نشریه علمی (فصلنامه) «انرژی ایران»
دوره ۲۸، شماره۳، پاییز ۱۴۰۳، صفحه ۱-۱۳

بهره‌برداری بهینه توزیع‌شده شبکه یکپارچه برق–گاز با مدل‌سازی فازی عدم قطعیت رفتاری پاسخگویی بار

محمدمهدی داوری(نویسنده مسئول)
دانشکده برق (قدرت– کنترل)،دانشگاه شهید بهشتی، تهران ،
m_davary@sbu.ac.ir

محمدصادق سپاسیان
دانشکده برق (قدرت– کنترل)،دانشگاه شهید بهشتی، تهران ،

محمدتقی عاملی
دانشکده برق (قدرت– کنترل)،دانشگاه شهید بهشتی، تهران ،

تاریخ دریافت:
۱۴۰۵/۰۲/۲۳
تاریخ پذیرش:
۱۴۰۵/۰۳/۳۱

کلمات کلیدی:
شبکه یکپارچه برق–گاز، پاسخگویی بار، عدم قطعیت رفتاری، مدل‌سازی فازی، بهره‌برداری توزیع‌شده

چکیده

با گسترش سامانه های چندانرژی و افزایش نفوذ منابع تجدیدپذیر، بهره‌برداری بهینه از سامانه‌های یکپارچه برق–گاز با عدم قطعیت‌های فزاینده‌ای مواجه شده است. یکی از مهم‌ترین این عدم قطعیت‌ها، رفتار نامطمئن مصرف‌کنندگان در مشارکت در برنامه‌های پاسخگویی بار است که می‌تواند به تصمیم‌گیری‌های خوش‌بینانه و غیرواقع‌بینانه در بهره‌برداری منجر شود. در این مقاله، یک چارچوب بهره‌برداری بهینه توزیع‌شده برای سامانه یکپارچه برق–گاز ارائه می شود که در آن پاسخگویی بار به صورت یکپارچه و شامل بارهای قابل‌انتقال، قابل‌کاهش و قابل‌جایگزینی بین حامل‌های برق و گاز مدل‌سازی شده است. به‌منظور افزایش واقع‌گرایی مدل، عدم قطعیت رفتاری مصرف‌کنندگان با استفاده از رویکرد فازی مدل شده و به صورت درون‌زا در فرمول‌بندی بهینه سازی لحاظ می شود. مدل پیشنهادی به صورت یک مسئله بهینه سازی مختلط عدد صحیح (MILP) تدوین شده و با بهره‌گیری از روش لاگرانژ افزوده توزیع شده (ADMM)، با در نظر گرفتن استقلال بهره‌برداران برق و گاز حل می‌شود تا ساختار واقعی بازارهای انرژی منعکس گردد. نتایج مطالعات عددی نشان می‌دهد که لحاظ پاسخگویی بار یکپارچه موجب کاهش هزینه‌های بهره‌برداری، کاهش تراکم شبکه و بهبود مدیریت پیک مصرف می‌شود. همچنین، مدل‌سازی فازی عدم قطعیت رفتاری از بروز برنامه‌ریزی‌های خوش‌بینانه جلوگیری کرده و تصمیمات بهره‌برداری پایدارتر و قابل‌اطمینان‌تری را برای سامانه‌های یکپارچه برق–گاز فراهم می‌کند. نوآوری اصلی این پژوهش در ترکیب هم‌زمان پاسخگویی بار یکپارچه، مدل‌سازی فازی عدم قطعیت

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-09-09]

رفتاری و چارچوب بهره‌برداری توزیع‌شـــده در یک ســـاختار منســـجم بهینه‌سازی نهفته است.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-09-09]

شاخص‌ها			
شاخص نوع پاسخگویی بار مجموعه انواع پاسخگویی بار شامل بار قابل انتقال (TL)، بار قابل کاهش (CL) و بار قابل جایگزینی (SL)	$x\in\{TL,CL,SL\}$	شاخص زمان در افق برنامه‌ریزی	t
پارامترها			
حداکثر مقدار بار قابل جایگزینی در زمان t	$L_{SL,t}^{max}$	ضریب هزینه خرید برق از شبکه در زمانt	c_t^{power}
حداکثر توان مجاز ورودی به واحد P۲G	P_{P2G}^{max}	ضریب هزینه تولید واحد توربین گازی	c^{Gas}
حداقل توان مجاز ورودی به واحد P۲G	P_{P2G}^{min}	ضریب هزینه بهره‌برداری واحد تبدیل برق به گاز	c_{P2G}
حداکثر افزایش مقدار بار قابل انتقال در زمان t	$L_{TL,t}^{+\ max}$	ضریب هزینه مربوط به بار قابل انتقال در زمانt	c_{TL}
حداکثر کاهش مقدار بار قابل انتقال در زمان t	$L_{TL,t}^{-\ max}$	ضریب هزینه مربوط به بار قابل کاهش	c_{CL}
حداکثر مقدار بار قابل کاهش در زمان t	$L_{CL,t}^{max}$	ضریب هزینه مربوط به بار قابل جایگزینی	c_{SL}
راندمان تبدیل واحد برق به گاز	η_{P2G}	بار اولیه سیستم در زمان t	$L_{\cdot,t}$
رمپ افزایش تولید واحد توربین گازی	R_{GT}^{up}	طول بازه زمانی	Δt
رمپ کاهش تولید واحد توربین گازی	R_{GT}^{down}	راندمان تبدیل گاز به برق در واحد توربین گازی	η_{GT}
متغیرها			
جمله عدم قطعیت مربوط به نوع پاسخگویی بار x در زمان t	$\tilde{\varepsilon}_{x,t}$	توان تولیدی واحد توربین گازی در زمان t	$P_{GT,t}$
بار نهایی گازی در زمان t	$\hat{L}_t^g$	توان تولیدی منبع بادی در زمان t	$P_{w,t}$
تقاضای کل اسمی سیستم گاز در زمان t	$L_{0,t}^g$	توان مصرفی واحد تبدیل برق به گاز در زمان t	$P_{P2G,t}$
بار کل اسمی سیستم الکتریکی در زمان t	$L_{0,t}^e$	مقدار گاز تولیدی توسط واحد P۲G در زمان t	$G_{P2G,t}$
بار نهایی الکتریکی در زمان t	$\hat{L}_t^e$	میزان مصرف گاز در سیستم در زمان t	G_t^{sup}
مقدار اسمی بار از نوع x در زمان t	$L_{x,t}$	مقدار بار قابل انتقال در زمان t	$L_{TL,t}$
مقدار واقعی بار از نوع x تحت عدم قطعیت در زمان t	$\hat{L}_{x,t}$	مقدار بار قابل کاهش در زمان t	$L_{CL,t}$
مقدار گاز مصرفی واحد توربین گازی در زمان t	$G_{GT,t}$	مقدار بار قابل جایگزینی در زمان t	$L_{SL,t}$

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-09-09]

نشریه علمی (فصلنامه) «انرژی ایران»
دوره ۲۸، شماره۳، پاییز ۱۴۰۳، صفحه ۱-۱۳

۱. مقدمه

افزایش تقاضای انرژی، محدودیت منابع سوخت‌های فسیلی و تشدید نگرانی‌های زیست‌محیطی، نظام‌های انرژی را با چالش‌های ساختاری و بهره‌برداری متعددی مواجه ساخته است [۱]. در چنین شرایطی، حرکت به‌سوی سامانه‌های انرژی کاراتر، منعطف‌تر و کم‌کربن به‌عنوان یکی از رویکردهای کلیدی در مسیر توسعه پایدار مطرح شده است. در این میان، شبکه‌های یکپارچه برق و گاز طبیعی به‌دلیل قابلیت تبادل انرژی میان حامل‌ها، انعطاف‌پذیری عملیاتی و امکان بهره‌گیری هماهنگ از منابع مختلف انرژی، توجه قابل‌توجهی را در میان پژوهشگران و سیاست‌گذاران حوزه انرژی به خود جلب کرده‌اند [۲]. وجود تجهیزاتی نظیر سامانه‌های تبدیل توان به گاز (P۲G) و توربین‌های گازی این امکان را فراهم می‌کند که تعامل مؤثری میان شبکه برق و شبکه گاز برقرار شده و از ظرفیت‌های مکمل این دو شبکه در جهت افزایش کارایی کلی سیستم استفاده شود [۳].

در سال‌های اخیر، توسعه منابع انرژی تجدیدپذیر به‌ویژه انرژی بادی، نقش مهمی در کاهش آلایندگی‌های زیست‌محیطی و وابستگی به سوخت‌های فسیلی ایفا کرده است [۴]. با این حال، ماهیت متغیر و غیرقابل‌پیش‌بینی تولید توان بادی، چالش‌های جدیدی را در بهره‌برداری و برنامه‌ریزی سامانه‌های انرژی ایجاد کرده است [۵]. نوسانات تولید این منابع می‌تواند موجب عدم تعادل میان عرضه و تقاضا، افزایش هزینه‌های بهره‌برداری و حتی کاهش قابلیت اطمینان سیستم شود. در چنین شرایطی، بهره‌گیری از منابع انعطاف‌پذیر در سمت تقاضا به‌عنوان ابزاری مؤثر برای مدیریت این نوسانات مورد توجه قرار گرفته است [۶].

پاسخگویی بار به‌عنوان یکی از مهم‌ترین ابزارهای مدیریت سمت تقاضا، امکان مشارکت فعال مصرف‌کنندگان در بهره‌برداری سامانه‌های انرژی را فراهم می‌کند [۷]. از طریق تغییر الگوی مصرف، انتقال یا کاهش بار در بازه‌های زمانی مختلف و همچنین جایگزینی میان حامل‌های انرژی، برنامه‌های پاسخگویی بار می‌توانند به کاهش پیک مصرف، بهبود بهره‌برداری از منابع تجدیدپذیر و کاهش هزینه‌های بهره‌برداری سیستم کمک کنند [۸]. در مطالعات پیشین، انواع مختلفی از پاسخگویی بار معرفی شده‌اند که از جمله آن‌ها می‌توان به بارهای قابل‌انتقال، قابل‌کاهش و قابل‌جایگزینی اشاره کرد [۹]. با این حال، در بسیاری از پژوهش‌ها این انواع پاسخگویی بار به‌صورت جداگانه یا صرفاً در چارچوب سامانه برق مورد بررسی قرار گرفته‌اند و ارتباط هم‌زمان آن‌ها با شبکه گاز طبیعی کمتر مورد توجه قرار گرفته است [۱۰].

یکی از چالش‌های اساسی در به‌کارگیری برنامه‌های پاسخگویی بار، عدم قطعیت ناشی از رفتار مصرف‌کنندگان است [۱۱]. تصمیم کاربران برای مشارکت در این برنامه‌ها همواره قطعی و قابل پیش‌بینی نیست و به عوامل متعددی نظیر ترجیحات فردی، شرایط اقتصادی و عوامل روان‌شناختی وابسته است [۱۲]. نادیده گرفتن این عدم قطعیت می‌تواند منجر به برنامه‌ریزی‌های غیرواقع‌بینانه شود؛ به‌گونه‌ای که برنامه بهره‌برداری تدوین‌شده در عمل قابلیت اجرا نداشته یا موجب کاهش رضایت مصرف‌کنندگان گردد [۱۳]. از این رو، لحاظ‌کردن عدم قطعیت رفتاری مصرف‌کنندگان به‌عنوان بخشی جدایی‌ناپذیر از مدل‌سازی بهره‌برداری سامانه‌های انرژی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است [۱۴]. در این میان، رویکردهای فازی به‌دلیل توانایی در مدل‌سازی عدم قطعیت‌های ناشی از قضاوت انسانی و رفتارهای غیرقطعی، ابزار مناسبی برای بازنمایی عدم قطعیت رفتاری مصرف‌کنندگان در برنامه‌های پاسخگویی بار به شمار می‌آیند.

علاوه بر این، ساختار بهره‌برداری سامانه‌های انرژی نیز نقش مهمی در طراحی مدل‌های بهینه‌سازی ایفا می‌کند. در بسیاری از مطالعات، فرض می‌شود که شبکه برق و شبکه گاز تحت مدیریت یک بهره‌بردار واحد قرار دارند و مسئله بهره‌برداری به‌صورت متمرکز حل می‌شود [۱۵]. با این حال، در عمل این فرض همواره برقرار نیست؛ زیرا در بسیاری از کشورها شبکه‌های برق و گاز توسط بهره‌برداران مستقل با اهداف اقتصادی و محدودیت‌های اطلاعاتی متفاوت اداره می‌شوند [۱۶]. در چنین شرایطی، استفاده از چارچوب‌های بهره‌برداری توزیع‌شده که ضمن حفظ استقلال بهره‌برداران، هماهنگی لازم میان سامانه‌ها را برقرار کنند، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است [۱۷].

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-09-09]

با توجه به چالش‌های مطرح‌شده، این پژوهش یک چارچوب بهره‌برداری بهینه توزیع‌شده برای شبکه یکپارچه برق و گاز ارائه می‌کند که در آن نقش پاسخگویی بار و عدم قطعیت رفتاری مصرف‌کنندگان به‌صورت هم‌زمان مورد بررسی قرار می‌گیرد. در مدل پیشنهادی، پاسخگویی بار به‌صورت یکپارچه و در قالب بارهای قابل‌انتقال، قابل‌کاهش و قابل‌جایگزینی میان حامل‌های برق و گاز مدل‌سازی شده است. همچنین، به‌منظور افزایش واقع‌گرایی مدل، عدم قطعیت ناشی از رفتار مصرف‌کنندگان در مشارکت در برنامه‌های پاسخگویی بار با استفاده از رویکرد فازی در مدل لحاظ می‌شود. علاوه بر این، با فرض استقلال بهره‌برداران شبکه‌های برق و گاز، مسئله بهره‌برداری در قالب یک چارچوب توزیع‌شده مدل‌سازی و حل می‌شود تا ساختار واقعی تعامل میان این دو شبکه منعکس گردد.

مشارکت‌ها و نوآوری‌های اصلی این پژوهش را می‌توان به‌صورت زیر خلاصه کرد:

۱. ارائه یک چارچوب بهره‌برداری بهینه توزیع‌شده برای شبکه‌های یکپارچه برق و گاز که استقلال بهره‌برداران هر شبکه را در فرآیند تصمیم‌گیری در نظر می‌گیرد؛
۲. مدل‌سازی یکپارچه انواع مختلف پاسخگویی بار شامل بارهای قابل‌انتقال، قابل‌کاهش و قابل‌جایگزینی در محیط شبکه‌های کوپل‌شده برق و گاز؛
۳. لحاظ‌کردن عدم قطعیت رفتاری مصرف‌کنندگان در مشارکت در برنامه‌های پاسخگویی بار با استفاده از رویکرد فازی به‌منظور افزایش واقع‌گرایی مدل بهره‌برداری؛
۴. تحلیل اثر سطح عدم قطعیت رفتاری مصرف‌کنندگان بر نتایج بهره‌برداری شبکه یکپارچه برق–گاز و بررسی پیامدهای آن بر هزینه‌های بهره‌برداری و مدیریت پیک مصرف.

ساختار ادامه مقاله به این صورت سازمان‌دهی شده است. در بخش ۲ مدل‌سازی ریاضی مسئله بهره‌برداری شبکه یکپارچه برق–گاز و نحوه مدل‌سازی اجزای مختلف سیستم ارائه می‌شود. در بخش ۳ روش حل و چارچوب بهینه‌سازی مورد استفاده برای حل مدل پیشنهادی تشریح می‌شود. در بخش ۴ نتایج شبیه‌سازی و مطالعات عددی ارائه شده و عملکرد مدل پیشنهادی در سناریوهای مختلف مورد تحلیل قرار می‌گیرد. در نهایت، بخش ۵ به جمع‌بندی نتایج پژوهش اختصاص دارد.

۲. مدل‌سازی سامانه یکپارچه برق و گاز

۲-۱ روابط کوپل میان شبکه برق و گاز

کوپل فیزیکی میان شبکه برق و شبکه گاز از طریق توربین‌های گازی و واحدهای تبدیل توان به گاز برقرار می‌شود. این نوع مدل‌سازی به‌طور گسترده در مطالعات سامانه‌های انرژی یکپارچه مورد استفاده قرار گرفته است[۸،۵].

- توربین گازی

رابطه بین مصرف گاز و تولید برق توربین گازی به‌صورت خطی و با درنظرگرفتن راندمان تبدیل مدل‌سازی می‌شود:

$$P_{GT,t} = \eta_{GT} G_{GT,t} \quad (۱)$$

محدودیت‌های ظرفیت و تغییرات توان توربین گازی به‌صورت زیر اعمال می‌شوند:

$$P_{GT}^{min} \le P_{GT,t} \le P_{GT}^{max} \quad (۲)$$

$$-R_{GT}^{down} \le P_{GT,t} - P_{GT,t-1} \le R_{GT}^{up} \quad (۳)$$

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-09-09]

این نوع مدل‌سازی خطی برای توربین‌های گازی در چارچوب بهره‌برداری سامانه‌های برق – گاز در مطالعات اخیر به کار گرفته شده‌است.

- واحد تبدیل توان به گاز

رابطه تبدیل توان الکتریکی به گاز طبیعی در واحد مبدل‌های برق-به-گاز (P۲G)[۱] به‌صورت زیر بیان می‌شود:

$$G_{P2G,t} = \eta_{P2G} P_{P2G,t} \quad (۴)$$

همچنین، محدودیت ظرفیت واحد P۲G به‌صورت زیر در نظر گرفته‌می‌شود:

$$P_{P2G}^{min} \le P_{P2G,t} \le P_{P2G}^{max} \quad (۵)$$

مدل‌سازی فوق برای واحدهای P۲G به‌عنوان یک روش متداول در مطالعات سامانه‌های انرژی یکپارچه معرفی شده‌است.

۲-۲ قیود توازن انرژی

توازن انرژی در شبکه برق و شبکه گاز به‌صورت زیر اعمال می‌شود:

- توازن توان الکتریکی

$$P_{GT,t} + P_{w,t} = \hat{L}_t^e + P_{P2G,t} \quad (۶)$$

- توازن گاز طبیعی

$$G_t^{sup} + G_{P2G,t} = \hat{L}_t^g + G_{GT,t} \quad (۷)$$

مدل‌سازی توازن انرژی به‌صورت تجمیعی در مطالعات بهره‌برداری سامانه‌های یکپارچه به‌طور گسترده استفاده شده‌است.

۲-۳ تابع هدف بهره‌برداری

هدف، کمینه‌سازی هزینه کل بهره‌برداری سامانه در افق برنامه‌ریزی است:

$$\min \sum_{t=1}^{T} \left(c_t^{power} P_{GT,t} + c^{Gas} G_t^{sup} + c_{P2G} P_{P2G,t} + c_{CL} L_{CL,t} + c_{TL} (L_{TL,t}^{+} + L_{TL,t}^{-}) + c_{SL} \mid L_{SL,t} \mid \right) \quad (۸)$$

تابع هدف فوق شکل رایج مسئله بهره‌برداری اقتصادی در سامانه‌های انرژی یکپارچه با پاسخگویی بار را دنبال می‌کند.

۲-٤ مدل پاسخگویی بار یکپارچه

در این پژوهش، پاسخگویی بار به‌صورت یکپارچه و در قالب سه نوع بار قابل‌انتقال، قابل‌کاهش و قابل‌جایگزینی برق – گاز مدل‌سازی می‌شود. این تفکیک در مطالعات اخیر سامانه‌های چند انرژی برای افزایش انعطاف‌پذیری بهره‌برداری پیشنهاد شده‌است.

[۱] Power to gas (P۲G)

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-09-09]

- بار قابل‌انتقال

بار قابل‌انتقال به‌صورت اختلاف بار منتقل‌شده به و از هر بازه زمانی تعریف می‌شود:

$$L_{TL,t} = L^{+}_{TL,t} - L^{-}_{TL,t} \quad (۹)$$

محدودیت انتقال بار:

$$0 \le L^{+}_{TL,t} \le {L^{+}_{TL,t}}^{max} \quad (۱۰)$$

$$0 \le L^{-}_{TL,t} \le {L^{-}_{TL,t}}^{max} \quad (۱۱)$$

قید حفظ انرژی در کل افق زمانی:

$$\sum_{t=1}^{T} L_{TL,t} = 0 \quad (۱۲)$$

این نوع مدل‌سازی برای بارهای قابل‌انتقال در چارچوب پاسخگویی بار در مطالعات اخیر مورد استفاده قرار گرفته است.

- بار قابل‌کاهش

مقدار بار قابل‌کاهش در هر بازه زمانی به‌صورت زیر مدل‌سازی می‌شود:

$$0 \le L_{CL,t} \le {L_{CL,t}}^{max} \quad (۱۳)$$

که این نوع مدل‌سازی برای بار قابل‌کاهش به‌عنوان یکی از ابزارهای مدیریت پیک مصرف در مطالعات مختلف گزارش شده‌است.

- بار قابل‌جایگزینی برق – گاز

بار قابل‌جایگزینی امکان انتقال بخشی از تقاضا میان حامل‌های برق و گاز را فراهم می‌کند. بار نهایی برق و گاز به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$L^{e}_{t} = L^{e}_{0,t} + L_{TL,t} - L_{CL,t} - L_{SL,t} \quad (۱۴)$$

$$L^{g}_{t} = L^{g}_{0,t} + \chi_{eg} L_{SL,t} \quad (۱۵)$$

محدودیت مقدار جایگزینی:

$$\left|L_{SL,t}\right| \le {L_{SL,t}}^{max} \quad (۱۶)$$

مدل‌سازی بار قابل‌جایگزینی برق – گاز به‌عنوان یک ابزار کوپل رفتاری در سامانه‌های انرژی یکپارچه در مطالعات اخیر معرفی شده‌است.

۲-۵ مدل‌سازی عدم قطعیت پاسخگویی بار

عدم قطعیت مشارکت مصرف‌کنندگان در برنامه‌های پاسخگویی بار با استفاده از اعداد فازی مثلثی مدل‌سازی می‌شود[۱۸].

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-09-09]

برای هر نوع بار:

$$\tilde{\varepsilon}_{x,t} = (-\varepsilon_{x,t}, 0, +\varepsilon_{x,t}) \qquad x \in \{TL, CL, SL\} \tag{۱۷}$$

مقدار مؤثر پاسخگویی بار:

$$\hat{L}_{x,t} = L_{x,t} + \tilde{\varepsilon}_{x,t} \tag{۱۸}$$

در نتیجه، بار نهایی برق و گاز تحت عدم قطعیت به‌صورت زیر به‌دست می‌آید:

$$\hat{L}^{e}_{t} = L^{e}_{0,t} + \hat{L}_{TL,t} - \hat{L}_{CL,t} - \hat{L}_{SL,t} \tag{۱۹}$$

$$\hat{L}^{g}_{t} = L^{g}_{0,t} + \chi_{eg}\hat{L}_{SL,t} \tag{۲۰}$$

این رویکرد فازی برای مدل‌سازی عدم قطعیت پاسخگویی بار در مطالعات اخیر پیشنهاد شده‌است.

۳. روش حل مسئله

به‌منظور تبیین منسجم فرآیند مدل‌سازی و حل مسئله، چارچوب کلی پژوهش در شکل ۱ به‌صورت فلوچارت ارائه شده است. این فلوچارت، مراحل اصلی توسعه مدل از دریافت داده‌های ورودی تا استخراج برنامه بهره‌برداری نهایی را نشان می‌دهد و ارتباط میان اجزای مختلف چارچوب پیشنهادی را به‌صورت نظام‌مند مشخص می‌سازد.

در گام نخست، داده‌های موردنیاز شامل پروفیل بار برق و گاز، مشخصات فنی تجهیزات، محدودیت‌های بهره‌برداری شبکه، و پارامترهای مربوط به برنامه‌های پاسخگویی بار دریافت می‌شوند. بر این اساس، مدل یکپارچه شبکه برق–گاز با درنظرگرفتن قیود عملکردی هر دو شبکه، موازنه انرژی، و روابط کوپل میان زیرسامانه‌ها تدوین می‌شود. در این چارچوب، وابستگی متقابل میان شبکه برق و گاز از طریق تجهیزات واسط نظیر توربین گازی و واحد تبدیل توان به گاز لحاظ می‌گردد.

در ادامه، ظرفیت انعطاف‌پذیری سمت تقاضا در قالب برنامه‌های پاسخگویی بار شامل بار قابل‌انتقال، بار قابل‌کاهش و بار قابل‌جایگزینی برق–گاز در مدل وارد می‌شود. با توجه به آن‌که میزان مشارکت مصرف‌کنندگان در این برنامه‌ها ماهیتی قطعی ندارد، عدم قطعیت رفتاری آن‌ها با استفاده از رویکرد فازی مدل‌سازی می‌شود. سپس، مقادیر حاصل از این مدل‌سازی به‌گونه‌ای در چارچوب مسئله به‌کار گرفته می‌شوند که اثر عدم قطعیت رفتاری مصرف‌کنندگان در تصمیم‌گیری بهره‌برداری منعکس شود.

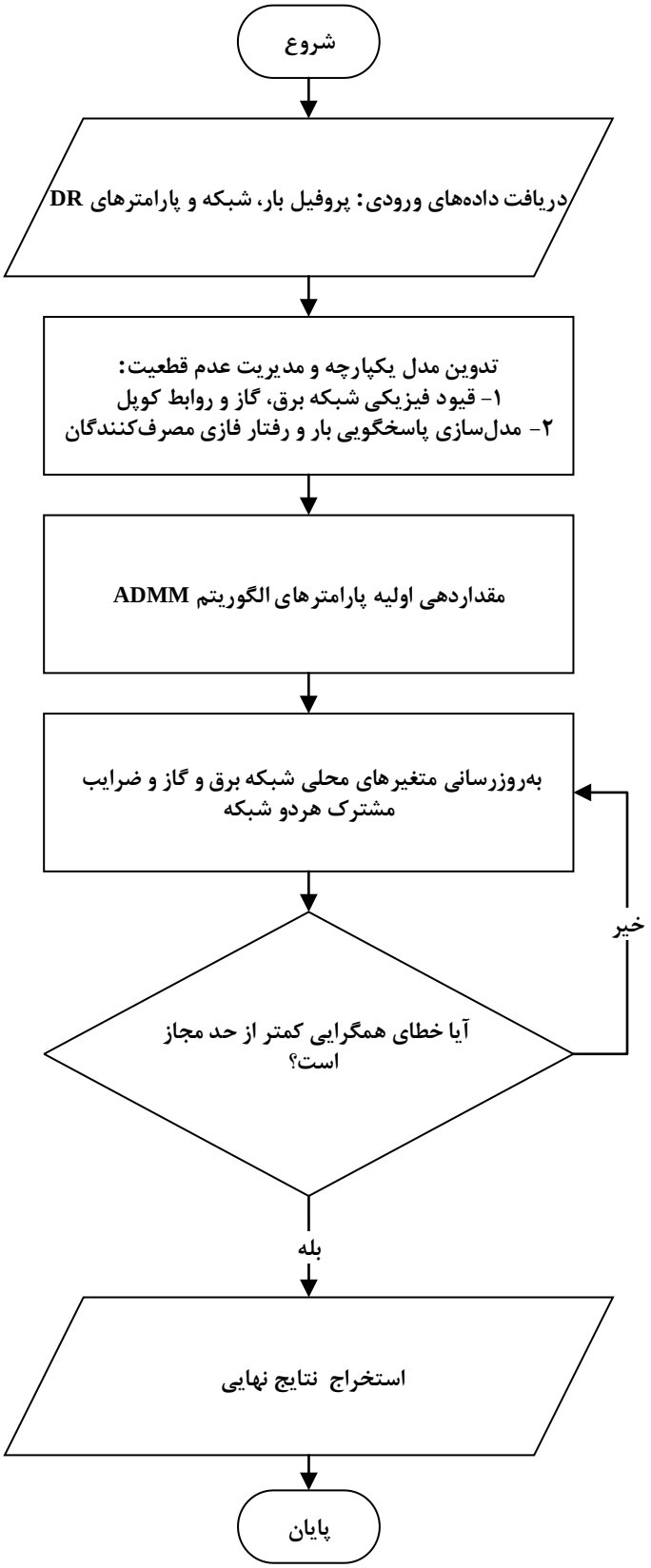
پس از تکمیل مدل‌سازی شبکه و پاسخگویی بار، مسئله نهایی در قالب یک مدل بهینه‌سازی عدد صحیح مختلط صورت‌بندی می‌شود. با توجه به ابعاد مسئله، وجود متغیرهای پیوسته و گسسته، و نیز کوپل‌شدگی میان دو شبکه، حل مستقیم مدل می‌تواند با پیچیدگی محاسباتی قابل‌توجهی همراه باشد. ازاین‌رو، برای دستیابی به پاسخ بهینه با کارایی محاسباتی مناسب، از الگوریتم ADMM استفاده می‌شود.

لازم به تأکید است که به‌کارگیری ADMM در این پژوهش صرفاً یک راهکار حل عددی است و به معنای تفکیک مفهومی مدل پیشنهادی نیست. مدل ارائه‌شده از ابتدا تا انتها به‌صورت یکپارچه تدوین شده و تمامی تصمیمات مربوط به بهره‌برداری شبکه برق و گاز در قالب یک چارچوب هماهنگ تعیین می‌شوند. نقش ADMM در این میان، تسهیل فرآیند حل و بهبود کارایی محاسباتی مسئله، بدون خدشه به یکپارچگی مدل، است.

بر اساس روند نشان‌داده‌شده در شکل ۱، حل مسئله به‌صورت تکراری انجام می‌شود. در هر تکرار، متغیرهای مرتبط با بخش‌های کوپل‌شده به‌روزرسانی شده و هماهنگی میان تصمیمات بهره‌برداری در دو شبکه برقرار می‌شود. این فرآیند تا زمان ارضای معیار توقف ادامه می‌یابد و

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-09-09]

پس از همگرایی، برنامه نهایی بهره‌برداری استخراج می‌شود. در نهایت، نتایج حاصل مبنای ارزیابی اثر پاسخگویی بار و عدم قطعیت رفتاری بر عملکرد شبکه یکپارچه برق–گاز قرار می‌گیرند.



[Downloaded from necjournals.ir on 2026-09-09]

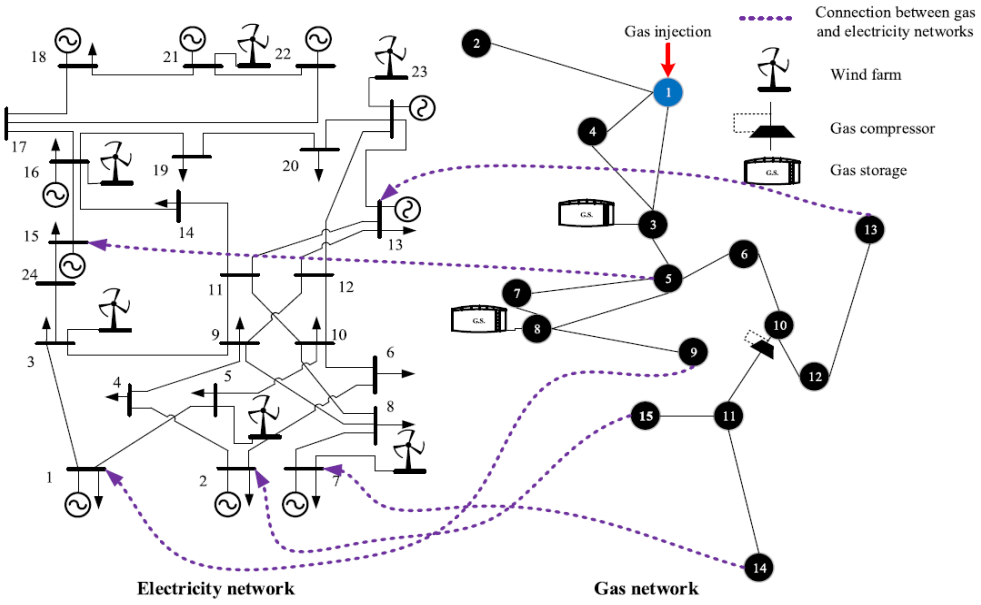
شکل۱ الگوریتم کلی روش حل

٤. نتایج شبیه‌سازی

در این بخش، نتایج حاصل از اجرای مدل پیشنهادی بر روی شبکه‌های آزمون استاندارد و تحت شرایط روز پیک زمستانی ارائه می‌گردد. هدف اصلی، ارزیابی کارایی رویکرد یکپارچه‌سازی پاسخگویی بار فازی در سامانه برق-گاز و سنجش تأثیر آن بر شاخص‌های کلیدی بهره‌برداری است.

٤-١ شبکه و سناریوهای مورد مطالعه

شبیه‌سازی با استفاده از شبکه قدرت ۳۹ با سه IEEE و شبکه گاز ۱۵ گره‌ای استاندارد انجام شده‌است. افق زمانی ۲۴ ساعته با گام یک‌ساعته در نظر گرفته شده و پارامترهای فنی و اقتصادی مربوط به واحدهای تولیدی، مبدل‌های P۲G ، واحدهای CHP و پروفایل بارهای الکتریکی و گازی بر اساس داده‌های مرجع تنظیم گردیده‌اند. عدم قطعیت پاسخگویی بار به‌صورت اعداد فازی مثلثی مدل شده‌است.



شکل ۲ شبکه تست مورد مطالعه

برای مقایسه عملکرد، چهار سناریوی زیر مورد بررسی قرار گرفته‌اند:

- سناریوی A (پایه): بدون هیچ‌گونه قابلیت پاسخگویی بار.
- سناریوی B: پاسخگویی بار قطعی تنها در بخش برق.
- سناریوی C: پاسخگویی بار قطعی یکپارچه در هر دو بخش برق و گاز.
- سناریوی D (پیشنهادی): پاسخگویی بار فازی یکپارچه در سامانه برق-گاز.

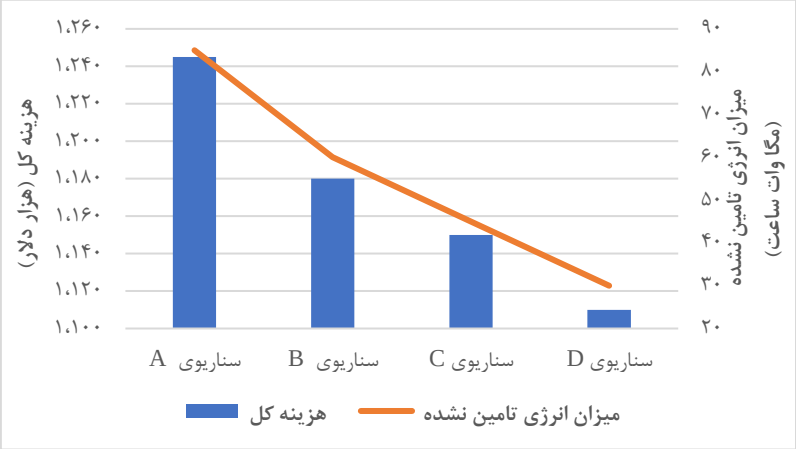
٤-٢. نتایج کمی و مقایسه‌ای

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-09-09]

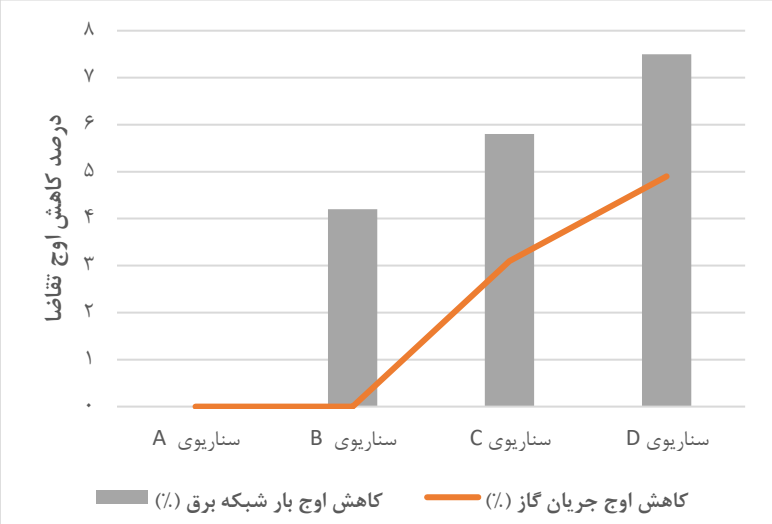
شاخص‌های کلیدی ارزیابی شامل هزینه کل بهره‌برداری، انرژی تأمین نشده[۲]، کاهش اوج بار و کاهش ازدحام خطوط و لوله‌ها هستند. جدول ۱ خلاصه‌ای از این نتایج را برای هر چهار سناریو ارائه می‌دهد.

جدول ۱: مقایسه شاخص‌های عملکرد در سناریوهای مختلف

شاخص عملکرد	سناریوی A	سناریوی B	سناریوی C	سناریوی D
هزینه کل (هزار دلار)	۱،۲۴۵	۱،۱۸۰	۱،۱۵۰	۱،۱۱۰
انرژی تأمین نشده (MWh)	۸۵	۶۰	۴۵	۳۰
کاهش اوج بار شبکه برق (٪)	۰٪	۴,۲٪	۵,۸٪	۷,۵٪
کاهش اوج جریان گاز (٪)	۰٪	۰٪	۳,۱٪	۴,۹٪
تعداد خطوط دارای ازدحام	۷	۵	۳	۱
تعداد لوله‌های دارای ازدحام	۴	۴	۲	۰



شکل ۳ مقایسه هزینه کل و میزان انرژی تأمین نشده در سناریوهای مختلف



شکل ۴ مقایسه درصد کاهش پیک مصرف شبکه‌های برق و گاز در سناریوهای مختلف

[۲] Energy not supplied (ENS)

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-09-09]

٤-۳. تحلیل نتایج

نتایج مندرج در جدول ۱ و شکل ۳ و ۴ به وضوح نشان‌می‌دهد که اعمال پاسخگویی بار به‌صورت یکپارچه و با درنظرگرفتن عدم قطعیت فازی (سناریوی D) منجر به بهبود قابل‌توجهی در تمامی شاخص‌های کلیدی نسبت به سایر سناریوها شده‌است.

- کاهش هزینه: سناریوی D با کاهش ۱۱٪ در هزینه کل نسبت به‌حالت پایه، بیشترین صرفه‌جویی اقتصادی را ایجاد می‌کند. این بهبود ناشی از بهینه‌سازی همزمان تخصیص منابع در دو حامل انرژی و استفاده از انعطاف‌پذیری بارها تحت شرایط عدم قطعیت است.
- افزایش قابلیت اطمینان: شاخص انرژی تأمین نشده در سناریوی پیشنهادی به ۳۰ مگاوات ساعت کاهش‌یافته که نشان‌دهنده ٪۶۴,۷ بهبود در قابلیت اطمینان تأمین انرژی نسبت به‌حالت پایه است. یکپارچه‌سازی عملیات شبکه گاز و برق امکان جبران کمبودهای یک سیستم توسط دیگری را فراهم ساخته‌است.
- کاهش اوج بار و مدیریت ازدحام: سناریوی D موفق شده‌است اوج بار برق را ٪۷,۵ و اوج جریان گاز را ٪۴,۹ کاهش دهد. این امر مستقیماً منجر به کاهش تنش در خطوط و لوله‌ها شده، به‌طوری که تنها یک خط برق در حالت ازدحام باقی می‌ماند و هیچ لوله گازی دچار ازدحام نمی‌شود. شکل ۲ درصد کاهش پیک مصرف شبکه‌های برق و گاز برای هر چهار سناریو به‌صورت گرافیکی مقایسه می‌کند. همان‌طور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، منحنی مربوط به سناریوی D (خط آبی پررنگ) بیشترین کاهش پیک برق و گاز در ساعات اوج (ساعات ۱۸-۲۰) را دارد. این مسئله حاکی از اثر مثبت مدیریت یکپارچه بارهای قابل‌انتقال، قابل‌کاهش و قابل‌جایگزین تحت چارچوب فازی است که به‌صورت هماهنگ در دو شبکه عمل می‌کنند.

- مزیت مدل فازی: مقایسه سناریوی C (قطعی یکپارچه) با سناریوی D (فازی یکپارچه) نشان‌می‌دهد که درنظرگرفتن عدم قطعیت ذاتی پاسخ مصرف‌کنندگان به‌صورت فازی، منجر به تصمیم‌گیری محتاطانه‌تر و کارآمدتر می‌شود. این امر در نتایج به‌صورت کاهش بیشتر هزینه و انرژی تأمین نشده و همچنین بهبود در مدیریت ازدحام نمایان شده‌است. مدل فازی با دربرگرفتن محدوده‌ای از مقادیر محتمل برای پاسخ بار، راه‌حلی را ارائه می‌دهد که در برابر تغییرات واقعی مقاوم‌تر است.

٤-٤. جمع‌بندی بخش نتایج

در مجموع، شبیه‌سازی‌های انجام‌شده مؤید این نکته است که رویکرد پیشنهادی (یکپارچه‌سازی بهره‌برداری سامانه برق-گاز با درنظرگرفتن پاسخگویی بار فازی) دستاوردهای چندجانبه‌ای را به‌همراه دارد. این رویکرد نه‌تنها کارایی اقتصادی را به‌طور معناداری افزایش می‌دهد، بلکه از طریق کاهش اوج بار و مدیریت ازدحام، پایداری عملیاتی هر دو شبکه را بهبود بخشیده و قابلیت اطمینان کل سامانه انرژی را ارتقا می‌بخشد. نتایج، برتری سناریوی مبتنی بر پاسخگویی بار فازی یکپارچه را نسبت به حالات قطعی و غیریکپارچه به وضوح نشان می‌دهند.

۵. نتیجه‌گیری و پیشنهادها

این پژوهش یک چارچوب بهره‌برداری توزیع‌شده برای سامانه یکپارچه برق و گاز ارائه نمود که در آن پاسخگویی بار به‌صورت یکپارچه و با درنظرگرفتن عدم قطعیت رفتاری مصرف‌کنندگان مدل شده‌است. مدل به‌صورت یک مسئله MILP فرمول‌بندی و با استفاده از الگوریتم ADMM به‌عنوان یک ابزار حل هماهنگ‌کننده، به‌صورت توزیع‌شده حل گردید. یافته‌های کلیدی این تحقیق را می‌توان در موارد زیر خلاصه نمود:

۱. یکپارچه‌سازی پاسخگویی بار در سطح برق و گاز منافع اقتصادی و قابلیت اطمینان قابل‌توجهی را به‌همراه دارد. نتایج نشان داد که مدل یکپارچه (سناریوی C) در مقایسه با مدل مستقل برق (سناریوی B)، می‌تواند هزینه کل را تا ۴٪ دیگر کاهش داده و انرژی تأمین نشده را به زیر ۱٪ برساند. این امر عمدتاً ناشی از نقش بار قابل‌جایگزینی (SL) است که به‌عنوان یک ابزار کوپل رفتاری، انعطاف‌پذیری عملیاتی سامانه را به‌شکل چشمگیری افزایش می‌دهد.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-09-09]

۲. درنظرگرفتن عدم قطعیت فازی در مشارکت پاسخگویی بار، اگرچه به قیمت اندکی افزایش هزینه (در این مطالعه حدود ۱٫۴٪)، پایداری و واقع‌گرایی برنامه بهره‌برداری را تضمین می‌کند. مدل فازی از بروز تصمیم‌های بیش از حد تهاجمی که در مواجهه با انحرافات واقعی مصرف‌کنندگان ممکن است به قابلیت اطمینان سیستم آسیب برساند، جلوگیری می‌نماید.

۳. رویکرد حل توزیع‌شده مبتنی بر ADMM نه‌تنها ساختار واقعی بازارهای مستقل برق و گاز را حفظ می‌کند، بلکه با هماهنگی مؤثر بین بهره‌برداران، به راه‌حلی کارا و نزدیک به بهینه سراسری دست می‌یابد. این چارچوب، حریم اطلاعاتی بهره‌برداران را محفوظ نگه‌داشته و امکان پیاده‌سازی در محیط‌های عملیاتی غیرمتمرکز را فراهم می‌سازد.

محدودیت‌های پژوهش و پیشنهاد برای کارهای آینده

با وجود دستاوردهای ذکر شده، این پژوهش دارای محدودیت‌هایی است که زمینه را برای مطالعات آینده فراهم می‌سازد:

- مدل حاضر، عدم قطعیت را تنها در سمت تقاضا و در قالب اعداد فازی مثلثی در نظر گرفته است. ادغام عدم قطعیت‌های تولید (مانند توان بادی و خورشیدی) با استفاده از روش‌های پیشرفته‌تر مانند برنامه‌ریزی تصادفی یا روباست، می‌تواند جامعیت مدل را افزایش دهد.
- شبکه گاز با یک مدل جریان ایستا مدل شده‌است. درنظرگرفتن دینامیک جریان گاز در مطالعات بهره‌برداری بلندمدت‌تر یا در صورت وجود ذخیره‌سازی زیرزمینی گاز، می‌تواند نتایج واقع‌گرایانه‌تری ارائه دهد.
- این تحقیق بر یک روز نمونه متمرکز بود. توسعه مدل برای افق‌های برنامه‌ریزی هفتگی یا فصلی و بررسی اثرات تجمیع پاسخگویی بار در طول زمان، می‌تواند بینش‌های عمیق‌تری برای برنامه‌ریزان فراهم آورد.
- در نهایت، پیاده‌سازی عملیاتی چارچوب پیشنهادی در یک محیط آزمایشی واقعی و تحلیل موانع فنی و اقتصادی آن، گام نهایی ارزشمندی برای تبدیل این پژوهش به یک ابزار کاربردی برای بهره‌برداران شبکه‌های انرژی خواهد بود.

در جمع‌بندی نهایی می‌توان اذعان داشت که چارچوب ارائه‌شده، گامی مؤثر به‌سوی بهره‌برداری هوشمند، پایدار و مقاوم در سامانه‌های انرژی یکپارچه آینده است که در آن همکاری بین حامل‌ها و مشارکت فعال مصرف‌کننده، کلید دستیابی به اهداف اقتصادی و زیست‌محیطی خواهد بود.

مراجع

[۱] IEA, *World Energy Outlook 2023*, International Energy Agency, Paris, ۲۰۲۳.

[۲] Hu, C., Wang, H., & Li, C. (۲۰۲۵). Integrated energy system modeling and optimal scheduling strategy for supply and demand side resource flexibility. *Renewable Energy*, ۱۲٤۰۷۳.

[۳] Yan, Y., Wang, Y., Yan, J., Zhang, H., & Shang, W. (۲۰۲٤). Wind electricity-hydrogen-natural gas coupling: An integrated optimization approach for enhancing wind energy accommodation and carbon reduction. *Applied Energy*, *369*, ۱۲۳٤۸۲.

[٤] REN۲۱, *Renewables 2023 Global Status Report*, Paris, ۲۰۲۳.

[٥] Liu, H., Liu, H., Hu, Q., Zhang, X., Sun, H., & Shahidehpour, M. (۲۰۲٥). SecureDec: A Decentralized Scheduling Pipeline With Federated Learning and Efficient Encryption for Electricity-Gas Coupled Systems. *IEEE Transactions on Smart Grid*.

[٦] Xiong, Z., Zhang, D., & Wang, Y. (۲۰۲٤). Optimal operation of integrated energy systems considering energy trading and integrated demand response. *Energy Reports*, *11*, ۳۳۰۷-۳۳۱٦.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-09-09]

[۷] Samadi Gharehveran, S., Shirini, K., Sarhangzadeh, M., & Gholinavaz, S. (۲۰۲٦). A review of game theory-based approaches for demand side management in smart energy grids. *Power, Control, and Data Processing Systems*, *3*(۱), ۲۸-۳۷.

[۸] Monemi Bidgoli, M. (۲۰۲٤). Stochastic energy scheduling in multiple microgrid systems considering independence index and energy not supply index. *Iranian Journal of Energy*, *27*(۲), ٦۷-۸۷.

[۹] Wang, J., Qiu, R., Wang, Z., & Xi, G. (۲۰۲٥). Low carbon economic dispatch of electric-hydrogen-blended natural gas integrated energy system with multi-energy coupling and integrated demand response. *Energy*, ۱۳۹۷۶۹.

[۱۰] Davari, M. M., Ameli, H., Ameli, M. T., & Strbac, G. (۲۰۲۲). Impact of local emergency demand response programs on the operation of electricity and gas systems. *Energies*, *15*(٦), ۲۱٤٤.

[۱۱] Khademi, V., Soleymani, S., Sharifi, R., & Mozafari, B. (۲۰۲٥). Improving Integrated Energy Systems With Improved Particle Swarm Optimization: Co-Optimizing Renewables, Electric Vehicles, Gas Systems, and Demand Management. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, *2025*(۱), ۳۳۸۲٦۰۱.

[۱۲] Xie, Y., Xu, Y., Yi, Z., Lin, S., Zhang, B., Zhu, X., & Rong, S. (۲۰۲٥). A hybrid stochastic-robust planning approach for the flexible devices in an islanded integrated energy system considering multiple uncertainties and demand response. *IEEE Transactions on Industry Applications*.

[۱۳] Wang, Y., Chen, X., Hong, B., & Zhang, J., "Fuzzy-based demand response modeling in integrated energy systems, " *Energy*, vol. ۲٥٤, p. ۱۲٤۲۱٥, ۲۰۲۳.

[۱٤] Zhao, H., Wu, Q., Wang, J., Liu, Z., & Shahidehpour, M., "Fuzzy optimization-based demand response management in multi-energy systems, " *Applied Energy*, vol. ۳۰٦, p. ۱۱۷۹۷۷, ۲۰۲۲.

[۱٥] Cheng, Q., Zhang, Z., Wang, Y., & Zhang, L. (۲۰۲٥). A review of distributed energy systems: Technologies, classification, and applications. *Sustainability*, *17*(٤), ۱۳٤٦.

[۱٦] Chen, J., Li, K., Zhao, D., Wang, H., & Zhang, C. (۲۰۲٥). Differential privacy-enabled distributed optimization dispatch algorithm with multi-channel communication for integrated energy system. *IEEE Transactions on Smart Grid*.

[۱۷] Pu, Z., & Yi, T. (۲۰۲٥). Low-carbon economic energy sharing and revenue distribution strategy for multi-integrated energy systems considering the uncertainty of new energy output. *Sustainable Energy, Grids and Networks*, *43*, ۱۰۱۷٥۷.

[۱۸] Lu, M., Teng, Y., Chen, Z., & Song, Y. (۲۰۲٥). A bi-level optimization strategy of electricity-hydrogen-carbon integrated energy system considering photovoltaic and wind power uncertainty and demand response. *Scientific Reports*, *15*(۱), ۱۸.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-09-09]