ارائه یک مدل مقاوم خطی برای بهره‌برداری از هاب انرژی با استفاده از تئوری تصمیم‌گیری بر مبنای شکاف اطلاعاتی

ارسلان نجفی[1]، استادیار، بهنام محمدی ایواتلو[2]، دانشیار
۱- دانشکده مهندسی واحد سپیدان- دانشگاه آزاد اسلامی- سپیدان – ایران
arsalan.najafi@iausepidan.ac.ir
۲- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه تبریز - تبریز - ایران
bmohammadi@tabrizu.ac.ir

چکیده: هاب انرژی مفهومی بوده که حامل‌های انرژی مختلف را به یکدیگر مرتبط می‌کند و طی سال‌های اخیر توسعه یافته است. بهره‌برداری از هاب انرژی همواره با عدم قطعیت‌های فراوانی همراه است. لذا این مقاله یک مدل خطی مقاوم جدید براساس روش تئوری تصمیم‌گیری بر مبنای شکاف اطلاعاتی (IGDT) را برای حل مسأله بهره‌برداری از هاب انرژی ارئه می‌دهد. این روش قابلیت در نظر گرفتن تعداد زیادی از عدم قطعیت‌ها را به صورت همزمان دارا است. هاب تحت مطالعه در برگیرنده واحد تولید همزمان (CHP)، بویلر و توربین بادی بوده و با بازارهای روز پیش‌رو، زمان حقیقی و شبکه گاز تبادل انرژی دارد. این مسأله تحت تاثیر عدم قطعیت‌های فراوانی بوده که در این مقاله عدم قطعیت‌های مربوط به قیمت انرژی الکتریکی در بازار پیش‌رو، قیمت گاز، قیمت بازار زمان حقیقی و تولید توربین‌های بادی لحاظ می‌شوند. از آن جایی که ماهیت روش IGDT یک بهینه‌سازی دو سطحی است، با استفاده از شرایط کاروش-کوهن تاکر (KKT) و تئوری دوگان قوی این مسأله ابتدا خطی شده و سپس حل می‌شود. شبیه‌سازی‌ها در سیستم تحت مطالعه مذکور انجام شده و تحلیل نتایج بدست آمده، تأیید کننده سودمند بودن مدل خطی پیشنهادی است.

کلید واژه: تئوری تصمیم‌گیری بر مبنای شکاف اطلاعاتی، هاب انرژی، عدم قطعیت، شرایط KKT

تاریخ ارسال مقاله:۱۳۹۸/۶/۳
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۱۱/۶
نام نویسنده مسئول: ارسلان نجفی
نشانی نویسنده مسئول: ایران -فارس – سپیدان، جاده کمربندی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد سپیدان

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-12]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1398.8.3.7.2]
[DOI: 10.29252/ieijqp.8.3.59]

۱- مقدمه

در هاب انرژی[1] تمامی حامل‌های انرژی به صورت یکپارچه بررسی می‌شود. تجهیزات بسیاری هاب انرژی از قبیل CHP[2]، بویلر، مبدل‌ها و ذخیره‌سازها قابل استفاده هستند. ورودی و خروجی‌ها چندگانه باعث انعطاف‌پذیری و بازدهی بیشتر در هاب انرژی می‌شود. علاوه بر این بهره‌برداران گزینه‌های بیشتری برای تصمیم‌گیری دارند [۱].

۱-۱- پیشینه پژوهش

پژوهش‌های انجام گرفته در این زمینه به دو دسته تقسیم می‌شوند: طراحی و بهره‌برداری. نویسندگان مقاله [۲] مدیریت بار را در هاب انرژی بررسی کرده‌اند. بازار انرژی حرارتی و بارهای پاسخگو در [۳] بررسی شده‌اند. پاسخگویی بارهای الکتریکی و برودتی و همچنین انرژی‌های تجدیدپذیر در [۴] و [۵] بررسی شده است. به صورتی مشابه، پاسخگویی بار در یک کارخانه سیمان با تجیزات انرژی متنوع در [۶] آمده است. تاثیر همزمان انرژی‌های تجدیدپذیر و ذخیره‌سازهای انرژی در [۷] ارائه شده است. علاوه بر این، بکارگیری ذخیره‌ساز انرژی به منظور بهبود عملکرد الکتریکی یک بار خانگی در [۸] مورد مطالعه قرار گرفته است. مرجع [۹] یک هاب انرژیی را که براساس منابع انرژی تجدیدپذیر بناگذاری شده را در شبکه‌های توزیع فعال بررسی می‌کند. به صورتی مشابه مدیریت انرژی مصارف خانگی با هاب انرژی مبتنی بر منابع انرژی تجدیدپذیر [۱۰] با استفاده از یک روش بهینه‌سازی احتمالی بررسی شده است. نویسندگان مقاله [۱۱] و [۱۲] از الگوریتم‌های تکاملی برای برای حل مسأله‌ای بر پایه هاب انرژی استفاده کرده‌اند. همچنین تاثیر خودروهای برقی در مقالات [۱۳] و [۱۴] بررسی شده است. مرجع [۱۵] هاب انرژی را در یک خانه هوشمند با استفاده از مفهوم سناریو و برنامه‌ریزی تصادفی در بازار زمان‌حقیقی بررسی کرده است. ذخیره‌سازی منجمد در هاب انرژی به عنوان یک تکنولوژی جدید در [۱۶] مورد توجه قرار گرفته و هزینه‌های بهره‌برداری آن محاسبه شده‌اند. بهره‌برداری دو سطحی هاب انرژی در شبکه‌های توزیع فعال در [۱۷] مورد بررسی قرار گرفته‌اند و در آن اثرات هاب‌های چندگانه در این شبکه‌ها مطالعه شده است. مرجع [۱۸] بهینه سازی و مدیریت انرژی در یک هاب انرژی را در یک بازه زمانی میان مدت با استفاده از برنامه ریزی تصادفی مورد بررسی قرار داده و در آن از مقدار شرطی در ریسک برای کاهش آثار نامطلوب عدم قطعیت استفاده کرده است. مرجع [۱۹] نیز بهره برداری مشابهی را در هاب انرژی بدون در نظر گرفتن شاخص های ریسک و با هدف کاهش هزینه های سالانه انجام داده است.

علاوه براین موارد، برخی مقالات جنبه‌های طراحی هاب انرژی را بررسی کرده‌اند. طراحی بهینه‌هاب‌های انرژی هوشمند با استفاده از برنامه‌ریزی تصادفی در [۲۰] انجام شده و در آن قیود عملی بهره‌برداری در نظر گرفته شده‌اند. مدلی به منظور بررسی قابلیت اطمینان یک هاب انرژی با زیرساخت‌هایی که در بر گیرنده‌ی حامل‌های انرژی متنوع است، در [۲۱] ارائه شده است. این هاب انرژی دارای زیرساختی است که بارهای الکتریکی و گاز را تأمین می‌کند. همچنین مرجع [۲۲] طراحی براساس قابلیت اطمینان و در حضور انرژی بادی پیشنهاد داده است.

۱-۲- نوآوری تحقیق

در مرجع [۲۳] روشی ترکیبی برای بهینه‌سازی مقاوم هاب انرژی با استفاده از روش IGDT ارائه شده است و در آن عدم قطعیت‌های ناشی از انرژی باد، قیمت انرژی الکتریکی و همچنین بار در نظر گرفته شده است. به صورتی مشابه در [۲۴] پاسخگویی بار در یک شبکه توزیع و در قالب هاب انرژی با استفاده از روش IGDT[3] حل شده است. علاوه بر این در [۲۵] نیز همین روش برای حل مسأله پاسخگویی بار در هاب انرژی استفاده شده است. نکته قابل توجه در هر سه مرجع ذکر شده مدل‌سازی غیرخطی مسأله می‌باشد. لذا در راستای تکمیل پژوهش‌های انجام‌شده در این زمینه، در این مقاله مسأله بهینه‌سازی مقاوم هاب انرژی با استفاده از روش IGDT به صورتی خطی مدل‌سازی می‌شود. بدیهی است که مدل خطی با قابلیت انعطاف‌پذیری بالاتر، قابلیت پیاده‌سازی در سیستم‌های بزرگتر را نیز دارا می‌باشد و علاوه بر این در زمان کوتاه‌تری نیز مسأله قابل حل می‌باشد. بنابراین، نوآوری اصلی این مقاله به صورت زیر است:

- ارائه یک مدل خطی عدد صحیح آمیخته برای حل مقاوم مسأله هاب انرژی مبتنی بر IGDT
- استفاده از شرایط KKT[4] و تئوری دوگان قوی[5] برای خطی سازی مساله.

۱-۳- ساختار مقاله

در این مقاله ابتدا بیان مسئله و سپس روش IGDT و پس از آن مدل‌سازی مسأله ارائه می‌شود. در بخش بعدی نتایج مطالعات عددی ارائه خواهد شد و در نهایت نتیجه‌گیری بیان خواهد شد.

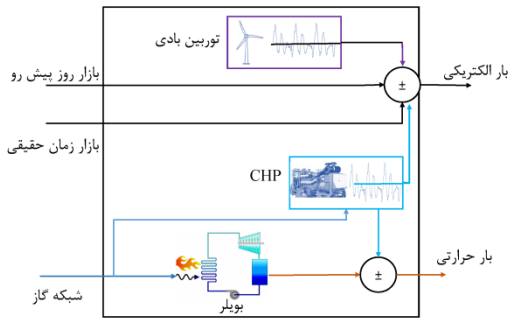
۲- بیان مسئله

در این مقاله بهره‌برداری مقاوم از هاب انرژی با استفاده از روش IGDT بیان خواهد شد. هاب تحت مطالعه مطابق با شکل ۱ بوده و دارای ۳ ورودی و دو خروجی است. بهره‌بردار هاب می‌تواند انرژی الکتریکی را از بازارهای روز پیش‌رو و زمان حقیقی تهیه نماید. همچنین شبکه گاز ورودی دیگری است که بهره‌بردار هاب باید در مورد آن تصمیم‌گیری بکند. در درون هاب نیز یک توربین بادی، یک CHP و یک بویلر قرار دارد. واحد CHP ارتباط بین قسمت حرارتی و الکتریکی هاب است. با تجهیزات و ورودی‌های بیان شده، بهره‌بردار بایستی بارهای الکتریکی و حرارتی را در خروجی هاب تأمین نماید. نکته قابل توجه در

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-12]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1398.8.3.7.2]
[DOI: 10.29252/ieijqp.8.3.59]

بهره‌برداری این است که یک بهره‌بردار همواره با عدم قطعیت مواجه است و این موضوع دلیلی است بر این مهم که بهره‌برداری مقاوم مطرح می‌شود. در واقع بهره‌برداری مقاوم همان بهره‌برداری در شرایط نامطلوب و در برخی اوقات بهره‌برداری در بدترین شرایط است. به عبارتی دیگر، بهره‌بردار باید به گونه‌ای تصمیم‌گیری نماید که با اثرات نامطلوب عدم قطعیت‌ها مقابله نماید. در این مقاله عدم قطعیت‌های ناشی از قیمت‌های بازار پیش رو و زمان حقیقی، انرژی بادی و قیمت گاز در نظر گرفته می‌شود. روش IGDT برای مقابله با این منابع عدم قطعیت، مورد استفاده قرار می‌گیرد.

این روش دارای ماهیتی دو سطحی است که منجر به مدلی غیرخطی در مسأله می‌شود. از طرفی شرایط KKT برای حل مدل‌های دو سطحی محدب[5] مورد استفاده قرار می‌گیرد [۲۷و ۲۸]. همچنین در قسمتی از مسأله از تئوری دوگان قوی برای از بین بردن قسمت غیرخطی استفاده می‌شود. از این رو، در این مقاله یک مدل خطی برای مسأله پیشنهادی ارائه می‌شود.



شکل (۱): هاب انرژی تحت مطالعه

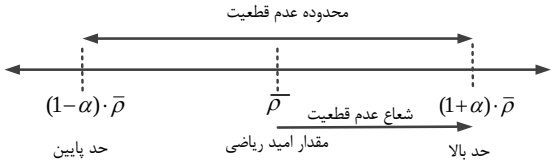
۳- تئوری تصمیم‌گیری بر مبنای شکاف اطلاعاتی

در این مقاله از روش تئوری تصمیم‌گیری بر مبنای شکاف اطلاعاتی (IGDT) استفاده می‌شود. این روش، یک روش غیراحتمالی است و به اطلاعات زیادی در مورد عدم قطعیت‌ها نظیر تابع چگالی، توابع عضویت فازی و یا سری‌های زمانی نیاز ندارد. این روش برای مواقعی که حجم زیادی از عدم قطعیت‌ها وجود دارد، بسیار سودمند است [۲۶].

عدم قطعیت در IGDT به صورت زیر مدل می‌شود:

$$U(\alpha,\bar{\rho})=\left\{\rho:\left|\frac{\rho-\bar{\rho}}{\bar{\rho}}\right|\le\alpha\right\},\alpha\ge 0 \qquad (۱)$$

رابطه (۱) محدوده عدم قطعیت را مطابق با شکل ۲ نشان می‌دهند.



شکل (۲): مدل‌سازی عدم قطعیت در IGDT [۲۶]

مقدار α (شعاع عدم قطعیت) با اختصاص دادن یک مقدار ریسک خاص به مقدار پایه تابع هدف مشخص می‌شود. به عبارتی دیگر تابع هدف در مقابل ورودی‌های نایقین مقاوم خواهد بود و مقدار تابع هدف از یک مقدار مشخصی در شعاع عدم قطعیت کوچکتر خواهد بود. تابع مقاوم به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\max_{x}\ \alpha \qquad (۲)$$

$$H_i(x,\bar{\rho})\le 0 \qquad (۳)$$

$$G_j(x,\bar{\rho})=0 \qquad (۴)$$

$$\Delta=(1+\beta)\cdot f_b(x,\bar{\rho}) \qquad (۵)$$

$$f_b(x,\rho)\le\Delta \qquad (۶)$$

$$(1-\alpha)\cdot\bar{\rho}\le\rho\le(1+\alpha)\cdot\bar{\rho} \qquad (۷)$$

$$0\le\beta\le 1 \qquad (۸)$$

Δ حداکثر میزان مجاز افزایش مقدار پایه تابع هدف است که مقدار آن توسط تصمیم‌گیرنده مشخص می‌شود و به آن تابع هدف بحرانی گفته می‌شود.

۴- فرمول‌بندی مسأله

برای ایجاد درک صحیحی از مدل‌سازی مسأله با IGDT، ابتدا باید مسأله به صورت قطعی مطرح شود. بدین دلیل که خروجی‌های مسأله قطعی به عنوان ورودی در مدل IGDT مورد استفاده قرار می‌گیرند.

۴-۱- مدل‌سازی مسأله در حالت قطعی

برای مدل‌سازی مسأله در حالت قطعی از مقادیر امید ریاضی (پیش‌بینی شده) به عنوان ورودی‌های جایگزین عدم قطعیت‌ها استفاده می‌شود. بنابراین در این قسمت مقادیر امید ریاضی قیمت‌های بازار روز پیش رو و زمان حقیقی، انرژی باد و قیمت گاز در مسأله قرار می‌گیرد. مدل قطعی به صورت زیر است:

$$f_b=\min\sum_{t=1}^{T}\left[\begin{array}{l}P^{DA}(t)\bar{\lambda}^{DA}(t)+P^{RT}(t)\bar{\lambda}^{RT}(t)+\\ \bar{\lambda}^{gas}(P^{gas}_{Boil}(t)+P^{gas}_{CHP}(t))\end{array}\right] \qquad (۹)$$

$$P^{gas}_{CHP}(t)\eta^{CHP}_{e}\le P^{CHP,\max}_{e} \qquad (۱۰)$$

$$P^{gas}_{CHP}(t)\eta^{CHP}_{e}\ge P^{CHP,\min}_{e} \qquad (۱۱)$$

$$H_{CHP}(t)\le P^{gas}_{CHP}(t)\eta^{CHP}_{e}\cdot HPR \qquad (۱۲)$$

$$H_{CHP}(t)=P^{gas}_{CHP}(t)\eta^{CHP}_{h} \qquad (۱۳)$$

$$0\le P^{Boil}_{h}(t)\le P^{Boil}_{h,\max} \qquad (۱۴)$$

$$D_e(t)=P^{DA}(t)+P^{RT}(t)+P^{CHP}_{e}(t)+\bar{P}^{WT}_{LD}(t) \qquad (۱۵)$$

$$D_h(t)=P^{gas}_{Boil}(t)\eta^{Blr}_{h}+H_{CHP}(t) \qquad (۱۶)$$

$$P^{DA}(t),P^{RT}(t),P^{gas}_{CHP}(t),P^{gas}_{Boil}(t),H_{CHP}(t)\ge 0$$

رابطه (۹) مقدار تابع هدف را در حالت پایه نشان می‌دهد که از مجموع هزینه‌های بازار روز پیش‌رو، بازار زمان حقیقی و شبکه گاز بدست می‌آید. روابط (۱۰) تا (۱۳) محدودیت‌های CHP را نشان می‌دهند.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-12]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1398.8.3.7.2]
[DOI: 10.29252/ieijqp.8.3.59]

رابطه (۱۲) ساده‌سازی رابطه متقابل تولید انرژی حرارتی و الکتریکی در CHP است که از مرجع [۲۲] اخذ شده است. رابطه (۱۴) حد بالا و پایین تولید بویلر را نشان می‌دهد. روابط (۱۵) و (۱۶) نیز به ترتیب نشان دهنده تعادل‌های الکتریکی و حرارتی در سیستم هستند.

۴-۲- مدل‌سازی مسأله با استفاده از IGDT

در بهره‌برداری مقاوم هاب انرژی، عدم‌قطعیت‌ها در یک بازه مرتبط با شعاع همگرایی قرار می‌گیرند. در این مقاله عدم قطعیت‌های ناشی از قیمت‌های بازار پیش رو و زمان حقیقی، انرژی بادی و قیمت گاز در نظر گرفته می‌شود. این روابط به صورت زیر هستند:

$$\min(-\alpha) \quad (۱۷)$$

$$(1-\alpha)\bar{\lambda}^{RT}(t) \le \lambda^{RT}(t) \le (1+\alpha)\bar{\lambda}^{RT}(t) \quad (۱۸)$$

$$(1-\alpha)\bar{P}^{WT}(t) \le P^{WT}(t) \le (1+\alpha)\bar{P}^{WT}(t) \quad (۱۹)$$

$$(1-\alpha)\bar{\lambda}^{DA}(t) \le \lambda^{DA}(t) \le (1+\alpha)\bar{\lambda}^{DA}(t) \quad (۲۰)$$

$$(1-\alpha)\bar{\lambda}^{gas}(t) \le \lambda^{gas}(t) \le (1+\alpha)\bar{\lambda}^{gas}(t) \quad (۲۱)$$

$$\max\{\Delta \le (1+\beta) f_b\} \quad (۲۲)$$

$$\Delta = \sum_{t=1}^{T} \begin{bmatrix} P^{DA}(t)\lambda^{DA}(t) + P^{RT}(t)\lambda^{RT}(t) \\ +\lambda^{gas}(P^{gas}_{Boil}(t) + P^{gas}_{CHP}(t)) \end{bmatrix} \quad (۲۳)$$

$$D_e(t) = P^{DA}(t) + P^{RT}(t) + P^{CHP}_e(t) + P^{WT}_{LD}(t) \quad (۲۴)$$

و قیود (۱۰) تا (۱۶).

رابطه (۱۷) همان تابع هدف مسأله IGDT بوده که هدف آن بیشینه کردن شعاع عدم قطعیت است. روابط (۱۸) تا (۲۱) پارامترهای نایقین را در شعاع خود نشان می‌دهد. رابطه (۲۲) و (۲۳) بیان می‌دارد که میزان تابع هدف باید از یک مقدار مشخصی کوچکتر باشد که بسته به سطح ریسک است. رابطه (۲۴) نیز مجدداً رابطه تعادل انرژی را در حالتی نشان می‌دهد که میزان تولید بادی نایقین است. افزایش شعاع همگرایی به معنی افزایش بازه عدم قطعیت است. در واقع متغیر نایقین در بازه بزرگتری می تواند حضور داشته باشد تا میزان هزینه بحرانی حاصل شود. به عبارت دیگر افزایش شعاع به معنی بدتر شدن شرایط عدم قطعیت است و بهینه سازی در این شرایط یعنی بهینه سازی تحت بدترین شرایط.

۴-۳- مدل خطی مسأله

مدل ارائه شده در بخش قبل یک مدل دو سطحی است. از طرفی باید رابطه (۱۷) کمینه گردد (سطح بالا) و از طرف دیگر رابطه (۲۲) باید بیشینه شود (سطح پایین). علاوه بر این، رابطه (۲۳) عامل غیرخطی مسأله است. از آنجایی که مقادیر عدم قطعیت در سطح بالا مشخص می‌شوند (رابطه (۱۸) تا (۲۱))، لذا می‌توان به محدب بودن سطح پایین که لازمه استفاده از شرایط KKT است، پی برد. از طرفی برای حذف این عامل غیرخطی در مسأله از تئوری دوگان قوی استفاده می‌شود. برای پیاده‌سازی شرایط KKT و تئوری دوگان قوی به قسمت ضمیمه و مراجع [۲۷] و [۲۸] مراجعه نمائید. مدل خطی مسأله به صورت زیر است:

$$\min(-\alpha) \quad (۲۵)$$

$$\Delta = \sum_{t=1}^{T} C_d(t) \quad (۲۶)$$

$$C_d(t) = \mu_1(t)D_e(t) + \mu_2(t)D_h(t) + \mu_3(t)P^{CHP,\max}_e - \mu_4(t)P^{CHP,\min}_e \quad (۲۷)$$

$$\lambda^{gas}(t) + \mu_1(t)\eta^{CHP}_e + \mu_3(t)\eta^{CHP}_e - \mu_4(t)\eta^{CHP}_e \ge 0 \quad (۲۸)$$

$$-\lambda^{DA}(t) + \mu_1(t) \ge 0 \quad (۲۹)$$

$$-\lambda^{RT}(t) + \mu_1(t) \ge 0 \quad (۳۰)$$

$$-\lambda^{gas}(t) + \mu_2(t)\eta^{Blr}_h \ge 0 \quad (۳۱)$$

$$[-\lambda^{DA}(t) + \mu_1(t)] \le M_1 u_1(t) \quad (۳۲)$$

$$P^{DA}(t) \le M_2(1-u_1(t)) \quad (۳۳)$$

$$-\lambda^{RT}(t) + \mu_1(t) \le M_1 u_2(t) \quad (۳۴)$$

$$P^{RT}(t) \le M_2(1-u_2(t)) \quad (۳۵)$$

$$[-\lambda^{gas}(t) + \mu_1(t)\eta^{CHP}_e + \mu_3(t)\eta^{CHP}_e - \mu_4(t)\eta^{CHP}_e] \le M_1 u_3(t) \quad (۳۶)$$

$$P^{gas}_{CHP}(t) \le M_2(1-u_3(t)) \quad (۳۷)$$

$$-\lambda^{gas}(t) + \mu_2(t)\eta^{Blr}_h \le M_1 u_4(t) \quad (۳۸)$$

$$P^{gas}_{Boil}(t) \le M_2(1-u_4(t)) \quad (۳۹)$$

$$\mu_2(t) + \mu_5(t) \le M_1 u_5(t) \quad (۴۰)$$

$$H_{CHP}(t) \le M_2(1-u_5(t)) \quad (۴۱)$$

رابطه (۲۶) جایگزینی است برای رابطه غیرخطی (۲۳) که مقدار آن با استفاده از تئوری دوگان قوی در رابطه (۲۷) محاسبه می‌شود. روابط (۲۸) تا (۳۱) از دوگان تابع هدف سطح پایین بدست می‌آیند. روابط (۳۲) تا (۴۱) از شرایط KKT بدست می‌آیند.

۵- نتایج مطالعات عددی

به منظور انجام شبیه‌سازی از سیستم تحت مطالعه معرفی شده در شکل ۱ استفاده می‌شود. اطلاعات مربوط به قیمت بازار روز پیش رو، بازار زمان حقیقی و بارهای الکتریکی از مرجع [۲۹] اخذ شده است. اطلاعات بار حرارتی نیز از [۲۵] استخراج شده است. اطلاعات سرعت باد از [۳۰] استخراج شده است. برای تولید قیمت گاز طبیعی از تابع توزیع نرمال با میانگین ۲۰ و انحراف معیار ۱۵ درصد استفاده شده است. میزان بازدهی حرارتی و الکتریکی CHP به ترتیب ۴۵ و ۴۰ درصد است. میزان بازدهی بویلر نیز ۹۰ درصد در نظر گرفته شده

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-12]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1398.8.3.7.2]
[DOI: 10.29252/ieijqp.8.3.59]

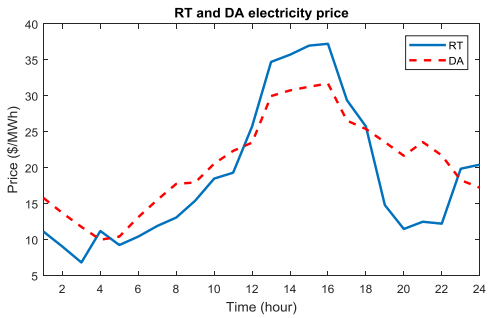
است. شکل ۳ نشان دهنده قیمت بازار انرژی الکتریکی روز پیش رو و زمان حقیقی است. در ساعات پیک قیمت بازار زمان حقیقی بالاتر است و در ساعات پایه قیمت بازار روز پیش رو بیشتر است. میزان بار الکتریکی و حرارتی نیز در شکل ۴ آمده که در آن میزان بار الکتریکی بیش از بار حرارتی است. همچنین بالا بودن بار الکتریکی در ساعاتی از شبانه روز با بالا بودن قیمت بازار تطبیق دارد. در نهایت قیمت گاز طبیعی و توان توربین بادی نیز در شکل ۵ نشان داده شده است. برای شبیه سازی مساله از نرم افزار GAMS و حل کننده CPLEX استفاده شده است. زمان تقریبی اجرای برنامه .... ثانیه است.

با در نظر گرفتن اطلاعات داده شده و با در نظر گرفتن سطح ریسک ۰/۵، خروجی‌های مسأله بدست آمده و در شکل‌های ۶ تا ۸ به نمایش درآمده‌اند. شکل ۶ میزان توان خریداری شده از بازار زمان حقیقی و بازار روز پیش رو را نشان می‌دهد. در ساعات پیک ۱۲ تا ۱۸ که قیمت بازار زمان حقیقی بیش از بازار روز پیش رو است، هیچ توانی از بازار زمان حقیقی خریداری نشده است. به صورتی معکوس، در ساعات ارزان‌تر از بازار زمان حقیقی خریداری شده و توان خریداری شده از بازار روز پیش رو صفر است. این روندی است که همواره از یک مسأله بهینه‌سازی انتظار می‌رود. در واقع همواره انتظار بر این است که مدل های پیشنهادی به بهترین شرایط اقتصادی ممکن منتج شوند. بدین معنی که همواره ساعات ارزان برای خرید انرژی مناسب تر هستند زیرا به هزینه های کمتری منجر می شوند. براساس مدل پیشنهادی نیز این رویه برقرار است.

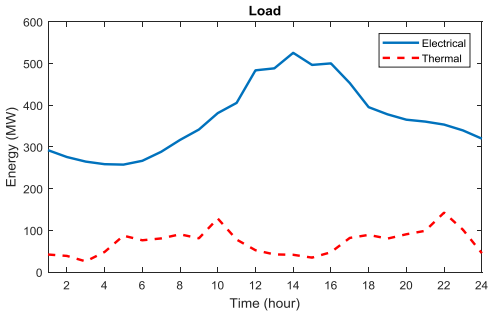
شکل ۷ میزان گاز وارد شده به CHP و بویلر را نشان می‌دهد. قابل توجه‌ترین نکته در این شکل، همراهی CHP برای تأمین بار پیک است. در واقع در ساعات پیک واحد CHP هم تأمین کننده بار حرارتی بوده و هم تأمین کننده بار الکتریکی است. این مهم به دلیل ارزانتر بودن قیمت گاز طبیعی نسبت به انرژی الکتریکی در ساعات پیک است. بدیهی است استفاده از گاز طبیعی به جای خرید از بازار در این ساعات، اقتصادی تر است.

شکل ۸ و ۹ خروجی‌های متغیرهای نایقین مسأله هستند. این شکل‌ها موید این نکته هستند که این متغیرها در بهینه‌سازی مقاوم و برای مقاوم‌سازی در بدترین حالت به چه سمتی گرایش دارند. از این دو شکل مشخص است که بعد از بهینه‌سازی قیمت‌های بازار و گاز طبیعی افزایش یافته است (افزایش در شعاع $1+\alpha$) و توان توربین بادی کاهش یافته است (کاهش با شعاع $1-\alpha$). تمامی این موارد به معنی افزایش قیمت و به عبارتی دیگر تمایل به سمت بدترین حالت ممکن است.

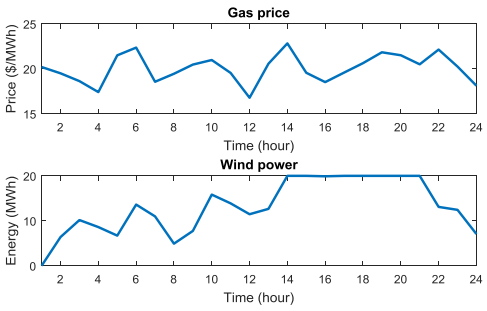
به منظور بررسی دقیق‌تر رفتار مدل پیشنهادی، تحلیل حساسیتی بر روی ضریب ریسک انجام شده و خروجی‌های مدل در جدول ۱ آمده است. مقدار ضریب ریسک (β) از صفر تا ۰/۹ تغییر کرده و میزان خرید از بازار زمان حقیقی، بازار روز پیش رو و تولید توربین بادی و همچنین میان تابع هدف بحرانی در جدول آمده است. افزایش این ضریب به معنای افزایش تصمیمات مقاوم در مسأله است. تاثیر این افزایش بدین صورت بوده که میزان خرید از بازار زمان حقیقی و بازار روز پیش رو افزایش یافته و میزان تولید توربین بادی کاهش یافته است. در واقع از آنجایی که ضریب هزینه در این دو بازار افزایش می‌یابد، لذا میزان خرید نیز با افزایش این ضریب بالا می‌رود. از طرفی چون بالا رفتن این ضریب یعنی بدتر شدن شرایط، بنابراین میزان تولید توربین بادی نیز کاهش می‌یابد و همه این نکات یعنی افزایش تابع هدف بحرانی که در ستون آخر جدول مشاهده می‌شود.



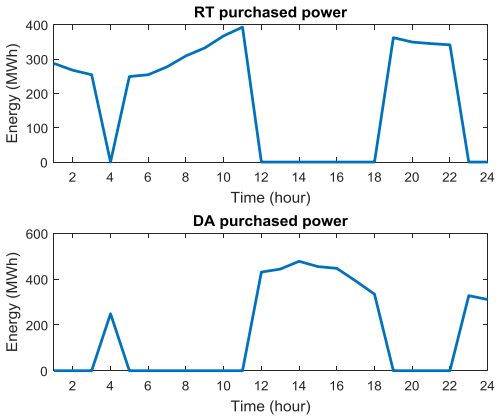
شکل (۳): قیمت بازار انرژی الکتریکی روز پیش رو و زمان حقیقی



شکل (۴): بار الکتریکی و حرارتی

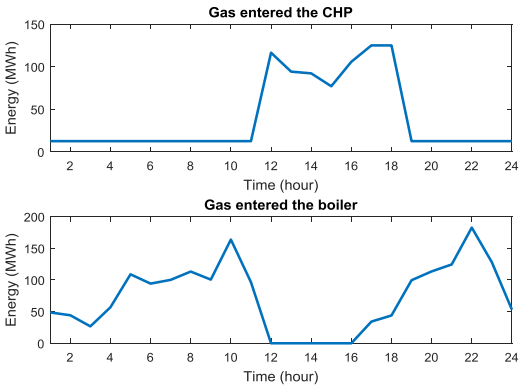


شکل (۵): قیمت گاز طبیعی و توان توربین بادی



شکل (۶): توان خریداری شده از بازار روز پیش رو و زمان حقیقی

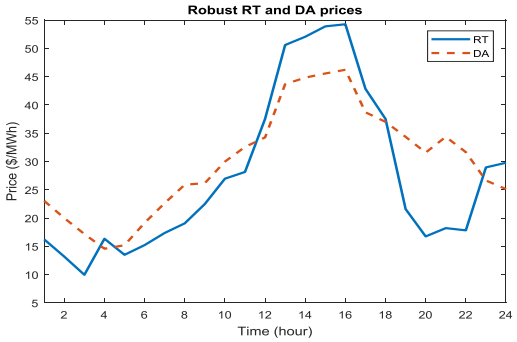
[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-12]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1398.8.3.7.2]
[DOI: 10.29252/ieijqp.8.3.59]



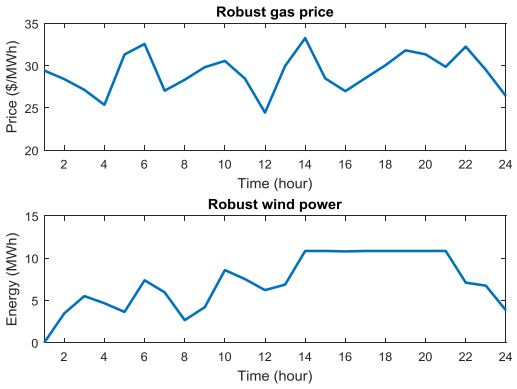
شکل (۷): گاز وارد شده به CHP و بویلر

جدول (۱): تحلیل حساسیت بر روی ضریب ریسک

Δ	P^{WT}	P^{RT}	P^{DA}	β
۲۰۴۶۲۱	۳۲۰	۴۳۱۲	۳۷۹۷	۰
۲۲۵۰۸۳	۲۹۰	۴۳۲۷	۳۸۱۱	۰/۱
۲۶۶۰۰۷	۲۳۰	۴۳۵۸	۳۸۴۰	۰/۳
۳۰۶۹۳۲	۱۷۱	۴۳۸۹	۳۸۶۸	۰/۵
۳۴۷۸۵۶	۱۱۳	۴۴۱۹	۳۸۹۶	۰/۷
۳۸۸۷۸۰	۵۴	۴۴۴۹	۳۹۲۴	۰/۹



شکل (۸): قیمت بازار انرژی الکتریکی زمان حقیقی و بازار روز پیش رو



شکل (۹): توان توربین بادی و قیمت گاز در حالت مقاوم

۶- نتیجه‌گیری

این مقاله یک روش جدید خطی برای بهره‌برداری از هاب انرژی به صورت مقاوم ارائه کرده است. در روش پیشنهاد شده از شرایط KKT و تئوری دوگان قوی برای حل مسأله استفاده شده است. عدم قطعیت‌ها شامل قیمت‌های زمان حقیقی و بازار روز پیش رو، توان تولیدی بادی و قیمت گاز هستند که همه آن‌ها به خوبی توسط روش پیشنهادی مدل شده‌اند. نتایج نشان از افزایش قیمت‌های نایقین و کاهش تولید بادی تا حد ممکن دارد. تحلیل نتایج در ساعات پیک و پایه در مواجهه با بازارهای موجود در سیستم تحت مطالعه، نشان از تصمیمات اقتصادی صحیح در سیستم تحت مطالعه است. علاوه بر این حضور و تولید CHP در ساعات پیک موید درستی تصمیمات حاصل شده توسط مدل خطی پیشنهادی است. همچنین نتایج تحلیل حساسیت نشان از کاهش تولید باد، افزایش خرید از بازار انرژی الکتریکی و افزایش تابع هدف بحرانی با بدتر شدن شرایط است.

نمادها

شمارنده‌ها

t	شماره زمان

متغیرها

$P^{RT}(t)$	انرژی خریداری شده از بازار زمان‌حقیقی (MWh)
ρ	پارامتر نایقین
f_b	تابع هدف پایه ($)
$P_e^{CHP}(t)$	توان الکتریکی تولید شده با CHP (MW)
$P^{WT}(t)$	توان توربین بادی (MW)
$H^{CHP}(t)$	توان حرارتی تولید شده با CHP (MWth)
$P_h^{Blr}(t)$	توان حرارتی تولید شده با بویلر (MWth)
α	شعاع عدم قطعیت
$\lambda^{DA}(t)$	قیمت بازار روز پیش‌رو ($/MWh)
$\lambda^{RT}(t)$	قیمت بازار زمان حقیقی ($/MWh)
$\lambda^{gas}(t)$	قیمت گاز طبیعی ($/MWh)
$\mu_i(t)$	ضریب لاگرانژ
$u_1(t)$	متغیر باینری
$u_2(t)$	متغیر باینری
$u_3(t)$	متغیر باینری
$u_4(t)$	متغیر باینری
$u_5(t)$	متغیر باینری
$C_d(t)$	متغیر کمکی در تابع دوگان
$H_i(x,\bar{\rho})$	مجموعه قیود نامساوی
$G_j(x,\bar{\rho})$	مجموعه قیود مساوی
Δ	مقدار تابع هدف بحرانی

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-12]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1398.8.3.7.2]
[DOI: 10.29252/ieijqp.8.3.59]

$P_{CHP}^{gas}(t)$ مقدار گاز وارد شده به CHP (MWth)

$P_{Boil}^{gas}(t)$ مقدار گاز وارد شده به بویلر (MWth)

$P^{DA}(t)$ میزان انرژی خریداری‌شده و یا به فروش رسیده در بازار روز پیش‌رو (MWh)

پارامترها

$\overline{P}^{WT}(t)$ امید ریاضی توان توربین بادی (MW)

$\overline{\lambda}^{DA}(t)$ امید ریاضی قیمت بازار روز پیش‌رو ($/MWh)

$\overline{\lambda}^{RT}(t)$ امید ریاضی قیمت بازار زمان حقیقی ($/MWh)

$\overline{\lambda}^{gas}(t)$ امید ریاضی قیمت گاز طبیعی ($/MWh)

$\overline{P}^{WT}(t)$ امید ریاضی توان توربین بادی (MW)

$\overline{\rho}$ امید ریاضی پارامتر نایقین

$D_e(t)$ بار الکتریکی (MW)

$D_h(t)$ بار حرارتی (MWth)

$P_e^{CHP,\min}$ حداقل ظرفیت الکتریکی CHP

$P_e^{CHP,\max}$ حداکثر ظرفیت الکتریکی CHP

η_h^{Blr} ضریب بازدهی بویلر

η_h^{CHP} ضریب بازدهی حرارتی CHP

η_e^{CHP} ضریب بازدهی الکتریکی CHP

β ضریب ریسک

M_1 عدد بزرگ

M_2 عدد بزرگ

HPR نرخ تبدیل انرژی حرارتی به الکتریکی

مجموعه‌ها

T دوره زمانی مطالعه

ضمیمه

برای پیاده‌سازی شرایط KKT ابتدا قیود با ضرایب لاگرانژ به تابع هدف به صورت زیر اضافه می‌شوند [۲۷و ۲۸]:.

$$\begin{aligned}L = +\sum_{t=1}^{T}\Bigg[&P^{DA}(t)\overline{\lambda}^{DA}(t)+P^{RT}(t)\overline{\lambda}^{RT}(t)+\\&\overline{\lambda}^{gas}(P_{Boil}^{gas}(t)+P_{CHP}^{gas}(t))\Bigg]-\\&\mu_1(t)[P^{DA}(t)+P^{RT}(t)+P_e^{CHP}(t)+\overline{P}_{LD}^{WT}(t)-D_e(t)]-\\&\mu_2(t)[P_{Boil}^{gas}(t)\eta_h^{Blr}+H_{CHP}(t)-D_h(t)]-\\&\mu_3(t)[P_{CHP}^{gas}(t)\eta_e^{CHP}-P_e^{CHP,\max}]-\\&\mu_4(t)[P_e^{CHP,\min}-P_{CHP}^{gas}(t)\eta_e^{CHP}]-\\&\mu_5(t)[H_{CHP}(t)\le P_{CHP}^{gas}(t)\eta_e^{CHP}\cdot HPR]+\\&\mu_6(t)P^{DA}(t)+\mu_7(t)P^{RT}(t)+\mu_8(t)P_{CHP}^{gas}(t)+\\&\mu_9(t)P_{Boil}^{gas}(t)+\mu_{10}(t)H_{CHP}(t)\end{aligned} \quad (۴۲)$$

سپس نسبت به متغیرها مشتق جزئی گرفته می‌شود و بدین ترتیب سطح پایین در سطح بالا ادغام شده و مدل تک‌سطحی معادل ایجاد می‌شود.

$$\begin{aligned}&\frac{\partial L}{\partial P^{DA}(t)}=\lambda^{DA}(t)-\mu_1(t)+\mu_6(t)=0\\&\frac{\partial L}{\partial P^{RT}(t)}=\lambda^{RT}(t)-\mu_1(t)+\mu_7(t)=0\\&\frac{\partial L}{\partial P_{CHP}^{gas}(t)}=\lambda^{gas}(t)-\mu_1(t)\eta_e^{CHP}-\mu_3(t)\eta_e^{CHP}\\&+\mu_4(t)\eta_e^{CHP}-\mu_8(t)=0\\&\frac{\partial L}{\partial P_{Boil}^{gas}(t)}=\lambda^{gas}(t)-\mu_2(t)\eta_h^{Blr}+\mu_9(t)=0\\&\frac{\partial L}{\partial H_{CHP}(t)}=-\mu_2(t)-\mu_5(t)+\mu_{10}(t)=0\end{aligned} \quad (۴۳)$$

و

$$\begin{aligned}&\mu_6(t)P^{DA}(t)=0\\&\mu_7(t)P^{RT}(t)=0\\&\mu_8(t)P_{CHP}^{gas}(t)=0\\&\mu_9(t)P_{Boil}^{gas}(t)=0\\&\mu_{10}(t)H_{CHP}(t)=0\end{aligned} \quad (۴۴)$$

با استخراج ضرایب $\mu_6(t)$ تا $\mu_{10}(t)$ از روابط بالا، معادلات زیر منتج می‌شود:

$$\begin{aligned}&0\le[-\lambda^{DA}(t)+\mu_1(t)]\perp P^{DA}(t)\ge 0\\&0\le[-\lambda^{RT}(t)+\mu_1(t)]\perp P^{RT}(t)\ge 0\\&0\le[-\lambda^{gas}(t)+\mu_1(t)\eta_e^{CHP}+\mu_3(t)\eta_e^{CHP}\\&+\mu_4(t)\eta_e^{CHP}]\perp P_{CHP}^{gas}(t)\ge 0\\&0\le[-\lambda^{gas}(t)+\mu_2(t)\eta_h^{Blr}]\perp P_{Boil}^{gas}(t)\ge 0\\&0\le[\mu_2(t)+\mu_5(t)]\perp H_{CHP}(t)\ge 0\end{aligned} \quad (۴۵)$$

روابط (۴۵) مقادیری غیرخطی هستند که با دو عدد بزرگ M_1 و M_2 خطی می‌شوند. به عنوان نمونه:

$$\begin{aligned}&[-\lambda^{DA}(t)+\mu_1(t)]\le M_1u_1(t)\\&P^{DA}(t)\le M_2(1-u_1(t))\end{aligned} \quad (۴۶)$$

حال تمامی قیود بیان شده می‌توانند به سطح بالا انتقال داده شوند. اما تابع هدف کاملاً غیر خطی است. لذا به جای تابع هدف از دوگان آن استفاده می‌شود. طبق تئوری دوگان قوی، تابع اولیه و دوگان در نقطه بهینه با یکدیگر مساوی هستند. بنابراین می‌توان به جای تابع هدف از دوگان آن استفاده کرد:

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-12]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1398.8.3.7.2]

[DOI: 10.29252/ieijqp.8.3.59]

$$\sum_{t=1}^{T}\left[\begin{array}{l}P^{DA}(t)\bar{\lambda}^{DA}(t)+P^{RT}(t)\bar{\lambda}^{RT}(t)+\\ \bar{\lambda}^{gas}(P^{gas}_{Boil}(t)+P^{gas}_{CHP}(t))\end{array}\right]= \quad (۴۷)$$
$$\mu_1(t)D_e(t)+\mu_2(t)D_h(t)+$$
$$\mu_3(t)P_e^{CHP,\max}-\mu_4(t)P_e^{CHP,\min}$$

با قیود:

$$-\lambda^{gas}(t)+\mu_1(t)\eta_e^{CHP}+\mu_3(t)\eta_e^{CHP}$$
$$-\mu_4(t)\eta_e^{CHP}\geq 0$$

$$-\lambda^{DA}(t)+\mu_1(t)\geq 0 \quad (۴۸)$$

$$-\lambda^{gas}(t)+\mu_2(t)\eta_h^{Blr}\geq 0$$

$$-\lambda^{RT}(t)+\mu_1(t)\geq 0$$

$$\mu_2(t)+\mu_5(t)\geq 0$$

مراجع

[1] Najafi, A., Falaghi, H, Ramezani, M. "*Medium term operation of the energy hub considering prices and load uncertainty*," ieijqp, Vol. 4, No. 8, pp. 74-82, 2016.

[2] Paudyal, S., Cañizares, CA., Bhattacharya, K. "*Optimal Operation of Industrial Energy Hubs in Smart Grids*," IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 6, No. 2, pp. 684-694, 2015.

[3] Vahid-Pakdel, MJ., Nojavan, S., Mohammadi-ivatloo, B., Zare, K., "*Stochastic optimization of energy hub operation with consideration of thermal energy market and demand response*," Energy Conversion and Management, Vol. 145, No. Supplement C, pp. 117-128, 2017.

[4] Rakipour, D., Barati, H., "*Probabilistic optimization in operation of energy hub with participation of renewable energy resources and demand response*," Energy, Vol. 173, pp. 384-399, 2019.

[5] Davatgaran, V., Saniei, M., Mortazavi, S., "*Optimal bidding strategy for an energy hub in energy market*," Energ, Vol. 148, 2018.

[6] Mostafavi Sani, M., Noorpoor, A., Shafie-Pour Motlagh, M., "*Optimal model development of energy hub to supply water, heating and electrical demands of a cement factory*," Energy, Vol. 177, pp. 574-592, 2019.

[7] Kamyab, F., Bahrami, S., "*Efficient operation of energy hubs in time-of-use and dynamic pricing electricity markets*," Energy, Vol. 106, pp. 343-355, 2016.

[8] Barmayoon, MH., Fotuhi-Firuzabad, M., Rajabi-Ghahnavieh, A., Moeini-Aghtaie, M., "*Energy storage in renewable-based residential energy hubs*," IET Generation, Transmission & Distribution, Vol. 10, No. 13, pp. 3127-3134, 2016.

[9] Moeini-Aghtaie, M., Farzin, H., Fotuhi-Firuzabad, M., Amrollahi, R., "*Generalized Analytical Approach to Assess Reliability of Renewable-Based Energy Hubs*," IEEE Transactions on Power Systems ,Vol. 32, No. 1, pp. 368-377, 2017.

[10] Rastegar, M., Fotuhi-Firuzabad, M., "*Load management in a residential energy hub with renewable distributed energy resources*," Energy and Buildings, Vol. 107, pp. 234-242, 2015.

[11] A. Shabanpour-Haghighi, A. R. Seifi, and T. Niknam, "*A modified teaching–learning based optimization for multi-objective optimal power flow problem*," Energy Conversion and Management, Vol. 77, pp. 597-607, 2014.

[12] Shabanpour-Haghighi, A., Seifi, R., "*Energy Flow Optimization in Multicarrier Systems*," IEEE Transactions on Industrial Informatics, Vol. 11, No. 5, pp. 1067-1077, 2015.

[13] Moeini-Aghtaie, M., Abbaspour, A., Fotuhi-Firuzabad, M., "*Online Multicriteria Framework for Charging Management of PHEVs*," Vehicular Technology, IEEE Transactions on, Vol. 63, No. 7, pp. 3028-3037, 2014.

[14] Moeini-Aghtaie, M., Abbaspour, A., Fotuhi-Firuzabad, M., Dehghanian, P., "*Optimized Probabilistic PHEVs Demand Management in the Context of Energy Hubs*," IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 30, No. 2, pp. 996-1006, 2015.

[15] Roustai, M., Rayati, M., Sheikhi, A., Ranjbar, A., "*A scenario-based optimization of Smart Energy Hub operation in a stochastic environment using conditional-value-at-risk*," Sustainable Cities and Society, Vol. 39, pp. 309-316, 2018.

[16] Heidari, A., Mortazavi, S.S., and Bansal, R.C.: 'Stochastic effects of ice storage on improvement of an energy hub optimal operation including demand response and renewable energies', Applied Energy, to be published.

[17] Bostan, A., Nazar, M.S., Shafie-khah, M., and Catalão, J.P.S.: 'Optimal scheduling of distribution systems considering multiple downward energy hubs and demand response programs', Energy, 2020, 190, pp. 116349

[۱۸] نجفی ارسلان، فلقی حمید، رمضانی مریم. بهره‌برداری میان‌مدت از هاب انرژی با در نظر گرفتن ریسک ناشی از عدم قطعیت‌های قیمت بازار و تقاضای انرژی الکتریکی . نشریه کیفیت و بهره وری صنعت برق ایران. ۱۳۹۴; ۴ (۲) :۷۴-۸۲.

[۱۹] هاشمی سید محسن، شیخ الاسلامی محمدکاظم، پارسامقدم محسن. ارزیابی اقتصادی هاب انرژی با درنظرگرفتن عدم قطعیت‌ها. نشریه کیفیت و بهره وری صنعت برق ایران. ۱۳۹۳; ۳ (۱) :۵۶-۶۶.

[20] Roustaei, M., Niknam, T., Salari, S., Chabok, H., Sheikh, M., Kavousi-Fard, A., and Aghaei, J.: 'A scenario-based approach for the design of Smart Energy and Water Hub', Energy, 2020, 195, pp. 116931

[21] Zhang, X., Che, L., Shahidehpour, M., Alabdulwahab, Abusorrah, AS., "*Reliability-Based Optimal Planning of Electricity and Natural Gas Interconnections for Multiple Energy Hubs*," IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 8, No. 4, pp. 1658-1667, 2017.

[22] Dolatabadi, A., Mohammadi-ivatloo, B., Abapour, M., Tohidi, S., "*Optimal Stochastic Design of Wind Integrated Energy Hub*," IEEE Transactions on Industrial Informatics, Vol. 13, No. 5, pp. 2379-23, 2017.

[23] Dolatabadi, A., Jadidbonab, M., Mohammadi-ivatloo, B., "*Short-Term Scheduling Strategy for Wind-Based Energy Hub: A Hybrid Stochastic/IGDT Approach*," IEEE Transactions on Sustainable Energy, Vol. 10, No. 1, pp. 438-448, 2019.

[24] Majidi, M., Zare, K., "*Integration of Smart Energy Hubs in Distribution Networks Under Uncertainties and*

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-12]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1398.8.3.7.2]
[DOI: 10.29252/ieijqp.8.3.59]

Demand Response Concept," IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 34, No. 1, pp. 566-574, 2019.

[25] Najafi, A., Marzband, M., Mohamadi-Ivatloo, B., Contreras, J., Pourakbari-Kasmaei, M., Lehtonen, M., Godina, R., "*Uncertainty-Based Models for Optimal Management of Energy Hubs Considering Demand Response*," Energies, Vol. 12, No. 8, 2019.

[26] Moradi-Dalvand, M., Mohammadi-Ivatloo, B., Amjady, N., Zareipour, H., Mazhab-Jafari, A., "*Self-scheduling of a wind producer based on Information Gap Decision Theory*," Energy, Vol. 81, No. Supplement C, pp. 588-600, 2015.

[27] Carrio, M. Arroyo, J., Conejo, A., *"A Bilevel Stochastic Programming Approach for Retailer Futures Market Trading*," Power Systems, IEEE Transactions on, Vol. 24, No. 3, pp. 1446-1456, 2009.

[28] Najafi, A., Falaghi, H, Contreras, J., Ramezani, M., "*A Stochastic Bilevel Model for the Energy Hub Manager Problem*," IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. PP, No. 99, pp. 1-1, 2016.

[29] <http://www.nyiso.com>.

[30] North Dakota Agriculture Weather Network. <http://ndawn.ndsu.nodak.edu/wind-speeds.html>.

زیرنویس

1. Energy hub
2. Combined Heat and Power (CHP)
3. Information gap decision theory
4. Karush Kohen Tucker
5. Strong duality theorem

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-12]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1398.8.3.7.2]

[DOI: 10.29252/ieijqp.8.3.59]