

مدل بهینه‌سازی مقاوم برای مدیریت عدم قطعیت در سیستم هوشمند هاب انرژی و آب با در نظرگیری برنامه‌های پاسخگویی بار

سبحان دراهکی^۱

امیر عبداللهی^۲

زین العابدین صادقی گوغری^۳

مسعود رشیدی نژاد^{۴*}

محمد رضا صالحی زاده^۵

۱- دانشجوی دکتری- گروه مهندسی برق - دانشگاه شهید باهنر - کرمان - ایران

sobhandorahaki@gmail.com

۲- دانشیار- گروه مهندسی برق- دانشگاه شهید باهنر- کرمان- ایران

a.abdollahi@uk.ac.ir

۳- دانشیار - دانشکده اقتصاد و مدیریت - دانشگاه شهید باهنر - کرمان - ایران

z_sadeghi@uk.ac.ir

۴- استاد- گروه مهندسی برق- دانشگاه شهید باهنر- کرمان- ایران

mrashidi@uk.ac.ir

۵- استادیار - گروه مهندسی برق، دانشکده فنی و مهندسی واحد مرودشت، دانشگاه آزاد اسلامی، مرودشت، ایران

salehizadeh@miau.ac.ir

چکیده: مدیریت یکپارچه آب و دیگر حامل‌های انرژی مانند برق، گاز و توان حرارتی سبب ارتقای بازده اقتصادی در هاب انرژی می‌گردد. یکی از چالش‌های عمده‌ای که مانع اثربخشی این مدیریت یکپارچه می‌شود عدم قطعیت قیمت برق در بازار بالادست است. برای حل این مشکل، این مقاله یک روش بهینه‌سازی مقاوم برای مدیریت عدم قطعیت در مدل یکپارچه هاب هوشمند انرژی و آب ارائه می‌دهد. در رویکرد مقاوم پیشنهادی، تابع هدف با توجه به مجموعه عدم قطعیت مسئله بهینه می‌شود. پاسخ بهینه به دست آمده توسط روش پیشنهادی بهترین استراتژی را با توجه به رفتار بهره بردار سیستم نسبت به ریسک ارائه می‌دهد. مدل بهینه‌سازی مقاوم انرژی و آب پیشنهادی یک مدل بهینه‌سازی خطی آمیخته با اعداد صحیح است که توسط حلگر سیپلکس در محیط گمز حل می‌شود. اثربخشی روش پیشنهادی در یک مطالعه موردی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که هزینه بهره‌برداری مدل پیشنهادی تقریباً در بدترین حالت ۱,۶ درصد افزایش می‌یابد. با این حال، میزان مقاوم بودن سیستم به طور قابل توجهی افزایش یافته است.

واژه‌های کلیدی: هاب انرژی و آب، برق، بهینه‌سازی مقاوم، مدیریت آب، برنامه‌های پاسخگویی بار.

نوع مقاله: پژوهشی

DOI: 10.52547/jiaeee.19.1.89

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۰/۰۱/۰۴

تاریخ پذیرش مشروط مقاله: ۱۴۰۰/۰۳/۲۲

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۰۴/۲۱

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر مسعود رشیدی نژاد

نشانی نویسنده‌ی مسئول: ایران - کرمان - میدان پژوهش - دانشکده مهندسی - دانشگاه شهید باهنر کرمان

جدول علائم و نشانه‌ها	
اندیس‌ها	t شاخص زمان
پارامترها	π_{net}^E قیمت برق
	π_{wind}^E قیمت بهره‌برداری از توربین بادی
	π_{net}^G قیمت گاز
	π_{net}^T قیمت حرارت
	π_{Drink_water} قیمت آب آشامیدنی ورودی
	$\pi_{Sea\ to\ drink}^{Des}$ ضریب بهره‌برداری از آب شیرین کن
	π_{op}^T هزینه بهره‌برداری از واحد ذخیره‌ساز حرارتی
	π_{op}^E هزینه بهره‌برداری از واحد ذخیره‌ساز الکتریکی
	$W_{storage-max}$ ظرفیت ذخیره‌ساز حرارتی
	W_{max-ch} بیشترین مقدار آب ورودی در یک ساعت
	$W_{max-dis}$ بیشترین مقدار آب خروجی در یک ساعت
	LPF_{up}^E ضریب مشارکت در برنامه پاسخگویی بار الکتریکی بالارونده
	LPF_{down}^E ضریب مشارکت در برنامه پاسخگویی بار الکتریکی پایین رونده
	β_{min}^E کمینه ظرفیت ذخیره‌ساز الکتریکی
	β_{max}^E کمینه ظرفیت ذخیره‌ساز الکتریکی
	β_{min}^H کمینه ظرفیت ذخیره‌ساز حرارتی
	β_{max}^H کمینه ظرفیت ذخیره‌ساز حرارتی
	$\eta_{sea\ to\ drink}$ ضریب بهره‌وری تبدیل آب شیرین کن
	η_{Trans}^{EE} ضریب راندمان ترانسفورماتور
	η_{CHP}^{GE} ضریب راندمان تولیدکننده واحد تولیدی هم‌زمان برق و حرارت
	η_{Conv}^{EE} ضریب راندمان کانورتر
	P_{demand}^E بار الکتریکی
	P_{demand}^G بار گاز
	P_{demand}^T بار حرارتی
	P_{demand}^{water} بار آب
	η_{CHP}^{GT} ضریب کارایی واحد تولیدی هم‌زمان برق و حرارت
	η_{Boil}^{GT} ضریب کارایی واحد بویلر
	$P_{net-max}^T$ بیشینه توان حرارتی ورودی از شبکه بالادست
	$P_{net-max}^G$ بیشینه توان گاز ورودی از شبکه بالادست
	$P_{net-max}^E$ بیشینه توان الکتریکی ورودی از شبکه بالادست
	$W_{net-max}^E$ بیشینه آب ورودی از شبکه بالادست
	W_{DW-max} بیشینه آب خروجی آب شیرین کن
	P_{CAPA}^E ظرفیت ذخیره‌کننده الکتریکی
	P_{CAPA}^H ظرفیت ذخیره‌کننده حرارتی
	g_{loss}^E ضریب تلفات الکتریکی ذخیره‌کننده الکتریکی
	g_{loss}^H ضریب تلفات الکتریکی ذخیره‌کننده حرارتی
	α_{min}^E ضریب کمینه استفاده از ظرفیت ذخیره‌کننده الکتریکی
	α_{max}^E ضریب بیشینه استفاده از ظرفیت ذخیره‌کننده الکتریکی
	α_{min}^H ضریب کمینه استفاده از ظرفیت ذخیره‌کننده حرارتی
متغیرها	
ضریب بیشینه استفاده از ظرفیت ذخیره‌کننده حرارتی	α_{max}^H
ضریب راندمان شارژ ذخیره‌کننده الکتریکی	η_{ES}^{ch}
ضریب راندمان دشارژ ذخیره‌کننده الکتریکی	η_{ES}^{dis}
ضریب راندمان شارژ ذخیره‌کننده حرارتی	η_{HS}^{ch}
ضریب راندمان دشارژ ذخیره‌کننده حرارتی	η_{HS}^{dis}
مجموع هزینه‌های برق	$Cost_{Electrical}$
مجموع هزینه‌های گاز	$Cost_{Gas}$
مجموع هزینه‌های حرارت	$Cost_{Thermal}$
مجموع هزینه‌های آب	$Cost_{water}$
مجموع هزینه‌های ذخیره‌ساز الکتریکی	$Cost_{ES}$
مجموع هزینه‌های حرارتی	$Cost_{TS}$
توان الکتریکی ورودی از شبکه بالادست	P_{net}^E
توان واحد بادی	P_{wind}^E
گاز ورودی از شبکه بالادست	P_{net}^G
حرارت ورودی از شبکه بالادست	P_{net}^T
آب آشامیدنی ورودی	W_{Drink_water}
آب خروجی از واحد آب شیرین کن	$W_{Sea\ to\ drink}^{Des}$
شارژ ذخیره‌ساز حرارتی	P_{ch}^T
دشارژ ذخیره‌سازی حرارتی	P_{dis}^T
شارژ ذخیره‌ساز الکتریکی	P_{ch}^E
دشارژ ذخیره‌ساز الکتریکی	P_{dis}^E
بار بالارونده شرکت‌کننده در پاسخگویی بار	P_{up}^E
بار پایین رونده شرکت‌کننده در پاسخگویی بار	P_{down}^E
وضعیت سطح آب ذخیره‌ساز آب	$W_{storage}$
آب دریا	W_{sea}
گاز ورودی به واحد تولیدی هم‌زمان برق و حرارت	P_{netCHP}^G
گاز ورودی به واحد بویلر	$P_{netboil}^G$
بار بالارونده شرکت‌کننده در پاسخگویی بار	P_{down}^T
بار پایین رونده شرکت‌کننده در پاسخگویی بار	P_{up}^T
آب خروجی از ذخیره‌کننده آب	W_{dis}
آب ورودی از ذخیره‌کننده آب	W_{ch}
توان ورودی به ترانسفورماتور قدرت	P_{trans}^{input}
توان ورودی به مبدل CHP	P_{CHP}^{input}
توان ورودی به مبدل بویلر	P_{Boiler}^{input}
وضعیت شارژ ذخیره‌ساز الکتریکی	P_s^E
تلفات توان الکتریکی	P_{loss}^E
متغیر باینری دشارژ ذخیره‌سازی حرارتی	I_{dis}^H
متغیر باینری شارژ ذخیره‌سازی حرارتی	I_{CH}^H
متغیر باینری آب ورودی به ذخیره‌ساز آب	I_{ch}^W
متغیر باینری آب خروجی به ذخیره‌ساز آب	I_{dis}^W
متغیر باینری برق ورودی به ذخیره‌ساز الکتریکی	I_{up}^E
متغیر باینری برق خروجی به ذخیره‌ساز الکتریکی	I_{down}^E
متغیرهای باینری	

$$I_{ch}^E \quad \text{متغیر باینری شارژ ذخیره‌کننده الکتریکی}$$

$$I_{dis}^E \quad \text{متغیر باینری دشارژ ذخیره‌کننده الکتریکی}$$

۱- مقدمه

ارتقای بهره‌وری اقتصادی سیستم‌های انرژی یکی از جنبه‌های مهم مسائل مربوط به انرژی است [۱]. علاوه بر این، رشد فزاینده بار الکتریکی و همچنین بحران منابع آب نیاز به مدیریت بهینه انرژی و آب را در کنار یکدیگر در جهان افزایش داده است [۲]. در این راستا، سیستم‌های هاب انرژی می‌توانند به عنوان یک راهکار مناسب برای این مساله مطرح شوند [۳]. بهره‌برداری از این گونه سیستم‌ها نسبت به تغییر قیمت انرژی در بازارهای بالادستی انرژی بسیار تأثیرپذیر است. بنابراین در نظریه عدم قطعیت‌های ناشی از قیمت در بهره‌برداری از هاب انرژی یکی از اولویت‌های مطالعاتی بوده که باید به‌صورت ویژه به آن توجه داشت [۴]. بدون مدیریت مناسب عدم قطعیت‌ها، نتایج مدیریت هاب انرژی در شرایط مختلف بهره‌برداری یا پایداری لازم را دارا نیست و یا از دیدگاه اقتصادی بهره‌وری لازم را در پی نخواهد داشت. در [۵]، عدم قطعیت پارامترهای مسئله توسط تابع توزیع احتمال مدل‌سازی شده است. با این حال، تأمین آب آشامیدنی در مطالعه ذکر شده نادیده گرفته شده است. در [۶]، مدل مدیریت انرژی در یک هاب انرژی ارائه شده که در آن مسائل اقتصادی و زیست‌محیطی به‌صورت توأمان در نظر گرفته شده است. نویسندگان در [۷] معتقدند که انتشار گازهای گلخانه‌ای نقش بسزایی در برنامه‌ریزی انرژی سیستم قدرت هوشمند دارد. سیاست‌های دموکراسی انرژی دارای پتانسیل مناسبی برای انتشار گازهای گلخانه‌ای و کاهش هزینه عملیات سیستم هاب انرژی هوشمند است. عدم تمرکز سیستم‌های انرژی اولین گام در توسعه دموکراسی انرژی در جوامع هوشمند است [۸]. در واقع، در سیستم‌های انرژی کنونی، مشترکین به‌صورت غیرمستقیم می‌توانند در برنامه‌ریزی بهینه شبکه هوشمند مشارکت کرده و بهره‌برداری از سیستم را منعطف‌تر سازند. علاوه بر این، افزایش قدرت انتخاب انرژی مشترکین یکی از مهم‌ترین جنبه‌های حوزه انرژی دموکراتیک است. استفاده از سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی الکتریکی و برنامه‌های پاسخگویی بار به عنوان سیاست‌های دموکراسی انرژی مناسب‌ترین انتخاب برای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و هزینه‌های بهره‌برداری در سیستم هاب انرژی هستند. در [۹]، اثرات برنامه‌های پاسخگویی بار بر هزینه اجتماعی سیستم مورد بررسی قرار گرفته است. علاوه بر این، هزینه بهره‌برداری سیستم هاب انرژی و هزینه جریمه بارهای تأمین نشده به عنوان هزینه اجتماعی سیستم قدرت در نظر گرفته شده است. در [۱۰]، اثرات کاهش هزینه بهره‌برداری برنامه‌های پاسخگویی بار و برنامه‌های بهره‌وری انرژی در شبکه هوشمند مورد ارزیابی قرار گرفته است. در [۱۱]، یک مدل جامع برای برنامه‌های پاسخگویی بار با در نظرگیری تبعات اجتماعی ناشی از اجرای این برنامه‌ها ارائه شده است. نقش بهره‌وری انرژی و برنامه‌های پاسخگویی بار در شبکه‌های هوشمند در [۱۲] ارزیابی شده است.

همچنین، [۱۳] نشان می‌دهد که ذخیره‌سازی انرژی و برنامه‌های پاسخگویی بار نقش مهمی در سیستم‌های هاب انرژی دارد. در [۱۴]، یک مدل برنامه پاسخگویی بار برای افزایش کارایی اقتصادی سیستم هاب انرژی ارائه شده است. در [۱۵]، یک سیستم هاب انرژی مبتنی بر فناوری‌های ذخیره انرژی در قالب هوای فشرده در حضور بارهای قابل جابه‌جایی ارائه شده است. در [۱۶]، یک مدل ذخیره‌سازی انرژی سرمایه‌ی مبتنی بر عدم قطعیت برای بهبود عملکرد اقتصادی هاب انرژی ارائه شده است. در این مقاله رفتار تصادفی تابش خورشید و سرعت باد به عنوان پارامترهای عدم قطعیت در نظر گرفته شده است. نتایج مطالعه مذکور مزایای ذخیره انرژی سرمایه‌ی در سیستم هاب انرژی هوشمند را نشان می‌دهد.

در پژوهش کنونی، یک مدل بهینه‌سازی هاب انرژی با در نظرگیری توأمان حامل‌های انرژی و همچنین منابع تأمین آب ارائه شده است. به منظور ارتقای بهره‌وری انرژی سیستم هاب انرژی پیشنهادی تمامی حامل‌های انرژی مورد نیاز در هاب انرژی از قبیل برق، حرارت، گاز و آب به‌صورت یکپارچه در نظر گرفته شده‌اند. علاوه بر این، روش بهینه‌سازی مقاوم برای مدیریت اثرات عدم قطعیت قیمت‌های برق شبکه بالادست استفاده شده است. روش پیشنهادی از نوع برنامه‌ریزی خطی آمیخته با اعداد صحیح بوده که در نرم‌افزار گمز و با استفاده از حلگر سیپلکس حل گردیده است. بنابراین نوآوری‌های مقاله را می‌توان در قالب موارد زیر خلاصه کرد:

- مدل‌سازی سیستم آب‌شیرین‌کن و سیستم ذخیره آب
- استفاده از روش عدم قطعیت بهینه‌سازی مقاوم برای مدل‌سازی عدم قطعیت قیمت
- در نظرگیری پاسخگویی حرارتی و الکتریکی در مدل هاب انرژی بدین منظور، ساختار مدل پیشنهادی و همچنین روابط ریاضی مسئله در بخش ۲ ارائه شده‌اند. نتایج مطالعه عددی و شبیه‌سازی در بخش ۳ ارائه شده است.

۲- ساختار پیشنهادی

در این مقاله، یک ساختار جدید برای بهره‌برداری از هاب انرژی با در نظرگیری انواع حامل‌ها و همچنین زیرساخت تأمین آب آشامیدنی برای یکپارچه‌سازی ساختار هاب انرژی پیشنهاد داده شده است. بدین منظور، عدم قطعیت قیمت انرژی به عنوان یک پارامتر عدم قطعیت در نظر گرفته شده و با روش بهینه‌سازی مقاوم مدل‌سازی شده است. حامل‌های انرژی الکتریکی، حرارتی، گاز و آب ورودی‌های سیستم هستند که با تبدیل انرژی‌های مختلف باید بار سیستم را به گونه بهینه و با بهره‌وری بالا تأمین نمایند.

با نیل به هدف افزایش بهره‌وری و هم‌افزایی، منابع تبدیل انرژی مختلفی درون هاب انرژی در نظر گرفته شده است. واحد بویلر، واحد ذخیره‌سازی حرارتی و همچنین واحد تولید هم‌زمان برق و حرارت تأمین‌کننده‌های اساسی انرژی حرارتی درون ساختار هاب انرژی هستند. همچنین، واحد بادی، واحد میکروتوربین و ذخیره‌ساز

$$Cost(t)_{water} = [\pi_{Drink_water}(t)W_{Drink_water}(t)] + [\pi_{Sea\ to\ drink}^{Des}W_{Sea\ to\ drink}^{Des}(t)] \quad (5)$$

هزینه ذخیره‌ساز الکتریکی و حرارتی به صورت (۶) و (۷) است:

$$Cost(t)_{TS} = [\pi_{op}^T(P_{ch}^T(t) + P_{dis}^T(t))] + [\pi_{net}^T(t)(P_{ch}^T(t) - P_{dis}^T(t))] \quad (6)$$

$$Cost(t)_{ES} = [\pi_{op}^E(P_{ch}^E(t) + P_{dis}^E(t))] + [\pi_{net}^E(t)(P_{ch}^E(t) - P_{dis}^E(t))] \quad (7)$$

هزینه برنامه‌های پاسخگویی بار در (۸) ذکر شده است:

$$Cost(t)_{DRPs} = \pi_{DRP}^E(P_{down}^E(t, s) + P_{up}^E(t, s)) + \pi_{DRP}^T(P_{down}^T(t, s) + P_{up}^T(t, s)) \quad (8)$$

محدودیت تعادل انرژی باید در عملکرد سیستم‌های هاب انرژی در نظر گرفته شود. در این راستا، محدودیت‌های تعادل انرژی الکتریکی،

حرارتی، گاز و آب به صورت (۹) - (۱۲) بیان شده است:

$$[\eta_{Trans}^{EE}P_{net}^E(t)] + [\eta_{CHP}^{GE}P_{netCHP}^G(t)] + [\eta_{Conv}^{EE}P_{wind}^E(t)] + [P_{dis}^E(t, s) - P_{ch}^E(t)] + [P_{down}^E(t) - P_{up}^E(t)] + W_{Sea\ to\ drink}^{Des}(t)\sigma_{P2W} = P_{demand}^E(t) \quad (9)$$

$$P_{net}^G(t) - P_{netCHP}^G(t) - P_{netBoil}^G(t) = P_{demand}^G(t) \quad (10)$$

$$[\eta_{CHP}^{GT}P_{netCHP}^G(t)] + [\eta_{Boil}^{GT}P_{netBoil}^G(t)] + P_{net}^T(t) + [P_{dis}^T(t) - P_{ch}^T(t)] + [P_{down}^T(t) - P_{up}^T(t)] = P_{demand}^T(t) \quad (11)$$

$$W_{Sea\ to\ drink}^{Des}(t) + W_{Drink_water}(t) + \left[\frac{W_{dis}(t)}{-W_{Ch}(t)} \right] = P_{demand}^{water}(t) \quad (12)$$

محدودیت‌های توان ورودی الکتریکی، حرارتی، گاز و آب آشامیدنی از شبکه بالادست به ترتیب در (۱۳) - (۱۶) ارائه است [۱۳]:

$$0 \leq P_{net}^E(t) \leq P_{net-max}^E \quad (13)$$

$$0 \leq P_{net}^T(t) \leq P_{net-max}^T \quad (14)$$

$$0 \leq P_{net}^G(t) \leq P_{net-max}^G \quad (15)$$

$$0 \leq W_{Drink_water}(t) \leq W_{DW-max} \quad (16)$$

قدرت ورودی ترانسفورماتور توزیع به صورت (۱۷) مدل می‌شود:

$$0 \leq P_{net}^E(t) \leq P_{trans}^{input} \quad (17)$$

گاز ورودی CHP و بویلر به صورت (۱۸) و (۱۹) محدود می‌شود:

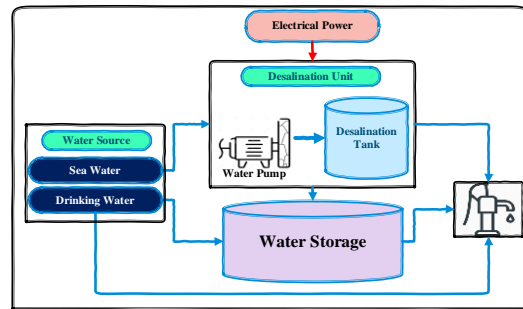
$$0 \leq P_{netCHP}^G(t) \leq P_{CHP}^{input} \quad (18)$$

$$0 \leq P_{netB}^G(t) \leq P_{boiler}^{input} \quad (19)$$

منابع ذخیره‌کننده الکتریکی از نظر کاهش هزینه بهره‌برداری و کاهش انتشار آلودگی‌های زیست‌محیطی برای شبکه‌های هوشمند و هاب‌ها بسیار اجزای مهمی هستند. در ادامه، روابط (۲۰) - (۲۵) نحوه عملکرد سیستم ذخیره‌سازی الکتریکی را مدل می‌کنند [۱۷].

الکتریکی وظیفه تولید و ذخیره انرژی در ساختار پیشنهادی را بر عهده دارند.

چنانچه در بخش‌های فوق یاد شد، هدف اصلی ساختار پیشنهادی این مقاله مدیریت حامل‌های آب و انرژی در کنار یکدیگر است. یکی از بخش‌های اساسی هاب انرژی که در آن با استفاده از مدیریت انرژی صحیح میان منابع مختلف می‌توان بهره‌وری سیستم را بالاتر برد سیستم تأمین آب آشامیدنی است. شکل ۱ زیرساخت تأمین آب آشامیدنی را نشان می‌دهد. آب آشامیدنی در زیرساخت پیشنهادی با آب آشامیدنی مستقیم از شبکه آب بالادستی و واحد آب‌شیرین‌کن داخلی در سیستم هاب انرژی تأمین می‌شود. ورودی واحد آب‌شیرین‌کن توان الکتریکی و آب شور دریا است. از آن جایی که قیمت برق شبکه بالادستی در بعضی از زمان‌ها متفاوت است این مسئله می‌تواند یک پتانسیل خوب را برای مدیریت انرژی میان آب آشامیدنی ورودی، برق و آب آشامیدنی خروجی آب‌شیرین‌کن ایجاد نماید. همچنین مدل پیشنهادی، در کشورهایی که با توجه به شکل بازار برق کشورشان در بعضی از ساعات قیمت برق منفی می‌شود می‌تواند یک گزینه بسیار جذاب باشد.



شکل (۱): زیرساخت تأمین آب آشامیدنی در هاب انرژی

۲-۱- مدل‌سازی ریاضی

هزینه بهره‌برداری از سیستم هاب انرژی به صورت رابطه (۱) است:

$$\text{Min} \sum_t \left(\begin{matrix} \text{Cost}(t)_{Electrical} + \text{Cost}(t)_{Gas} + \\ \text{Cost}(t)_{Thermal} + \text{Cost}(t)_{Water} + \\ \text{Cost}(t)_{HS} + \text{Cost}(t)_{TS} + \text{Cost}(t)_{DRP} \end{matrix} \right) \quad (1)$$

اولین بخش رابطه (۱) هزینه توان ورودی از شبکه اصلی و هزینه بهره‌برداری واحد بادی است که در (۲) نشان داده شده است:

$$\text{Cost}(t)_{Electrical} = [\pi_{net}^E(t)P_{net}^E(t)] + [\pi_{wind}^E P_{wind}^E(t)] \quad (2)$$

علاوه بر این، بخش‌های دوم و سوم رابطه (۱) هزینه گاز ورودی و حرارت ورودی به هاب انرژی هستند:

$$\text{Cost}(t)_{Gas} = [\pi_{net}^G(t)P_{net}^G(t)] \quad (3)$$

$$\text{Cost}(t)_{Thermal} = [\pi_{net}^T(t)P_{net}^T(t)] \quad (4)$$

تقاضای آب هاب انرژی با ورودی آب آشامیدنی و آب دریا تأمین می‌شود که به صورت رابطه (۵) مدل می‌گردد:

واحد آب شیرین کن دارای ضریب بهره‌وری است که در (۳۷) مدل شده است:

$$W_{Sea}^{Des} (t) = \eta_{sea\ to\ drink} W_{sea} (t) \quad (37)$$

برنامه‌های پاسخگویی بار الکتریکی و حرارتی الکتریکی و حرارتی نقش مهمی در سیستم‌های انرژی ایفا می‌کند. در (۳۸)-(۴۱) و (۴۲)-(۴۵) محدودیت‌های سیستم ذخیره‌ساز انرژی الکتریکی و حرارتی ارائه شده است [۱۹].

$$\sum_{t=1}^{24} P_{down}^E (t) = \sum_{t=1}^{24} P_{up}^E (t) \quad (38)$$

$$0 \leq P_{up}^E (t) \leq LPF_{up}^E P_{demand}^E (t) I_{up}^E (t) \quad (39)$$

$$0 \leq P_{down}^E (t) \leq LPF_{down}^E P_{demand}^E (t) I_{down}^E (t) \quad (40)$$

$$0 \leq I_{down}^E (t) + I_{up}^E (t) \leq 1 \quad (41)$$

$$\sum_{t=1}^{24} P_{down}^T (t) = \sum_{t=1}^{24} P_{up}^T (t) \quad (42)$$

$$0 \leq P_{up}^T (t) \leq LPF_{up}^T P_{demand}^T (t) I_{up}^T (t) \quad (43)$$

$$0 \leq P_{down}^T (t) \leq LPF_{down}^T P_{demand}^T (t) I_{down}^T (t) \quad (44)$$

$$0 \leq I_{down}^T (t) + I_{up}^T (t) \leq 1 \quad (45)$$

رابطه (۳۸) نشان می‌دهد که مقدار شیف‌ت بار در ساعات قله بار با مقدار دره بار برابر است. مقدار کاهش و افزایش بار به درصدی از کل بار توسط رابطه (۳۹) و (۴۰) محدود می‌گردد. رابطه (۴۱) اجازه نمی‌دهد که در یک ساعت خاص، سیاست‌های کاهش و افزایشی پاسخگویی بار به صورت توأمان اعمال گردد. روابط پاسخگویی بار حرارتی مشابه پاسخگویی بار الکتریکی در (۴۲)-(۴۵) مدل‌سازی شده است.

۲-۲- مدل‌سازی مسئله در قالب برنامه‌ریزی مقاوم

در این بخش، عدم قطعیت قیمت انرژی در مسئله با استفاده از روش بهینه‌سازی مقاوم مدل‌سازی می‌گردد. پاسخ به دست آمده از این روش در برابر بدترین شرایط عدم قطعیت قیمت استوار است. رویکرد بهینه‌سازی مقاوم در مقایسه با روش‌های تصادفی دارای دو مزیت اصلی است:

- اجرای بهینه‌سازی مقاوم ساده‌تر از روش‌های مبتنی بر سناریو است زیرا روش فقط به مقادیر پیش بینی شده حد بالا و حد پایین متغیر عدم قطعیت تحت مطالعه نیاز دارد.
- پاسخ بهینه‌سازی مقاوم به گونه‌ای است که در برابر جمیع تغییرات متغیر تحت مطالعه سیستم پایدار مانده و در واقع بهترین پاسخ را به بدترین سناریو ارائه می‌دهد.

رویکرد برنامه‌ریزی مقاوم راه را برای اپراتور سیستم هموار می‌کند تا با تغییر بودجه عدم قطعیت، بهترین پاسخ را با توجه به سطح ریسک‌پذیری خود در شبکه پیاده نماید. در این راستا، اپراتور هاب انرژی باید بین هزینه بهره‌برداری و مقاوم بودن پاسخ سیستم یکی را برگزیند. در ادامه، تابع هدف مسئله هاب انرژی بر اساس روش

$$P_s^E (t) = P_s^E (t-1) + P_{ch}^E (t) - P_{dis}^E (t) - P_{loss}^E (t) \quad (20)$$

$$P_{loss}^E (t) = g_{loss}^E P_s^E (t) \quad (21)$$

$$\alpha_{min}^E P_{CAPA}^E \leq P_s^E (t) \leq \alpha_{max}^E P_{CAPA}^E \quad (22)$$

$$\beta_{min}^E P_{CAPA}^E (1/\eta_{ES}^{ch}) I_{ch}^E (t) \leq P_{ch}^E (t) \leq \beta_{max}^E P_{CAPA}^E (1/\eta_{ES}^{ch}) I_{ch}^E (t) \quad (23)$$

$$\beta_{min}^E P_{CAPA}^E \eta_{ES}^{dis} I_{dis}^E (t) \leq P_{dis}^E (t) \leq \beta_{max}^E P_{CAPA}^E \eta_{ES}^{dis} I_{dis}^E (t) \quad (24)$$

$$0 \leq I_{dis}^E (t) + I_{ch}^E (t) \leq 1 \quad (25)$$

معادله (۲۰) وضعیت ذخیره‌سازها را نشان می‌دهد. رابطه (۲۱) مد کننده مقدار تلفات ذخیره‌ساز است. رابطه (۲۲) ظرفیت ذخیره‌ساز را محدود می‌نماید. رابطه‌های (۲۳) و (۲۴) مقدار شارژ و تخلیه ذخیره‌ساز را در هر ساعت محدود می‌نماید. رابطه (۲۵) وضعیت شارژ و تخلیه ذخیره‌ساز را به گونه‌ای مدل می‌کند که در هر ساعت فقط یک وضعیت امکان‌پذیر باشد. محدودیت‌های عملیات ذخیره‌سازی حرارتی در (۲۶)-(۳۱) ارائه شده است [۱۸].

$$P_s^T (t) = P_s^T (t-1) + P_{ch}^T (t) - P_{dis}^T (t) - P_{loss}^T (t) \quad (26)$$

$$P_{loss}^T (t) = g_{loss}^T P_s^T (t) \quad (27)$$

$$\alpha_{min}^T P_{CAPA}^T \leq P_s^T (t) \leq \alpha_{max}^T P_{CAPA}^T \quad (28)$$

$$\beta_{min}^T P_{CAPA}^T (1/\eta_{ES}^{ch}) I_{ch}^T (t) \leq P_{ch}^T (t) \leq \beta_{max}^T P_{CAPA}^T (1/\eta_{ES}^{ch}) I_{ch}^T (t) \quad (29)$$

$$\beta_{min}^T P_{CAPA}^T \eta_{ES}^{dis} I_{dis}^T (t) \leq P_{dis}^T (t) \leq \beta_{max}^T P_{CAPA}^T \eta_{ES}^{dis} I_{dis}^T (t) \quad (30)$$

$$0 \leq I_{dis}^T (t) + I_{ch}^T (t) \leq 1 \quad (31)$$

معادله (۲۶) وضعیت شارژ ذخیره‌ساز حرارتی را نشان می‌دهد. تلفات واحد ذخیره انرژی حرارتی توسط (۲۷) مدل‌سازی شده است. ظرفیت ذخیره‌سازی حرارتی با (۲۸) محدود شده است. شارژ و تخلیه ذخیره‌سازی حرارتی با (۲۹) و (۳۰) محدود شده‌اند. وضعیت واحد ذخیره انرژی حرارتی در هر ساعت با (۳۱) تعیین می‌گردد.

ذخیره‌ساز آب یکی از اجزای حیاتی سیستم‌های آب و انرژی در مناطق روستایی یا دورافتاده است از آنجا که هزینه تأمین آب آشامیدنی در این مناطق بسیار زیاد است، یک مدیریت انرژی بین ذخیره‌ساز آب، آب آشامیدنی ورودی و آب خروجی آب‌شیرین‌کن بسیار ضروری است. آب خروجی آب شیرین‌کن به صورت روابط زیر مدل می‌شود:

$$W_{storage} (t) = W_{storage} (t-1) + W_{ch} (t) - W_{dis} (t) \quad (32)$$

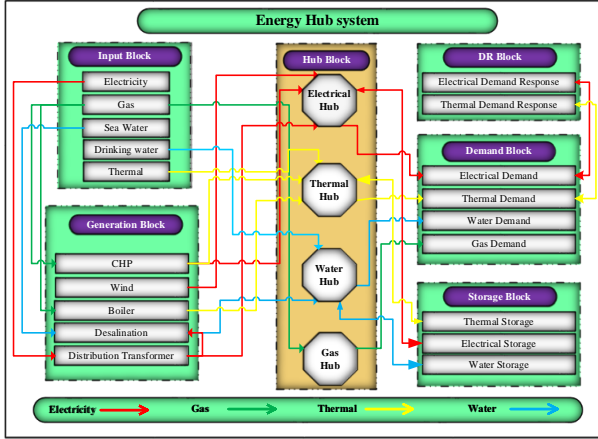
$$0 \leq W_{storage} (t) \leq W_{storage-max} \quad (33)$$

$$0 \leq W_{ch} (t) \leq W_{max-ch} I_{ch}^W (t) \quad (34)$$

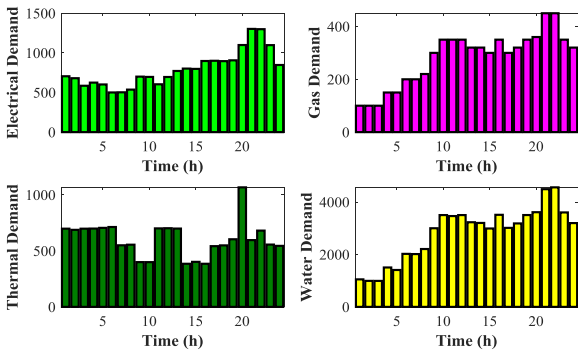
$$0 \leq W_{dis} (t) \leq W_{max-dis} I_{dis}^W (t) \quad (35)$$

$$0 \leq I_{ch}^W (t) + I_{dis}^W (t) \leq 1 \quad (36)$$

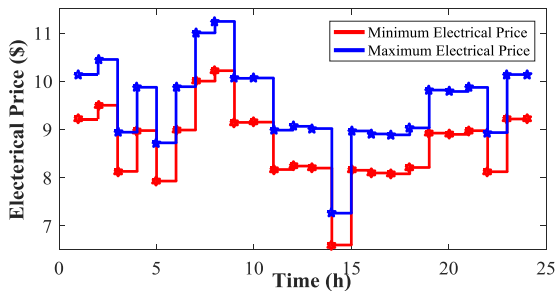
تقاضاهای الکتریکی، حرارتی، گاز و آب هاب انرژی در شکل ۳ نشان داده شده است. حداکثر و حداقل قیمت برق ورودی از شبکه بالادست در شکل ۴ نشان داده شده است. همچنین، قیمت حرارت ورودی در شکل ۵ نشان داده شده است. تمامی داده‌های شبیه‌سازی سیستم هاب انرژی در جدول ۱ ارائه شده است.



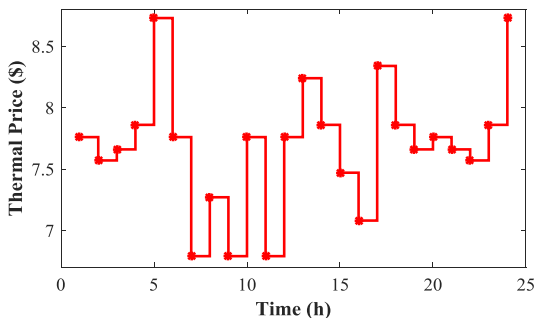
شکل (۲): ساختار هاب انرژی تحت مطالعه



شکل (۳): تقاضای الکتریکی، حرارتی، گاز و آب



شکل (۴): حداکثر و حداقل قیمت برق ورودی



شکل (۵): قیمت حرارت ورودی از شبکه بالادست

بهینه‌سازی مقاوم که در [20] ارائه شده، مدل‌سازی شده است. بر این مبنا، تابع هدف مسئله به صورت (۴۶) بازنویسی شده است:

$$\sum_{t=1}^{24} [(\pi_{net}^E(t) P_{net}^E(t)) + \text{Other Costs}] \quad (46)$$

در تابع هدف فوق، به منظور پیاده‌سازی مدل عدم قطعیت هزینه برق خریداری شده از شبکه بالادست از بقیه هزینه‌ها تفکیک شده است. بر اساس [۲۰]، هدف اپراتور یافتن بهترین پاسخ برای بدترین سناریو مسئله است. بنابراین، تابع هدف را می‌توان به صورت زیر بازنویسی کرد:

$$\min \max \sum_{t=1}^{N_t} [(\pi_{net}^{RO,E}(t) P_{net}^E(t)) + \text{Other Costs}] \quad (47)$$

پارامتر $\pi_{net}^{RO,E}(t)$ قیمت برق در شبکه بالادست است. تابع هدف پیشنهادی در رابطه (۴۷) بوسیله حلگرهای محمول گمز قابلیت حل ندارد و بهتر است که برای حل از روش‌های دوگان بهره‌برده شود. همچنین به منظور مدل‌سازی عدم قطعیت قیمت انرژی، از انحراف معیار آن از مقدار پیش‌بینی شده استفاده می‌شود. بنابراین تابع هدف مساله به صورت (۴۸) بازنویسی می‌گردد:

$$\max \sum_{t=1}^{N_t} [(\pi_{net}^{E,forecast}(t)(1+Z(t))P_{net}^E(t))] \quad (48)$$

s.t

$$Z(t) \leq 1 \quad : \beta_t$$

$$\sum_{t=1}^{N_t} Z(t) \leq \Gamma \quad : \alpha$$

$$Z(t) \geq 0$$

در رابطه فوق، متغیرهای α و β_t نشان‌دهنده متغیرهای دوگان مربوط به قیود هستند. علاوه بر این، Γ بودجه عدم قطعیت قیمت برق است. بنابراین تابع هدف نهایی مساله با توجه به قواعد KKT به صورت زیر بازنویسی می‌شود:

$$\min \left\{ \sum_{t=1}^{N_t} [(\pi_{net}^{E,forecast}(t) P_{net}^E(t))] + \sum_{t=1}^{N_t} [\beta_t] + \alpha + \text{Other Costs} \right\} \quad (49)$$

$$\alpha + \beta_t \geq \text{dev} \pi_{net}^{E,forecast}(t) P_{net}^E(t) \quad (50)$$

$$\beta_t \geq 0 \quad (51)$$

$$\alpha \geq 0 \quad (52)$$

constraints (9)–(45)

۳- پیاده‌سازی روش پیشنهادی

در این بخش، روش پیشنهادی بر روی یک سیستم هاب انرژی اجرا شده و نتایج مطالعه ارائه شده است. در این راستا، در زیربخش اول، داده‌های ورودی مسئله ارائه شده و در زیربخش دوم نتایج شبیه‌سازی ارائه می‌گردد:

۳-۱- اطلاعات سیستم هاب تحت مطالعه

ساختار سیستم هاب انرژی تحت مطالعه در شکل ۲ نشان داده شده است. افق برنامه‌ریزی ۲۴ ساعته در نظر گرفته شده است. همچنین،

۲-۳- ارائه نتایج

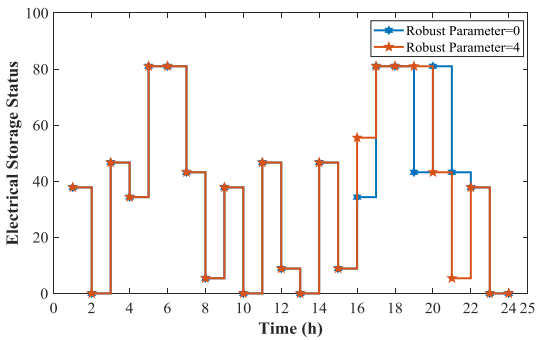
در این بخش، نتایج پیاده سازی ساختار پیشنهادی در سیستم‌هاب انرژی ارائه شده است.

جدول (۱): داده های ورودی مدل

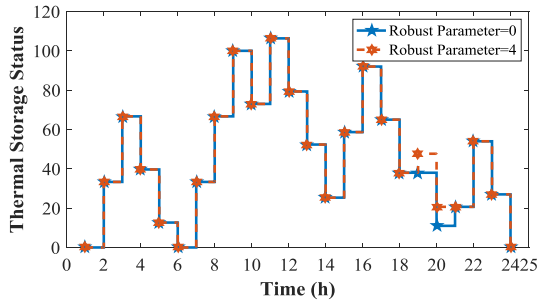
مقدار	پارامتر	مقدار	پارامتر
0	β_{min}^E	0	π_{wind}^E
0.14	β_{max}^E	0.9	$\pi_{Sea\ to\ drink}^{Des}$
0	β_{min}^H	0	π_{op}^T
0.15	β_{max}^H	0	π_{op}^E
0.9	$\eta_{sea\ to\ drink}$	0.9	η_{Trans}^{EE}
1000	W_{max-ch}	0.4	η_{CHP}^{GE}
1000	$W_{max-dis}$	0.9	η_{Conv}^{EE}
0.35	η_{CHP}^{GT}	0.9	η_{ES}^{ch}
0.85	η_{Boil}^{GT}	0.9	η_{HS}^{dis}
1200	$P_{net-max}^E$	0.9	η_{HS}^{ch}
1200	$P_{net-max}^T$	0.2	LPF_{up}^T
2000	$P_{net-max}^G$	0.2	LPF_{down}^T
3500	W_{DW-max}	0.05	α_{min}^H
300	P_{CAPA}^E	0.9	α_{max}^H
200	P_{CAPA}^H	0.9	η_{ES}^{dis}
0.05	g_{loss}^E	0.2	LPF_{up}^E
0.05	g_{loss}^H	0.2	LPF_{down}^E
0.05	α_{min}^E	0.27	α_{max}^E

شکل ۶ اثرات بودجه عدم قطعیت بر هزینه بهره‌برداری سیستم هاب انرژی را نشان می‌دهد. با افزایش بودجه عدم قطعیت، هزینه کل بهره‌برداری هاب انرژی افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر، هر چه عدم قطعیت قیمت در مقدار زمان‌های بیشتری اعمال گردد این معنا را القا می‌کند که برنامه‌ریزی مقاوم‌تر بوده اما مقدار هزینه بهره‌برداری مقدار بیشتر حاصل می‌شود. ذخیره انرژی الکتریکی و حرارتی نقش مهمی در سیستم هاب انرژی ایفا می‌کند. ویژگی اصلی و مشترک سیستم ذخیره انرژی این است که می‌توانند انرژی را در قیمت پایین انرژی ذخیره کرده و سپس در پیک قیمت انرژی آن را به شبکه بازگردانند. بنابراین، قیمت انرژی یک پارامتر مؤثر در بهره‌برداری از سیستم ذخیره انرژی است. شکل ۷ و ۸ عملکرد سیستم‌های ذخیره‌سازی را در شرایط وجود و عدم وجود برنامه‌ریزی مقاوم نشان می‌دهند.

شکل (۶): مصالحه میان هزینه بهره‌برداری و مقاوم بودن سیستم

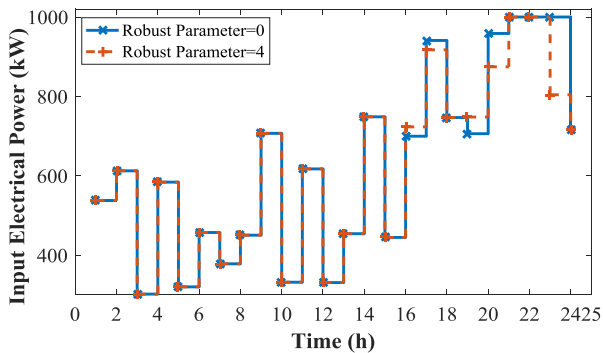


شکل (۷): عملکرد سیستم ذخیره‌کننده الکتریکی

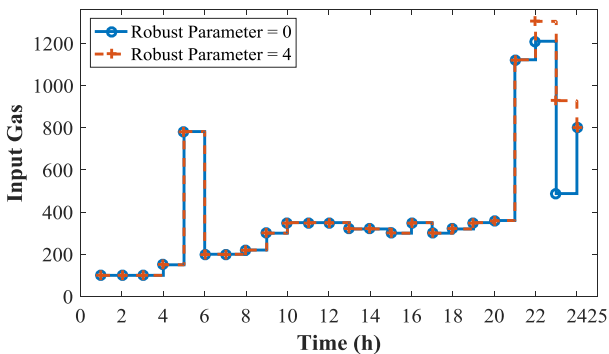


شکل (۸): عملکرد سیستم ذخیره‌کننده حرارتی

شکل ۹ و ۱۰ ورودی الکتریکی و گاز به سیستم هاب آب و انرژی را نشان می‌دهد.



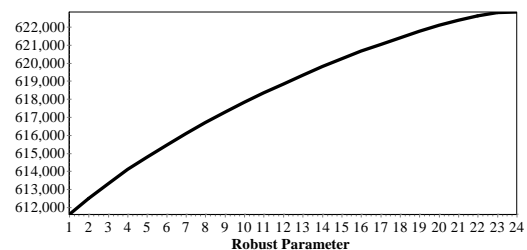
شکل (۹): انرژی الکتریکی ورودی به سیستم‌هاب انرژی



شکل (۱۰): گاز ورودی به سیستم‌هاب انرژی

۳-۳- نتیجه‌گیری

در این مقاله، یک روش بهینه‌سازی مقاوم برای بهره‌برداری از هاب انرژی با در نظرگیری عدم قطعیت قیمت انرژی الکتریکی ارائه شده است. بر این اساس اثرات بودجه عدم قطعیت بر نتایج بهره‌برداری بهینه از هاب انرژی مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج این مطالعه



10.1016/j.energy.2012.06.040.

[10] S. Dorahaki, M. Rashidinejad, M. Mollahassani-pour, and A. Bakhshai, "An efficient hybrid structure to solve economic-environmental energy scheduling integrated with demand side management programs," *Electr. Eng.*, vol. 101, no. 4, pp. 1249–1260, Dec. 2019, doi: 10.1007/s00202-019-00866-x.

[11] M. Hassannia-kheibari, S. H. Hosseini, and S. Soleymani, "Demand Response Programs Negative Effect Threshold in Distribution Networks," *J. Iran. Assoc. Electr. Electron. Eng.*, vol. 18, no. 2, pp. 107–118, May 2021, doi: 10.52547/jiaeee.18.2.107.

[12] S. Dorahaki, M. Rashidinejad, A. Abdollahi, and M. Mollahassani-pour, "A novel two-stage structure for coordination of energy efficiency and demand response in the smart grid environment," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 97, pp. 353–362, 2018, doi: 10.1016/j.ijepes.2017.11.026.

[13] S. Dorahaki, A. Abdollahi, M. Rashidinejad, and M. Moghbeli, "The role of energy storage and demand response as energy democracy policies in the energy productivity of hybrid hub system considering social inconvenience cost," *J. Energy Storage*, p. 102022, Oct. 2020, doi: 10.1016/j.est.2020.102022.

[14] V. Davatgaran, M. Saniei, and S. S. Mortazavi, "Smart distribution system management considering electrical and thermal demand response of energy hubs," *Energy*, vol. 169, pp. 38–49, Feb. 2019, doi: 10.1016/j.energy.2018.12.005.

[15] M. A. Mirzaei et al., "An Integrated Energy Hub System based on Power-to-Gas and Compressed Air Energy Storage Technologies in presence of Multiple Shiftable Loads," *IET Gener. Transm. Distrib.*, Mar. 2020, doi: 10.1049/iet-gtd.2019.1163.

[16] A. Heidari, S. S. Mortazavi, and R. C. Bansal, "Stochastic effects of ice storage on improvement of an energy hub optimal operation including demand response and renewable energies," *Appl. Energy*, vol. 261, p. 114393, Mar. 2020, doi: 10.1016/j.apenergy.2019.114393.

[17] M. Nazari-Heris, S. Abapour, and B. Mohammadi-Ivatloo, "Optimal economic dispatch of FC-CHP based heat and power micro-grids," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 114, pp. 756–769, Mar. 2017, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2016.12.016.

[18] M. Monemi Bidgoli, H. Karimi, S. Jadid, and A. Anvari-Moghaddam, "Stochastic electrical and thermal energy management of energy hubs integrated with demand response programs and renewable energy: A prioritized multi-objective framework," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 196, p. 107183, Jul. 2021, doi: 10.1016/j.epsr.2021.107183.

[19] S. Dorahaki, M. Rashidinejad, S. F. F. Ardestani, A. Abdollahi, and M. R. Salehizadeh, "A Peer-to-Peer energy trading market model based on time-driven prospect theory in a smart and sustainable energy community," *Sustain. Energy, Grids Networks*, p. 100542, Sep. 2021, doi: 10.1016/J.SEGAN.2021.100542.

[20] M. Ghahramani, M. Nazari-Heris, K. Zare, and B. Mohammadi-ivatloo, "Robust Short-Term Scheduling of Smart Distribution Systems Considering Renewable Sources and Demand Response Programs," in *Robust Optimal Planning and Operation of Electrical Energy Systems*, Cham: Springer International Publishing, 2019, pp. 253–270.

نشان داد که برنامه‌های پاسخگویی بار الکتریکی باعث کاهش هزینه کل بهره‌برداری از سیستم هاب انرژی شده و بهره‌برداری از هاب انرژی را در شرایط عدم قطعیت منعطف‌تر می‌سازند. همچنین، نتایج نشان داد که هزینه بهره‌برداری سیستم پیشنهادی با افزایش بودجه عدم قطعیت افزایش می‌یابد. با این حال، میزان مقاوم بودن در مقابل عدم قطعیت قیمت شبکه بالادست با در نظر گرفتن استراتژی مقاوم افزایش می‌یابد. بدین منظور، اپراتور هاب انرژی باید بین مقاوم بودن بهره‌برداری و هزینه‌های آن مصالحه کند. نتایج ارائه شده اطمینان می‌دهد که روش پیشنهادی برای برنامه هاب انرژی بهینه، اقتصادی و مقاوم بوده است.

مراجع

[1] H. Radmanesh, R. Sharifi, and S. H. Fathi, "A BAT Optimization Algorithm for Sizing and Siting of Optimal Distributed Generation in Distribution Networks," *J. Iran. Assoc. Electr. Electron. Eng.*, vol. 17, no. 4, pp. 11–15, Dec. 2020, doi: 10.29252/jiaeee.17.4.11.

[2] E. Shahrabi, S. M. Hakimi, A. Hasankhani, G. Derakhshan, and B. Abdi, "Developing optimal energy management of energy hub in the presence of stochastic renewable energy resources," *Sustain. Energy, Grids Networks*, vol. 26, p. 100428, Jun. 2021, doi: 10.1016/j.segan.2020.100428.

[3] S. Dorahaki, R. Dashti, and H. R. Shaker, "Optimal energy management in the smart microgrid considering the electrical energy storage system and the demand-side energy efficiency program," *J. Energy Storage*, vol. 28, Apr. 2020, doi: 10.1016/j.est.2020.101229.

[4] 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," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 129, p. 106803, Jul. 2021, doi: 10.1016/j.ijepes.2021.106803.

[5] A. A. Eladl, M. I. El-Afifi, M. A. Saeed, and M. M. El-Saadawi, "Optimal operation of energy hubs integrated with renewable energy sources and storage devices considering CO2 emissions," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 117, p. 105719, May 2020, doi: 10.1016/j.ijepes.2019.105719.

[6] M. Majidi, S. Nojavan, and K. Zare, "A cost-emission framework for hub energy system under demand response program," *Energy*, vol. 134, pp. 157–166, Sep. 2017, doi: 10.1016/j.energy.2017.06.003.

[7] M. Mollahassani-pour, M. Rashidinejad, and A. Abdollahi, "Appraisal of eco-friendly Preventive Maintenance scheduling strategy impacts on GHG emissions mitigation in smart grids," *J. Clean. Prod.*, vol. 143, pp. 212–223, Feb. 2017, doi: 10.1016/j.jclepro.2016.12.127.

[8] M. Mostafavi Sani, A. Noorpoor, and M. Shafie-Pour Motlagh, "Optimal model development of energy hub to supply water, heating and electrical demands of a cement factory," *Energy*, vol. 177, pp. 574–592, Jun. 2019, doi: 10.1016/j.energy.2019.03.043.

[9] M. Behrangrad, H. Sugihara, and T. Funaki, "Integrating the cold load pickup effect of reserve supplying demand response resource in social cost minimization based system scheduling," *Energy*, vol. 45, no. 1, pp. 1034–1041, Sep. 2012, doi: