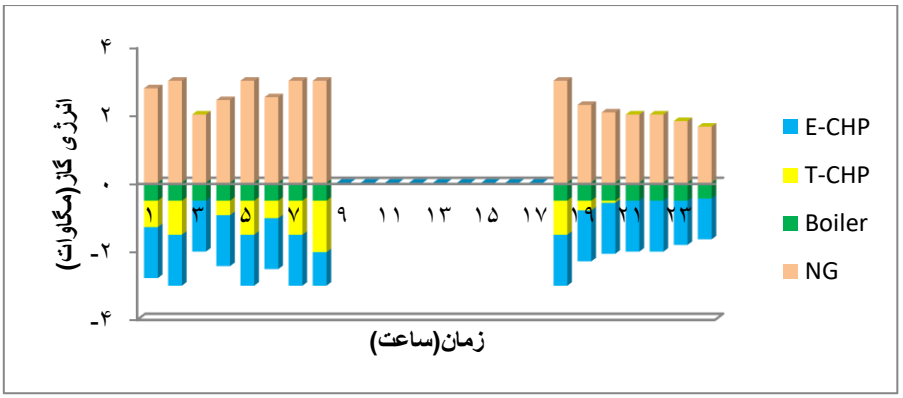
تعادل گاز برای سه سناریو در شکل۸ نشان داده شده‌است. در این شکل نمودارهای میله‌ای فوقانی تولید و خرید گاز و نمودارهای میله‌ای پایینی مصرف گاز را توسط مبدل‌ها نشان می‌دهند. در سناریو ۱ و۲ همان‌طور که در شکل۸ نشان داده شده، قابلیت خرید گاز از شبکه در ساعات ۹ الی ۱۷ به دلیل قطعی شبکه گاز طبیعی وجود ندارد. در این دو سناریو در تمامی ساعات ۱ الی۸ و ۱۸ الی ۲۴ گاز خریداری شده

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-17]

صرف تولید گرمایش توسط بویلر و تولید برق توسط CHP شده و در بعضی ساعات از گاز خریداری شده برای تولید گرمایش توسط CHP استفاده شده که همان‌طور که قبلاً گفته شد، دلیل این امر بازده کم گرمایش CHP است. در سناریو۳ که از P۲G استفاده شده، مقداری گاز توسط P۲G در ساعات قطعی شبکه گاز تولید شده‌است، که بیشتر آن به دلیل جبران ریزش بار زیاد گرمایش، صرف تولید گرمایش توسط بویلر و همچنین صرف تولید برق توسط CHP شده‌است. در سناریو۳، همان‌طور که قبلاً گفته شد، مقداری از هیدروژن تولیدی در فرآیند الکترولیز وارد خط لوله گاز شده که طبق شکل۸ در تمامی ساعات ۹ الی ۱۷ مقدار ناچیزی هیدروژن وارد خط لوله گاز شده که علت ناچیز بودن این مقدار، این است که ورود هیدروژن به خط لوله گاز بیشتر از یک مقدار محدود سبب خوردگی لوله‌ها می‌شود.

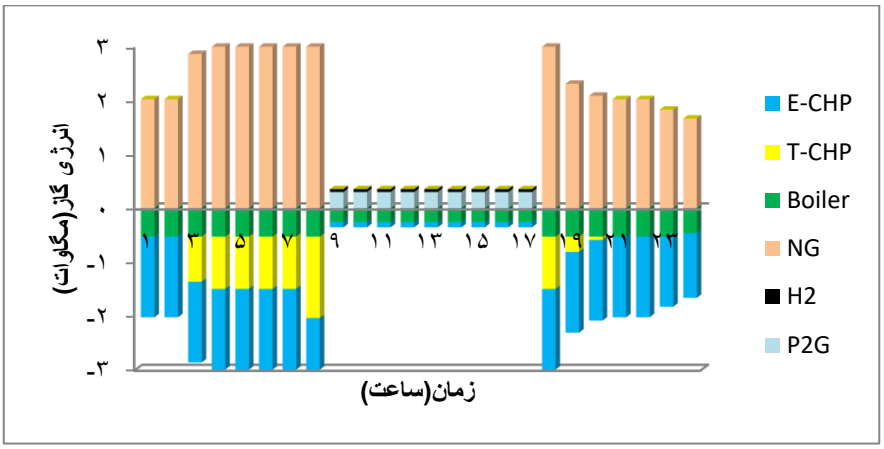


الف) سناریو۱



ب) سناریو۲

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-17]



پ) سناریو۳

شکل۸. تعادل گاز در سه سناریو

۲-۵. تحلیل تاب‌آوری و اقتصادی هاب انرژی

با توجه به نتایج به دست آمده فوق، تأثیر مشارکت منابع تجدیدپذیر و تکنولوژی P۲G در بهره‌برداری بهینه از هاب انرژی به خوبی قابل مشاهده است. در این مقاله تاب‌آوری هاب انرژی با توجه به مجموع میزان ریزش بار برق و گرمایش در ساعات قطعی شبکه گاز طبیعی برای سه سناریو مورد نظر محاسبه شده‌است، که دلیل این امر ارتباط بین بار برق و گرمایش است. همچنین هزینه جریمه بار تأمین نشده و هزینه کل برای هر سه سناریو در جدول۲ نشان داده شده‌است. با توجه به جدول۲، هزینه کل برای سناریو ۲ که در آن تنها از منابع تجدیدپذیر استفاده شده و سناریو ۳ که علاوه‌بر منابع تجدیدپذیر از P۲G نیز در آن استفاده شده، نسبت به سناریو۱ که در آن هیچ تمهیداتی برای بهبود تاب‌آوری استفاده نشده و هزینه کل در آن ۴۵۳۸/۸۳۷ دلار است، به ترتیب به ۴۲۷۸/۰۲۰ و ۳۷۴۵/۶۰۱ دلار کاهش یافته است. همچنین هزینه جریمه در سناریو۱، ۲۶۹۸/۰۴۶ دلار است، که در سناریو ۲ و ۳ به ترتیب به ۲۳۹۶/۲۰۵ و ۱۷۲۰/۵۴۲دلار کاهش یافته است. با توجه به جدول۳، تاب‌آوری کل سیستم در ساعات قطعی شبکه گاز طبیعی در سه سناریو به ترتیب برابر ۵۰/۷۴٪ – ۵۷/۵۲٪ – ۷۰/۸۶٪ است. این اعداد بیانگر افزایش تاب‌آوری هاب انرژی با بهره‌گیری از منابع تجدیدپذیر و P۲G در زمان قطعی شبکه گاز است.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-17]

جدول۲. نتایج در سناریوهای مختلف

تاب‌آوری(%)	تاب‌آوری(MWh)	جریمه($)	هزینه کل($)	سناریو
۵۰٪/۷۴	۱۳/۷۱۷	۲۶۹۸/۰۴۶	۴۵۳۸/۸۳۷	۱
۵۷٪/۵۲	۱۵/۵۴۹	۲۳۹۶/۲۰۵	۴۲۷۸/۰۲۰	۲
۷۰٪/۸۶	۲۰/۱۳۳	۱۷۲۰/۵۴۲	۳۷۴۵/۶۰۱	۳

٦. نتیجه‌گیری

این مقاله به برنامه‌ریزی بهینه یک هاب انرژی مبتنی بر CHP با هدف مینیمم کردن هزینه‌ها و بهبود تاب‌آوری می‌پردازد. به همین منظور یک هاب انرژی شامل CHP، بویلر، EHP و P۲G به همراه ژنراتور اضطراری، دستگاه‌های ذخیره‌ساز برق و گرمایش و توربین‌های بادی و پنل‌های خورشیدی به‌عنوان منابع تجدیدپذیر مدل‌سازی شده است. حوادث طبیعی و اقدامات خرابکارانه می‌توانند خسارات سنگینی بر زیرساخت‌های سیستم توزیع مانند شبکه برق و گاز طبیعی تحمیل نمایند. هاب انرژی به شبکه برق و گاز طبیعی متصل است و مهم‌ترین اجزای آن(CHP و بویلر)از سوخت گاز برای تولید انرژی استفاده می‌کنند. بنابراین خسارت در زیرساخت‌های شبکه گاز سبب ایجاد اختلال در تأمین تقاضای مصرف‌کنندگان هاب می‌گردد. لذا ضروری است که رفتار سیستم در شرایط وقوع این‌گونه اغتشاشات مطالعه شده و در صورت نیاز تمهیدات لازم جهت حفظ تاب‌آوری اندیشیده شود. در این مقاله به منظور بهبود تاب‌آوری و کاهش ریزش بار در شرایط قطعی شبکه گاز طبیعی، توربین‌های بادی و پنل‌های فتوولتائیک به عنوان منابع تجدیدپذیر و تکنولوژی P۲G همراه با ژنراتور اضطراری به‌کارگیری شده‌اند. استراتژی پیشنهادی با انجام مطالعات عددی در قالب سه سناریو مورد ارزیابی قرار گرفته‌است و از یک شاخص عددی جهت محاسبه دقیق تاب‌آوری استفاده شده‌است. نتایج نشان می‌دهد، در شرایط قطعی شبکه گاز، استفاده از توربین‌های بادی و پنل‌های فتوولتائیک به عنوان منابع تجدیدپذیر، به‌تنهایی سبب بهبود تاب‌آوری سیستم به‌میزان ۶/۷۸٪ می‌شود، که این مقدار بهبود، معادل ۱/۸۳۲مگاوات ساعت است. همچنین هزینه‌های بهره‌برداری و جریمه به ترتیب به میزان ۲۶۰/۸۱۷ و ۳۰۱/۸۴۱ دلار کاهش یافته است. همچنین، در صورت استفاده از تکنولوژی P۲G در کنار منابع تجدیدپذیر تاب‌آوری هاب انرژی به میزان ۲۰/۱۲٪ بهبود یافته است، که معادل ۶/۴۱۶ مگاوات ساعت است. در این حالت، هزینه‌های بهره‌برداری و جریمه به ترتیب به میزان ۷۹۳/۲۳۶ و ۹۷۷/۵۰۴ دلار کاهش یافته است. بنابراین، استراتژی

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-17]

پیشنهادی در شرایط قطعی شبکه گاز می‌تواند به شکل قابل توجهی بر بهبود تاب‌آوری و کاهش هزینه بهره‌برداری و جریمه بار تأمین نشده هاب انرژی تأثیرگذار باشد. لازم به ذکر است که مدل پیشنهادی در این مقاله قابل گسترش بوده و می‌توان در کارهای آینده علاوه بر تکنولوژی P^2G از منابع انرژی زیست توده برای کمک به تولید انرژی گاز، بهبود تاب‌آوری سیستم در شرایط قطعی شبکه گاز و کاهش هزینه بهره‌برداری استفاده کرد. همچنین می‌توان تأثیر استفاده از خودروهای الکتریکی بر بهبود تاب‌آوری را مورد بررسی قرار داد.

منابع

[1] Andersson, G. and Koeppel, G. (2006)"The influence of combined power, gas, and thermal networks on the reliability of supply". in The Sixth World Energy System Conference, Torino, Italy, July 10-12.

[2] Andersson, G. and Koeppel, G. (2009)"Reliability modeling of multi-carrier energy systems", Energy, 34(3), 235-244.

[3] Arroyo, J.M.(2010) "Bilevel programming applied to power system vulnerability analysis under multiple contingencies." IET generation, transmission & distribution 4(2): 178-190.

[4] Bucher. MA, et al.(2015) "Modeling and economic evaluation of power2gas technology using energy hub concept." In: 2015 IEEE power energy society general meeting; Denver, CO, USA 1‑5.

[5] Budny, C. et al.(2015) "Economic feasibility of pipe storage and underground reservoir storage options for power-to-gas load balancing." Energy Convers Manage 102: 258-266.

[6] Chen S, et al. (2017). "Multi-linear probabilistic energy flow analysis of integrated electrical and natural-gas systems." IEEE Transactions on Power Systems,32(3): 1970 – 1979.

[7] Cheng, Y. et al.(۲۰۲۰)," Optimization of multi-carrier energy system based on new operation mechanism modelling of power-to-gas integrated with CO2-based electrothermal energy storage", Energy,216: 119269

[8] Ebadi, A. et al.(2019)," Risk-based stochastic scheduling of energy hub system in the presence of heating network and thermal energy management", Applied Thermal Engineering 159 : 113825.

[9] Gholizadeh, N. et al,(2019)" Enhancement of demand supply' s security using power to gas technology in networked energy hubs", Electrical Power and Energy Systems 109:83‑94.

[10] Grube, T. et al.(2015). "Power to gas: technological overview, systems analysis and economic assessment for a case study in Germany." Int J Hydrogen Energy; 40(12): 4285-4294.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-17]

[11] Houa, K. et al. (2020),” A resilience assessment approach for power system from perspectives of system and component levels”, Electrical Power and Energy Systems 118: 105837.
[12] Kim, J.S. and Edgar, T.F.(2014) "Optimal scheduling of combined heat and power plants using mixed-integer nonlinear programming," Energy, 77: 675-690.
[13] Lyseng B, et al.(2018). “Systemlevel power-to-gas energy storage for high penetrations of variable renewables.” Int J Hydrogen Energy;43(4):1966‑1979.
[14] Moradi S, et al.(2017) “Optimal integrated sizing and planning of hubs with midsize/large chp units considering reliability of supply”. Energy Convers Manage;148:974–992.
[15] Muneeb, D. et al.(November 2013). “Specifications for a neighbourhood energy management tool. Deliverable D3.2 of IDEAS project. http://www.ideasproject.eu/IDEAS_wordpress/ [accessed December., 2020].
[16] Muneeb, D. et al. (2017) “Load forecasting and dispatch optimisation for decentralized co-generation plant with dual energy storage”, Applied Energy.186: 304-320
[17] Najafi-Ghalelou, A. et al. (2019) "Robust scheduling of thermal, cooling and electrical hub energy system under market price uncertainty", Applied Thermal Engineering, 149:862–880
[18] Panteli, M. and Mancarella, P. (2015) "Modeling and evaluating the resilience of critical electrical power infrastructure to extreme weather events," IEEE Systems Journal, 11(3): 1733 – 1742.
[19] Petchers, N.(2003) “Combined heating, cooling & power handbook: technologies & applications: an integrated approach to energy resource optimization.” The Fairmont Press.
[20] Rakipour, D. and Barati, H. , (2019),” Probabilistic optimization in operation of energy hub with participation of renewable energy resources and demand response”, Energy,173:384-399.
[21] Salehimaleh, M. et al. (2018). "Generalized modeling and optimal management of energy hub based electricity, heat and cooling demands" Energy, 159: 669-685.
[22] Seyedi.H, et al.(2018). “Enhancement of power system voltage stability in multi-carrier energy systems.” International Journal of Electrical Power & Energy Systems;99:344-354.
[23] Valipour, Kh. et al.(2018) "Generalized modeling and optimal management of energy hub based electricity, heat and cooling demands" Energy 159:669-685.
[24] Wang, H. et al.(2015) "Modelling and optimization of CHP based district heating system with renewable energy production and energy storage," Applied Energy, 159:401-421.
[25] Wu, J. et al. (2017),” Energy flow modeling and optimal operation analysis of the micro energy grid based on energy hub”, Energy Conversion and Management, 133: 292–306.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-17]

پیوست

فهرست اصطلاحات

کلمات اختصاری

CHP	تولید همزمان برق و گرما
EDS	سیستم توزیع برق
EES	ذخیره‌ساز برق
EH	هاب انرژی
EHP	پمپ الکتریکی-حرارتی
TES	ذخیره‌ساز گرمایش
$MINLP$	برنامه نویسی خطی عدد صحیح مختلط
$NGDS$	سیستم توزیع گاز طبیعی
PV	پنل فتوولتائیک
$P2G$	تکنولوژی تبدیل برق به گاز
WT	توربین بادی

شاخص ها

t	شاخص دوره‌های زمانی
X	نوع ذخیره‌ساز برحسب انرژی ذخیره شده در آن

پارامترها

γ_t^{NG} ،γ_t^{GE}	هزینه خرید برق و گاز طبیعی از شبکه بالادست در زمان t
γ^{WT} ،γ^{PV}	هزینه بهره‌برداری WT و PV
γ^{EHP}	هزینه بهره‌برداری EHP
$\gamma^{electrolyse}$، $\gamma^{methanization}$	هزینه فرآیند الکترولیز و متانیزاسیون

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-17]

γ^{TP} ،γ^{EP}	هزینه جریمه تقاضاهای تأمین نشده برق و گرمایش
γ^{X}	هزینه ذخیره‌سازهای انرژی
C_t^D ،T_t^D ،P_t^D	تقاضاهای برق، گرمایش و سرمایش
$\eta^{T,CHP}$،$\eta^{P,CHP}$	بازده تولید برق و گرمای CHP
E_{min}^{CHP} ،E_{max}^{CHP}	ماکزیمم و مینیمم برق خروجی از CHP
T_{min}^{CHP} ،T_{max}^{CHP}	ماکزیمم و مینیمم گرمای خروجی از CHP
η^{Boiler}	بازده بویلر
T_{min}^{Boiler} ،T_{max}^{Boiler}	ماکزیمم و مینیمم گرمای خروجی از بویلر
$\eta^{electrolyse}$، $\eta^{methanization}$	بازده فرآیندهای الکترولیز و متانیزاسیون
E_{min}^{P2G} ،E_{max}^{P2G}	ماکزیمم و مینیمم برق مصرفی P2G
E_{min}^{DG} ،E_{max}^{DG}	ماکزیمم و مینیمم برق تولیدی ژنراتور اضطراری
COP_{heat}^{EHP}	ضریب عملکرد پمپ الکتریکی-حرارتی
T_{min}^{EHP} ،T_{max}^{EHP}	ماکزیمم و مینیمم گرمای خروجی از پمپ الکتریکی-حرارتی
$E_{max}^{X,dch}$ ،$E_{max}^{X,ch}$	ماکزیمم و مینیمم شارژ و دشارژ هر ذخیره‌ساز
E_0^X ،E_{min}^X ،E_{max}^X	ماکزیمم و مینیمم و مقدار اولیه انرژی ذخیره شده در هر ذخیره‌ساز
$\eta^{X,dch}$ ،$\eta^{X,ch}$	بازده شارژ و دشارژ هر ذخیره‌ساز
E_{min}^{EDS} ،E_{max}^{EDS}	حداکثر و حداقل تعامل برق با EDS
F_{max}^{NGDS}	حداکثر توان دریافتی از سیستم توزیع گاز طبیعی

متغیرهای تصمیم‌گیری

E_t^{WT} ،E_t^{PV}	توان خروجی PV و WT در زمان t
$G_t^{T,CHP}$ ،$G_t^{P,CHP}$	گاز مصرفی برای تولید برق و گرما توسط CHP در زمان t

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-17]

E_t^{CHP} ،T_t^{CHP}	توان الکتریکی خروجی و گرمای خروجی واحد CHP در زمان t
T_t^{Boiler} ،F_t^{Boiler}	گرمای خروجی و مصرف سوخت بویلر در زمان t
T_t^{EHP} ،E_t^{EHP}	گرمای خروجی و برق ورودی واحد EHP در زمان t
E_t^{P2G}، $G_t^{H_2,electrolyse}$	برق مصرفی و هیدروژن تولیدی فرآیند الکترولیز
G_t^{P2G}، $G_t^{H_2,methanization}$	هیدروژن مصرفی و متان تولیدی فرآیند متانیزاسیون
$E_t^{X,ch}$ ،$E_t^{X,dch}$ ،E_t^{X}	میزان شارژ و دشارژ برق / گرمایش / سرمایش و میزان انرژی ذخیره شده در هر ذخیره ساز در زمان t
E_t^{LNS} ،T_t^{LNS}	بار تأمین نشده در زمان t
E_t^{EDS}	خرید/فروش برق از/به سیستم توزیع برق
F_t^{NGDS}	خرید گاز طبیعی از سیستم توزیع گاز طبیعی در زمان t

متغیرهای باینری

$u_t^{X,Y}$	متغیر باینری برای جلوگیری از شارژ و تخلیه همزمان ذخیره‌ساز انرژی

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-17]