



پژوهش‌های نوین در تصمیم‌گیری

دوره ۹، شماره ۱، بهار ۱۴۰۳، صص ۳۰-۱

نوع مقاله: پژوهشی

## یک مدل ریاضی چندهدفه برای مدیریت بهینه انرژی مناطق مسکونی هوشمند با در نظر گرفتن عدم قطعیت

محمدحسین طحاری مهرجردی<sup>۱</sup>، عالییه کاظمی<sup>۲\*</sup>، حامد شکوری گنجوی<sup>۳</sup>

۱. دانشجوی دکتری مدیریت صنعتی، دانشکده‌گان مدیریت، دانشگاه تهران، تهران، ایران
۲. استاد، دانشکده مدیریت صنعتی و فناوری، دانشکده‌گان مدیریت، دانشگاه تهران، تهران، ایران
۳. دانشیار، دانشکده مهندسی صنایع و سیستم‌ها، دانشکده‌گان فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۲/۲۰

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۸/۳۰

### چکیده

سیستم‌های تولید برق کنونی کشور، نیروگاه‌هایی با مقیاس بزرگ هستند که در مکان‌های دور از مصرف‌کننده قرار دارند. این نیروگاه‌ها از سوخت‌های فسیلی به عنوان منبع اصلی خود استفاده می‌کنند. با افزایش تقاضا برای برق، انتشار گازهای گلخانه‌ای و اتلاف برق بیشتر شده و قابلیت اطمینان کاهش می‌یابد. شهرهای هوشمند راه‌حل مطلوبی را در برابر چالش‌های مذکور ارائه کرده‌اند. داشتن شبکه‌های هوشمند مهمترین ویژگی یک شهر هوشمند است که مدیریت انرژی یکی از اجزای اصلی سیستم انرژی آن به شمار می‌رود. مدیریت صحیح منابع انرژی بهینه‌سازی استفاده از آن و به حداقل رساندن هزینه تولید انرژی و مخاطرات زیست‌محیطی آن را ایجاب می‌کند. در این راستا، این پژوهش یک مدل بهینه‌سازی چندهدفه برای مدیریت انرژی یک شبکه هوشمند ارائه می‌کند. این مدل حداقل‌سازی هزینه، آلودگی، و پیک مصرف را همزمان با حداکثرسازی قابلیت اطمینان به عنوان اهداف خود دنبال می‌کند. در این مدل عدم قطعیت‌های توان خروجی منابع انرژی تجدیدپذیر، تقاضا و قیمت با استفاده از رویکرد تصادفی سناریومحور برنامه‌ریزی شده است. مسأله به صورت یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط فرمول‌بندی و جواب‌های پارتو از روش محدودیت افسیلون و جواب مطلوب پارتو از روش رضایت‌بخشی فازی به دست آمده است. نتایج حاکی از آن است که شبکه هوشمند انرژی علاوه بر صرفه‌جویی در مصرف انرژی، موجب کاهش همزمان هزینه و آلودگی و افزایش قابلیت اطمینان سیستم می‌شود.

**کلیدواژه‌ها:** انرژی‌های تجدیدپذیر، شبکه‌های هوشمند، برنامه‌ریزی چندهدفه



## ۱- مقدمه و بیان مسئله

مصرف انرژی در سراسر جهان به دلیل رشد جمعیت، توسعه شهری و صنعتی شدن در حال افزایش است. انتظار می‌رود جمعیت جهان تا سال ۲۰۴۰ به ۹ میلیارد نفر برسد که نسبت به جمعیت فعلی ۱/۶ میلیارد افزایش یافته می‌یابد. همچنین پیش‌بینی می‌شود اقتصاد جهان در ۲۰ سال آینده تقریباً ۳ درصد رشد کند. این وضعیت ضرورت تأمین انرژی برای افراد بیشتری را برجسته می‌کند [۱]. معمولاً منابع سنتی تولید انرژی مبتنی بر سوخت فسیلی، برای تأمین تقاضای انرژی روزانه انسان در جهان استفاده می‌شوند. به طوری که استفاده از این منابع باعث ایجاد اثرات نامطلوب زیست محیطی مانند تغییرات آب و هوا و گرمایش جهانی می‌شود [۲]. لذا در سال‌های اخیر، مقررات جهانی متعددی به منظور کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای تدوین شده است. توافق پاریس که در سال ۲۰۱۶ توسط ۱۹۵ کشور از جمله ایران تأیید شد، بهترین نمونه است [۳]. همچنین هیأت وزیران ایران کاهش چهار درصدی انتشار گازهای گلخانه‌ای تا سال ۲۰۳۰ میلادی را مصوب کرده است [۴]. سهم بخش برق در آلودگی محیط-زیست قابل توجه است. در سال ۲۰۱۷، بخش برق با سهمی حدود ۴۲ درصد از کل انتشار گازهای گلخانه‌ای مرتبط با انرژی، بزرگترین سهم را در انتشار گازهای گلخانه‌ای مرتبط با انرژی داشته است [۳]. بنابراین، مدیریت صحیح منابع انرژی برای استفاده بهینه از آن و به حداقل رساندن هزینه تولید و مخاطرات زیست محیطی امری ضروری است. بخش صنعت برق ایران مطابق با روند جهانی تجدید ساختار صنایع برق، اقدام به ایجاد تغییرات ساختاری کرده است [۵].

شهرهای هوشمند راه‌حلی ایده‌آل برای غلبه بر چالش‌های زیست‌محیطی شهرنشینی هستند. شهرهای هوشمند راه جدیدی از تفکر در مورد فضای شهری و اهداف توسعه آینده، به عنوان مدل‌هایی از ادغام سیستم‌های انرژی سبز، بهره‌وری انرژی، تحرک پایدار، حفاظت از محیط زیست و پایداری اقتصادی هستند. شبکه هوشمند<sup>۱</sup> و اینترنت اشیا<sup>۲</sup> مهمترین ویژگی‌های یک شهر هوشمند هستند [۶].

یک موضوع مهم در مورد شبکه‌های هوشمند انرژی، مدل‌سازی بهینه بهره‌برداری از این شبکه‌ها است که این موضوع به طور وسیع توسط محققان مورد توجه قرار گرفته است. مدیریت بهینه تولید و توزیع انرژی الکتریکی در زمره مهمترین مسائل کشورهای در حال



توسعه و زمینه‌ساز ایجاد بستری جهت توسعه پایدار کشورها است [۷،۸]. تحقیقات نشان می‌دهد که ۲۰ الی ۳۰ درصد انرژی ساختمان‌های مسکونی را می‌توان از طریق عملیات مدیریت و بهینه‌سازی صرفه‌جویی نمود. بنابراین، پتانسیل بسیار بالایی برای صرفه‌جویی انرژی در ساختمان از طریق بهره‌برداری کارآمد وجود دارد [۹]. از طرفی در شبکه‌های هوشمند انرژی به دلیل وجود تجهیزات اندازه‌گیری پیشرفته، شرایط برای پیاده‌سازی برنامه‌های پاسخگویی بار<sup>۲</sup> به راحتی امکان‌پذیر است و این امر به عنوان یک منبع ارزشمند برای پوشش عدم قطعیت منابع انرژی تجدیدپذیر به شمار می‌رود [۱۰].

هدف اصلی از این پژوهش، مدیریت بهینه انرژی مناطق مسکونی هوشمند با در نظر گرفتن عدم قطعیت انرژی‌های تجدیدپذیر، تقاضا و قیمت بازار است. در ادامه بخش ۲ به بررسی ادبیات و پیشینه تحقیق، بخش ۳ به روش‌شناسی پژوهش، بخش ۴ به بررسی نتایج و بخش انتهایی به نتیجه‌گیری و ارائه پیشنهادات می‌پردازد.

## ۲- ادبیات و پیشینه پژوهش

### ۲-۱- شبکه‌های هوشمند انرژی

در شبکه برق سنتی تسهیلاتی برای جریان اطلاعات در زمان واقعی در میان ذینفعان مختلف مانند تولیدکنندگان، توزیع‌کنندگان، مصرف‌کنندگان و غیره وجود ندارد. تولید، انتقال و توزیع هوشمند و کارآمد از دهه‌ها قبل موضوع مورد توجه محققین بوده است. اصطلاح شبکه هوشمند برای اولین بار توسط خوی، ام بیگویک و دمیر<sup>۳</sup> در سال ۱۹۹۷ معرفی شد. پلتفرم فناوری اروپا شبکه هوشمند را اینگونه تعریف می‌کند: "شبکه برقی که می‌تواند به طور هوشمند اقدامات همه کاربران متصل به ژنراتورها و مصرف‌کنندگان را به منظور ارائه کارآمد منابع برق پایدار، اقتصادی و ایمن یکپارچه کند". اهداف اصلی شبکه هوشمند، کارآمد کردن سیستم قدرت، کاهش پیک بار، به حداقل رساندن هزینه تولید و ترکیب منابع انرژی تجدیدپذیر است [۱۱].

مدیریت سمت تقاضا<sup>۴</sup> ابزار مهمی است که می‌تواند برای اطمینان از پایداری و قابلیت اطمینان سیستم‌های قدرت در زمینه نگرانی‌های زیست محیطی مورد استفاده قرار گیرد. پیشرفت در فناوری‌های ارتباطات اطلاعاتی بخش‌های برق را متحول کرده است و به شرکت‌های برق در



تحقق شبکه‌های هوشمند کمک می‌کند. به طوری که به شرکت‌ها کمک می‌کند تا استراتژی‌های مدیریت سمت تقاضا را در سمت مصرف‌کننده پیاده‌سازی کنند [۱۱]. یکی از برنامه‌های مدیریت سمت تقاضا برنامه‌های پاسخگویی بار است. پاسخگویی بار را این‌گونه تعریف می‌کنند: "تغییر الگوی مصرف برق توسط مشترکین از الگوهای مصرف معمولی خود در پاسخ به تغییرات قیمت برق یا پرداخت‌های تشویقی طراحی شده، برای القای مصرف کمتر برق در زمان‌هایی که قیمت‌های بازار عمده فروشی بالا یا زمانی که قابلیت اطمینان سیستم به خطر می‌افتد" [۳].

## ۲-۲- پیشینه تحقیق

در این بخش به مرور برخی از تحقیقات در حوزه شبکه‌های هوشمند انرژی پرداخته شده است.

وانگ و همکاران<sup>۱</sup> (۲۰۲۳)، یک شبکه هوشمند انرژی برای کاهش هزینه‌های عملیاتی و همچنین کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای ارائه دادند. در این پژوهش برنامه‌های پاسخگویی بار برای عملکرد بهتر در سمت تقاضا به کار گرفته شد [۱۲]. بودونگ و همکاران<sup>۲</sup> (۲۰۲۳)، به مدل‌سازی احتمالی انرژی یک شبکه هوشمند انرژی در حضور منابع مختلف انرژی مانند سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی و منابع انرژی تجدیدپذیر پرداختند. نتایج نشان داد که منابع ذخیره‌ساز انرژی و برنامه‌های پاسخگویی بار در کاهش هزینه‌های شبکه موثر می‌باشند [۱۳]. لیو و همکاران<sup>۳</sup> (۲۰۲۳)، با در نظر گرفتن رابطه انرژی برق و انرژی حرارتی، یک مدل توزیع بار بهینه برای یک شبکه هوشمند پیشنهاد دادند [۱۴]. یانگ و همکاران<sup>۴</sup> (۲۰۲۲)، به کارگیری برنامه پاسخگویی بار در کاهش انتشار آلودگی در شبکه هوشمند انرژی را تحلیل و یک مدل برای محاسبه کاهش انتشار شبکه هوشمند با در نظر گرفتن تعرفه زمان استفاده طراحی کردند [۱۵]. عبدالناصر و همکاران (۲۰۲۲)، یک مدل بهینه‌سازی چندهدفه تصادفی را برای زمان‌بندی بهینه ریزشبکه‌ها پیشنهاد می‌کنند [۱۶]. اقبالی و همکاران (۲۰۲۲)، یک الگوریتم مدیریت تصادفی را برای رسیدگی به عملکرد بهینه ریزشبکه‌های هوشمند ارائه می‌کنند [۱۷]. جلیلیان و همکاران (۲۰۲۲)، یک مدل زمان‌بندی یکپارچه برای ارسال بهینه تقاضای سرمایه‌گذاری، گرمایش، برق، گاز و آب در یک ریزشبکه انرژی پیشنهاد می‌کنند، به طوری که اپراتور ریزشبکه در بازارهای برق، گرمایش و گاز شرکت می‌کند و از امکانات تبدیل انرژی برای پاسخگویی به انواع مختلف تقاضا استفاده می‌کند [۱۸]. نیازوند و همکاران (۲۰۲۱)، یک استراتژی ارزیابی مبتنی بر سناریو



را برای زمان‌بندی بهینه یک شبکه هوشمند انرژی با در نظر گرفتن پارامترهای عدم قطعی و فناوری ذخیره‌سازی و استفاده کربن ارائه می‌کنند [۱۹]. منعیمی بیدگلی و همکاران (۲۰۲۱)، یک چارچوب تصمیم‌گیری چندهدفه برای تعیین زمان‌بندی بهینه یک هاب انرژی پیشنهاد دادند. مدل پیشنهادی هزینه کل، انتشار آلودگی، تلفات توان و میانگین ذخیره را به طور همزمان در نظر می‌گیرد [۲۰]. لیو و همکاران (۲۰۲۰)، یک مدل برنامه‌ریزی بهینه برای مدیریت یک هاب انرژی با نیازهای انرژی برق و گرمایشی ارائه نمودند که هدف آن، کاهش هزینه کل هاب انرژی بود. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که مدل بهینه‌سازی پیشنهادی می‌تواند به طور موثر هزینه کل شبکه هوشمند انرژی را کاهش دهد [۲۱]. کائو و همکاران<sup>۱۱</sup> (۲۰۱۹)، یک سیستم هاب چند انرژی را در حضور منابع انرژی تجدیدپذیر بهینه‌سازی کردند. در این پژوهش یک مدل چندهدفه با اهداف کاهش انتشار کربن و کاهش هزینه عملیات ارائه شد. همچنین از برنامه پاسخگویی بار برای بهبود انعطاف‌پذیری سیستم چندهدفه استفاده شد [۲۲]. اشراقی و همکاران (۲۰۱۹)، مدلی برای راه‌اندازی یک ریزشبکه تولید انرژی چندگانه مبتنی بر هاب انرژی با استفاده از برنامه پاسخگویی بار ارائه دادند. مدل مذکور برای تقاضای انرژی یک ساختمان مسکونی در تهران اعتبارسنجی شد. با هدف حداقل‌سازی هزینه‌ها، مسئله مذکور به صورت یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط مدل‌سازی شد [۲۳].

با توجه به مرور تحقیقات گذشته، مدیریت انرژی و ساختار در شبکه‌های هوشمند انرژی را می‌توان در انواع مختلفی دسته‌بندی نمود. این تقسیم‌بندی شامل تبادل انرژی، اهداف مسأله و عدم قطعیت‌های در نظر گرفته شده است. در برخی تحقیقات گذشته، تبادل انرژی (خرید و فروش انرژی) با شبکه بالادست صورت نگرفته است. همچنین تابع هدف اکثر تحقیقات گذشته، یک یا دوهدفه بوده و معمولاً هدف، مینیمم‌سازی هزینه‌ها و مسائل زیست محیطی بوده است. در این پژوهش علاوه بر اهداف مذکور، توابع کاهش پیک مصرف و افزایش قابلیت اطمینان شبکه نیز همزمان مورد توجه قرار می‌گیرد. همچنین با توجه به دسترسی به انرژی‌های تجدیدپذیر در مقیاس بزرگ در سیستم‌های هوشمند انرژی و تصادفی بودن و نوسانات منابع انرژی تجدیدپذیر، در اکثر تحقیقات پارامترهای شدت تابش خورشید و سرعت باد به عنوان پارامترهای عدم قطعی در مدل در نظر گرفته شده‌اند؛ در این پژوهش علاوه بر پارامترهای



مذکور، سناریوسازی برای پارامترهای قیمت برق و تقاضا نیز صورت گرفته است. جدول ۱ مقایسه برخی از تحقیقات گذشته با پژوهش حاضر را نشان می‌دهد.

توضیح مراحل اجرای پژوهش به صورت زیر است:

- (۱) ابتدا پارامترهای مدل ریاضی به دو دسته پارامترهای قطعی و غیرقطعی تقسیم شدند. با توجه به وضعیت در دسترس بودن داده‌های غیرقطعی، سه نوع عدم قطعیت شامل تصادفی، شناختی و عدم قطعیت عمیق وجود دارد. در عدم قطعیت تصادفی، بر خلاف دو نوع دیگر، داده‌های کافی برای تخمین توزیع احتمال وجود دارد [۲۴]. بر این اساس مسئله تحقیق حاضر از نوع عدم قطعیت تصادفی است و از رویکرد برنامه‌ریزی تصادفی مبتنی بر سناریو<sup>۱۱</sup> برای مقابله با عدم قطعیت تصادفی استفاده شده است.
- (۲) توزیع مربوط به هر پارامتر غیرقطعی مشخص و اقدام به سناریوسازی برای هر یک از این پارامترها گردید. با توجه به ادبیات موضوع توزیع احتمالی سرعت باد، وایبل<sup>۱۲</sup>؛ توزیع احتمالی شدت تابش خورشید، بتا<sup>۱۳</sup> و توزیع احتمالی تقاضای و قیمت، نرمال<sup>۱۴</sup> در نظر گرفته شد [۲۰].
- (۳) با توجه به اینکه در فضای پیوسته هر پارامتر، تعداد بینهایت سناریو وجود دارد؛ آن فضا برای هر پارامتر به هفت قسمت مساوی تقسیم و نماینده هر قسمت و احتمال مربوط به آن قسمت مشخص شد. به دلیل اینکه محاسبه این تعداد سناریو زمانبر و پیچیده است [۲۵]؛ برای اینکه اثر همه سناریوها اعمال شود، از رویکرد ارزش مورد انتظار استفاده شد [۲۶].
- (۴) مدل ریاضی چندهدفه طراحی و با استخراج داده‌های ورودی مدل و با استفاده از زبان برنامه‌نویسی گمز<sup>۱۵</sup> اقدام به حل مدل و مقادیر توابع هدف و متغیرهای مدل مشخص می‌گردد.



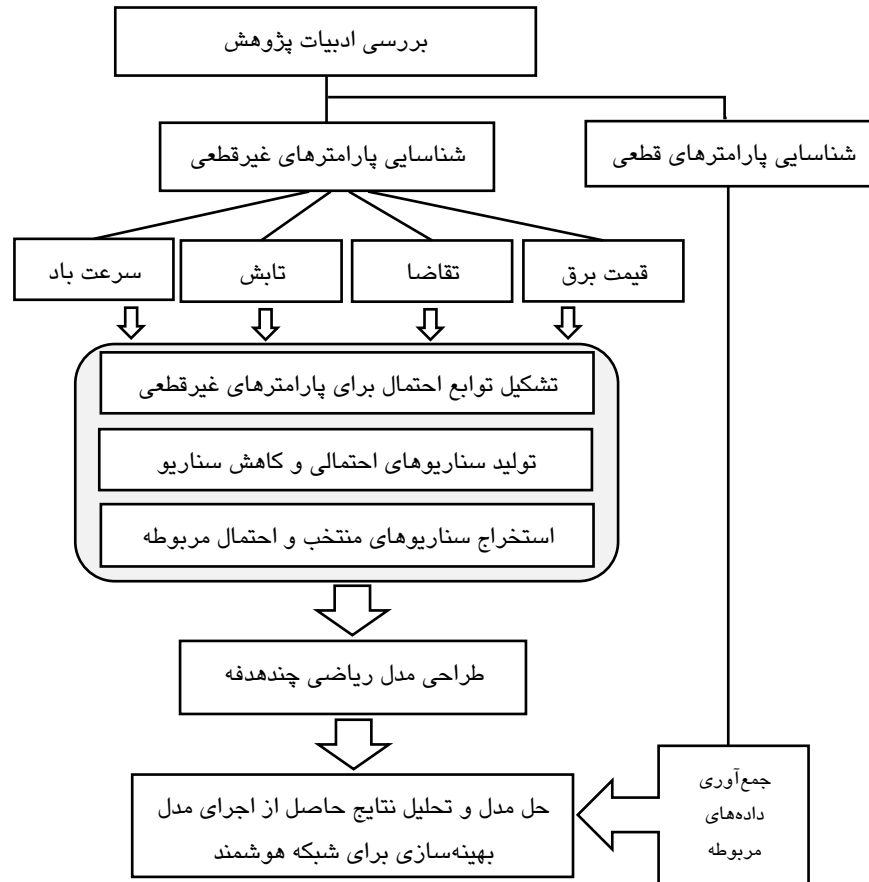
جدول ۱. مقایسه تحقیقات گذشته با پژوهش حاضر

عدم قطعیت‌ها			توابع هدف				امکان تبادل انرژی	پژوهشگران (سال)	
تقاضا	قیمت	تابش خورشید	سرعت باد	قابلیت اطمینان	بیک	آلودگی			هزینه
							*	دارد	اشراقی و همکاران (۲۰۱۹)
							*	دارد	کائو و همکاران (۲۰۱۹)
	*		*				*	دارد	نیازوند و همکاران (۲۰۲۱)
							*	ندارد	جلیلیان و همکاران (۲۰۲۲)
*		*	*				*	دارد	عبدالناصر و همکاران (۲۰۲۲)
							*	ندارد	یانگ و همکاران (۲۰۲۲)
*	*	*	*				*	دارد	وانگ و همکاران (۲۰۲۳)
*	*	*	*				*	ندارد	بودینگ و همکاران (۲۰۲۳)
*	*	*	*	*	*	*	*	دارد	پژوهش حاضر

### ۳- روش‌شناسی پژوهش

#### ۳-۱- مراحل اجرایی پژوهش

روش اجرایی پژوهش در شکل ۱ در صفحه بعدی قابل مشاهده است.



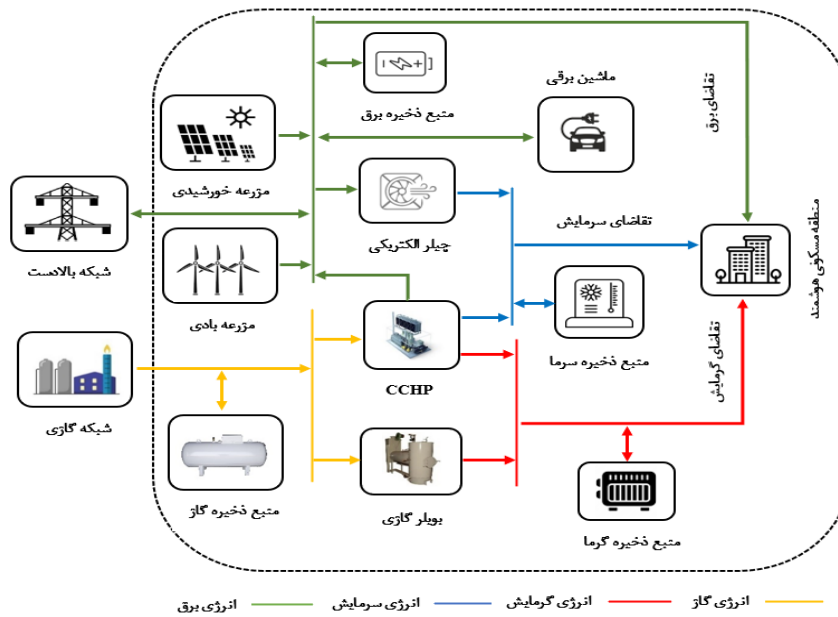
شکل ۱. روند اجرایی پژوهش

### ۳-۲- تعریف پارامترها، متغیرها، اهداف و محدودیت‌های مدل

ساختار شبکه هوشمند این پژوهش در شکل ۲ نشان داده است. همان‌طور که از شکل ۲ مشخص است این ساختار شامل: ۱. واحدهای تأمین انرژی (مزرعه خورشیدی و بادی، شبکه بالادست و گاز طبیعی) ۲. تجهیزات انتقال انرژی (خطوط لوله سرمایش، گرمایش، برق و گاز) ۳. تجهیزات تبدیل انرژی (چیلرهای برق، بویلر گازی و سیستم تولید همزمان برق، گرمایش و سرمایش) ۴. تجهیزات ذخیره انرژی (ذخیره انرژی برق، حرارتی،



سرمایشی و وسیله نقلیه برقی) و ۵. تقاضای انرژی (برق، گرمایش و سرمایش) است. هدف این شبکه تأمین انواع انرژی‌های برق، گرمایش و سرمایش مناطق مسکونی هوشمند با در نظر گرفتن اهداف حداقل‌سازی هزینه‌های بهره‌برداری، حداقل‌سازی انتشار آلودگی، حداقل‌سازی پیک مصرف و حداکثرسازی قابلیت اطمینان شبکه است.



شکل ۲. ساختار شبکه هوشمند مورد بررسی

همچنین مفروضات مدل به صورت زیر است:

- کلیه تجهیزات منطقه مسکونی (تجهیزات تولید، انتقال، ذخیره و مصرف) هوشمند است.
- در خانه هوشمند استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر اولویت دارد.
- انرژی مازاد تولید شده برق، به شبکه سراسری برق فروخته می‌شود.
- در صورت کمبود انرژی برق، انرژی موردنیاز از شبکه سراسری برق خریداری می‌شود.
- خروجی منابع انرژی تجدیدپذیر غیرقطعی است.

تعریف علائم اختصاری مدل در بخش ضمایم آمده است. در ادامه اندیس‌ها، پارامترها و متغیرهای مدل مطابق با جداول ۱، ۲ و ۳ تعریف شده‌اند. لازم به ذکر است از آنجایی که در



محمدحسین طحاری مهرجردی و همکاران ————— یک مدل ریاضی چندهدفه برای....

مدل پیشنهادی در این پژوهش، از هر یک از تجهیزات به تعداد یک واحد در نظر گرفته شده است و همچنین قبل از اجرای مدل ریاضی تصادفی، مدل با استفاده از روش ارزش مورد انتظار، قطعی شده است، اندیس‌های مربوط به سناریوها و تجهیزات در نظر گرفته نشده است.

جدول ۲. توضیح اندیس‌ها

توضیح	اندیس
زمان بر حسب ساعت	$t = 1, 2, \dots, 24$

جدول ۳. پارامترهای مدل

پارامترها	توضیح
$Price_{Buy.Grid}^t$	قیمت خرید برق از شبکه سراسری برق در زمان $t$ (دلار/کیلووات)
$Price_{Sell.Grid}^t$	قیمت فروش برق به شبکه سراسری در زمان $t$ (دلار/کیلووات)
$C_{MC,WT}$	هزینه تعمیرات و نگهداری نیروگاه بادی (دلار/کیلووات)
$C_{MC,PV}$	هزینه تعمیرات و نگهداری نیروگاه خورشیدی (دلار/کیلووات)
$C_{MC,CCHP}$	هزینه تعمیرات و نگهداری واحد CCHP (دلار/کیلووات)
$C_{MC,GB}$	هزینه تعمیرات و نگهداری بویلر گازی (دلار/کیلووات)
$Price_{Gas}^t$	قیمت خرید هر واحد گاز طبیعی در زمان $t$ (دلار/مترمکعب)
$C_{MC,EES}$	هزینه تعمیرات و نگهداری سیستم ذخیره برق (دلار/کیلووات)
$C_{MC,CS}$	هزینه تعمیرات و نگهداری سیستم ذخیره سرمایش (دلار/کیلووات)
$C_{MC,TS}$	هزینه تعمیرات و نگهداری سیستم ذخیره گرمایش (دلار/کیلووات)
$C_{MC,GES}$	هزینه تعمیرات و نگهداری سیستم ذخیره گاز (دلار/مترمکعب)
$C_{MC,EC}$	هزینه تعمیرات و نگهداری چیلر برق (دلار/کیلووات)
$\beta_{Grid,e}$	ضریب انتشار آلودگی برای تبادل انرژی برق با شبکه سراسری برق (کیلوگرم/کیلووات)
$\beta_{CCHP}$	ضریب انتشار آلودگی برای واحد CCHP (کیلوگرم/کیلووات)
$\beta_{GB,e}$	ضریب انتشار آلودگی برای بویلر گازی (کیلوگرم/کیلووات)
$P_{Buy.Grid}^{max}/P_{Sell.Grid}^{max}$	حداکثر تبادل خرید/فروش انرژی برق با شبکه سراسری برق در زمان $t$ (کیلووات)
$LHV$	مقدار حرارتی پایین گاز طبیعی (کیلووات)
$\eta_{CCHP}^E$	راندمان برق واحد CCHP (درصد)
$\eta_{CCHP}^C$	راندمان سرمایش واحد CCHP (درصد)
$\eta_{CCHP}^T$	راندمان گرمایش واحد CCHP (درصد)
$Max_{G_{CCHP}}^t$	حداکثر گاز مصرفی به وسیله واحد CCHP در زمان $t$ (مترمکعب در ساعت)



پارامترها	توضیح
$P_{EC}^{max}$	حداکثر برق ورودی چیلر برق در زمان t (کیلووات)
$COP_{EC}$	ضریب عملکرد چیلر برق
$P_{GB}^{max}$	حداکثر تولید گرمایش بوسیله بویلر گازی در زمان t (کیلووات)
$\eta_{GB}$	راندمان بویلر گازی (درصد)
$\eta_{EV,ch}/\eta_{EV,disch}$	نرخ کارایی شارژ/دیششارژ وسیله نقلیه برق (درصد)
$P_{EV,ch}/P_{EV,disch}$	حداکثر مقدار نیروی شارژ/دیششارژ وسیله نقلیه برق (کیلووات)
$SoC_{EV}^{min}/SoC_{EV}^{max}$	حداکثر / حداقل سطح انرژی ذخیره شده وسیله نقلیه برق (کیلووات)
$AD_{EV,tr}^t$	مسافت طی شده بوسیله وسیله نقلیه برق در زمان t (کیلومتر)
$\eta_{EV}$	مقدار برق مصرفی وسیله نقلیه برق در هر کیلومتر (کیلووات)
$\eta_{EES,ch}/\eta_{EES,disch}$	نرخ کارایی شارژ/دیششارژ باتری ذخیره برق (درصد)
$P_{EES,ch}/P_{EES,disch}$	حداکثر مقدار نیروی شارژ/دیششارژ باتری ذخیره برق (کیلووات)
$SoC_{EES}^{min}/SoC_{EES}^{max}$	حداکثر/حداقل سطح انرژی ذخیره شده برق (کیلووات)
$\eta_{TES,ch}/\eta_{TES,disch}$	نرخ کارایی شارژ/دیششارژ منبع ذخیره گرمایش (درصد)
$P_{TES,ch}/P_{TES,disch}$	حداکثر مقدار نیروی شارژ/دیششارژ منبع ذخیره گرمایش (کیلووات)
$SoC_{TES}^{min}/SoC_{TES}^{max}$	حداکثر/حداقل سطح انرژی ذخیره شده گرمایش (کیلووات)
$\eta_{CES,ch}/\eta_{CES,disch}$	نرخ کارایی شارژ/دیششارژ منبع ذخیره سرمایه‌گذاری (درصد)
$P_{CES,ch}/P_{CES,disch}$	حداکثر مقدار نیروی شارژ/دیششارژ منبع ذخیره سرمایه‌گذاری (کیلووات)
$SoC_{CES}^{min}/SoC_{CES}^{max}$	حداکثر/حداقل سطح انرژی ذخیره شده سرمایه‌گذاری (کیلووات)
$\eta_{GES,ch}/\eta_{GES,disch}$	نرخ کارایی شارژ/دیششارژ منبع ذخیره گاز (درصد)
$P_{GES,ch}/P_{GES,disch}$	حداکثر مقدار نیروی شارژ/دیششارژ منبع ذخیره گاز (کیلووات)
$SoC_{GES}^{min}/SoC_{GES}^{max}$	حداکثر / حداقل سطح انرژی ذخیره شده گاز (کیلووات)
$MR_{up}^E/MR_{down}^E$	حداکثر افزایش/کاهش تقاضای انرژی برق ناشی از برنامه‌های پاسخگویی (درصد)
$MR_{up}^T/MR_{down}^T$	حداکثر افزایش/کاهش تقاضای انرژی گرمایش ناشی از برنامه‌های پاسخگویی (درصد)
$MR_{up}^C/MR_{down}^C$	حداکثر افزایش/کاهش تقاضای انرژی سرمایه‌گذاری ناشی از برنامه‌های پاسخگویی (درصد)
$D_{load,E}^t$	مقدار تقاضای انرژی برق در زمان t (کیلووات)
$D_{load,T}^t$	مقدار تقاضای انرژی گرمایش در زمان t (کیلووات)
$D_{load,C}^t$	مقدار تقاضای انرژی سرمایه‌گذاری در زمان t (کیلووات)
$AD_{load,E}$	میانگین مقدار تقاضای انرژی برق در کل دوره (کیلووات)



جدول ۴. متغیرهای تصمیم

متغیرها	توضیح
$C_{Grid,t}$	هزینه تبادل انرژی برق با شبکه بالادست در زمان $t$ (دلار/کیلووات)
$P_{Buy.Grid}^t$	مقدار انرژی برق خریداری شده از شبکه سراسری برق در زمان $t$ (کیلووات)
$P_{Sell.Grid}^t$	مقدار انرژی برق فروخته شده به شبکه سراسری برق در زمان $t$ (کیلووات)
$C_{WT,t}$	هزینه کل نیروگاه بادی در زمان $t$ (دلار/کیلووات)
$C_{PV,t}$	هزینه کل نیروگاه خورشیدی در زمان $t$ (دلار/کیلووات)
$C_{CCHP,t}$	هزینه کل واحد تولید همزمان برق، گرمایش و سرمایش در زمان $t$ (دلار/کیلووات)
$C_{GB,t}$	هزینه کل بویلر گازی در زمان $t$ (دلار/کیلووات)
$C_{EES,t}$	هزینه کل منبع ذخیره برق در زمان $t$ (دلار/کیلووات)
$C_{TES,t}$	هزینه کل منبع ذخیره گرمایش در زمان $t$ (دلار/کیلووات)
$C_{CES,t}$	هزینه کل منبع ذخیره سرمایش در زمان $t$ (دلار/کیلووات)
$C_{GES,t}$	هزینه کل منبع ذخیره گاز در زمان $t$ (دلار/مترمکعب)
$C_{EC,t}$	هزینه کل چیلر برق در زمان $t$ (دلار/کیلووات)
$P_{WT,s}^t$	مقدار انرژی تولید شده نیروگاه بادی در زمان $t$ تحت سناریو $s$ (کیلووات)
$P_{PV,s}^t$	مقدار انرژی تولید شده نیروگاه خورشیدی در زمان $t$ تحت سناریو $s$ (کیلووات)
$G_{CCHP}^t$	مقدار گاز مصرف شده CCHP در زمان $t$ (مترمکعب)
$P_{ECCHP}^t$	مقدار انرژی برق تولید شده واحد CCHP در زمان $t$ (کیلووات)
$P_{CCCHP}^t$	مقدار انرژی سرمایش تولید شده واحد CCHP در زمان $t$ (کیلووات)
$P_{TCCHP}^t$	مقدار انرژی گرمایش تولید شده واحد CCHP در زمان $t$ (کیلووات)
$P_{EC}^t$	مقدار انرژی سرمایش تولید شده توسط چیلر برق در زمان $t$ (کیلووات)
$P_{POWER,EC}^t$	مقدار برق مصرفی توسط چیلر برق در زمان $t$ (کیلووات)
$P_{GB}^t$	مقدار انرژی گرمایش تولید شده توسط بویلر گازی در زمان $t$ (کیلووات)
$G_{GB}^t$	مقدار گاز مصرفی توسط بویلر گازی در زمان $t$ (مترمکعب)
$G_{Buy}^t$	مقدار خرید گاز توسط در زمان $t$ (مترمکعب)
$P_{EES,ch}^t/P_{EES,disch}^t$	مقدار انرژی شارژ/دیشارژ شده در سیستم ذخیره برق در زمان $t$ (کیلووات)
$P_{TES,ch}^t/P_{TES,disch}^t$	مقدار انرژی شارژ/دیشارژ شده در سیستم ذخیره گرمایش در زمان $t$ (کیلووات)
$P_{CES,ch}^t/P_{CES,disch}^t$	مقدار انرژی شارژ/دیشارژ شده در سیستم ذخیره سرمایش در زمان $t$ (کیلووات)
$P_{GES,ch}^t/P_{GES,disch}^t$	مقدار انرژی شارژ/دیشارژ شده در سیستم ذخیره گاز در زمان $t$ (مترمکعب)
$E_{Grid}^t$	میزان انتشار آلودگی ناشی از تبادل انرژی با شبکه در زمان $t$ (کیلوگرم/کیلووات)
$E_{CCHP}^t$	میزان انتشار آلودگی واحد CCHP در زمان $t$ (کیلوگرم/کیلووات)



متغیرها	توضیح
$C_{Grid,t}$	هزینه تبادل انرژی برق با شبکه بالادست در زمان $t$ (دلار/کیلووات)
$P_{Buy.Grid}^t$	مقدار انرژی برق خریداری شده از شبکه سراسری برق در زمان $t$ (کیلووات)
$E_{GB}^t$	میزان انتشار آلودگی بویلر گازی در زمان $t$ (کیلوگرم/کیلووات)
$SoC_{EV,t}$	سطح انرژی ذخیره شده برق در وسیله نقلیه برق در زمان $t$ (کیلووات)
$P_{EV,ch}^t/P_{EV,disch}^t$	مقدار انرژی شارژ/دیشارژ شده در وسیله نقلیه برق در زمان $t$ (کیلووات)
$X_{EV,ch}^t/X_{EV,disch}^t$	متغیر باینری شارژ/دیشارژ ذخیره برق وسیله نقلیه برق در زمان $t$
$SoC_{EES,t}$	سطح انرژی ذخیره شده برق در باتری در زمان $t$ (کیلووات)
$X_{EES,ch}^t/X_{EES,disch}^t$	متغیر باینری شارژ/دیشارژ باتری ذخیره برق در باتری در زمان $t$
$SoC_{TES,t}$	سطح انرژی ذخیره شده گرمایش در منبع ذخیره در زمان $t$ (کیلووات)
$X_{TES,ch}^t/X_{TES,disch}^t$	متغیر باینری شارژ/دیشارژ باتری ذخیره گرمایش در منبع در زمان $t$
$SoC_{CES,t}$	سطح انرژی ذخیره شده سرمایه‌گذاری در منبع (کیلووات)
$X_{CES,ch}^t/X_{CES,disch}^t$	متغیر باینری شارژ/دیشارژ منبع ذخیره سرمایه‌گذاری در زمان $t$
$SoC_{GES,t}$	سطح انرژی ذخیره شده گاز در منبع ذخیره در زمان $t$ (کیلووات)
$X_{GES,ch}^t/X_{GES,disch}^t$	متغیر باینری شارژ/دیشارژ منبع ذخیره گاز در زمان $t$
$D_{Load,E,up}^t$	افزایش تقاضای انرژی برق ناشی از برنامه پاسخگویی در زمان $t$ (کیلووات)
$D_{Load,E,down}^t$	کاهش تقاضای انرژی برق ناشی از برنامه پاسخگویی در زمان $t$ (کیلووات)
$I_{Load,E,up}^t/I_{Load,E,down}^t$	متغیر باینری افزایش/کاهش تقاضای برق در زمان $t$
$D_{Load,T,up}^t$	افزایش تقاضای انرژی گرمایش ناشی از برنامه پاسخگویی در زمان $t$ (کیلووات)
$D_{Load,T,down}^t$	کاهش تقاضای انرژی گرمایش ناشی از برنامه پاسخگویی در زمان $t$ (کیلووات)
$I_{Load,T,up}^t/I_{Load,T,down}^t$	متغیر باینری افزایش/کاهش تقاضای انرژی گرمایش در زمان $t$
$D_{Load,C,up}^t$	افزایش تقاضای انرژی سرمایه‌گذاری ناشی از برنامه پاسخگویی در زمان $t$ (کیلووات)
$D_{Load,E,DR}^t$	تقاضای انرژی برق بعد از اعمال برنامه پاسخگویی در زمان $t$ (کیلووات)
$D_{Load,C,down}^t$	کاهش تقاضای انرژی سرمایه‌گذاری ناشی از برنامه پاسخگویی در زمان $t$ (کیلووات)
$I_{Load,C,up}^t/I_{Load,C,down}^t$	متغیر باینری افزایش/کاهش تقاضای سرمایه‌گذاری در زمان $t$

### توابع هدف شبکه هوشمند

#### حداقل‌سازی هزینه‌های بهره‌برداری

هزینه بهره‌برداری شامل هزینه تبادل انرژی با شبکه سراسری برق، هزینه‌های مصرف گاز و هزینه‌های تعمیرات و نگهداری است [۱۵، ۱۴].



$$\text{Min}(z_1) = \sum_t (C_{\text{Grid},t} + C_{\text{WT},t} + C_{\text{PV},t} + C_{\text{CCHP},t} + C_{\text{GB},t} + C_{\text{EES},t} + C_{\text{TES},t} + C_{\text{CES},t} + C_{\text{GES},t} + C_{\text{EC},t}) \quad \text{رابطه ۱}$$

$$C_{\text{Grid},t} = (\text{Price}_{\text{Buy.Grid}}^t \times P_{\text{Buy.Grid}}^t) - (\text{Price}_{\text{Sell.Grid}}^t \times P_{\text{Sell.Grid}}^t) \quad \text{رابطه ۲}$$

$$C_{\text{WT},t} = \sum_{s=1}^S \rho_s \times (C_{\text{MC,WT}} \times P_{\text{WT},s}^t) \quad \text{رابطه ۳}$$

$$C_{\text{PV},t} = \sum_{s=1}^S \rho_s \times (C_{\text{MC,PV}} \times P_{\text{PV},s}^t) \quad \text{رابطه ۴}$$

$$C_{\text{CCHP},t} = (G_{\text{CCHP}}^t \times \text{Price}_{\text{Gas}}^t) + ((P_{\text{ECCHP}}^t + P_{\text{CCCHP}}^t + P_{\text{TCCHP}}^t) \times C_{\text{MC,CCHP}}) \quad \text{رابطه ۵}$$

$$C_{\text{GB},t} = P_{\text{GB}}^t \times (C_{\text{MC,GB}} + \text{Price}_{\text{Gas}}^t) \quad \text{رابطه ۶}$$

$$C_{\text{EES},t} = C_{\text{MC,EES}} \times (P_{\text{EES,ch}}^t + P_{\text{EES,disch}}^t) \quad \text{رابطه ۷}$$

$$C_{\text{TES},t} = C_{\text{MC,TES}} \times (P_{\text{TES,ch}}^t + P_{\text{TES,disch}}^t) \quad \text{رابطه ۸}$$

$$C_{\text{CES},t} = C_{\text{MC,CES}} \times (P_{\text{CES,ch}}^t + P_{\text{CES,disch}}^t) \quad \text{رابطه ۹}$$

$$C_{\text{GES},t} = C_{\text{MC,GES}} \times (P_{\text{GES,ch}}^t + P_{\text{GES,disch}}^t) \quad \text{رابطه ۱۰}$$

$$C_{\text{EC},t} = C_{\text{MC,EC}} \times P_{\text{EC}}^t \quad \text{رابطه ۱۱}$$

#### حداقل سازی انتشار آلودگی

انتشار دی اکسید کربن توسط سه جزء از شبکه هوشمند در نظر گرفته می شود. بر اساس میزان تبادلات انرژی با شبکه سراسری برق و واحد تولید همزمان برق، گرمایش و سرمایش و واحد بویلر که از گاز طبیعی برای تولید انرژی استفاده می کنند [۱۰ و ۲۷].

$$\text{Min}(z_2) = \sum_t E_{\text{Grid}}^t + E_{\text{CCHP}}^t + E_{\text{GB}}^t \quad \text{رابطه ۱۲}$$

$$E_{\text{Grid}}^t = P_{\text{Buy.Grid}}^t \times \beta_{\text{Grid},e} \quad \text{رابطه ۱۳}$$

$$E_{\text{CCHP}}^t = P_{\text{CCHP}}^t \times \beta_{\text{CCHP},e} \quad \text{رابطه ۱۴}$$

$$E_{\text{GB}}^t = P_{\text{GB}}^t \times \beta_{\text{GB},e} \quad \text{رابطه ۱۵}$$

#### حداقل سازی پیک مصرف

هدف حداقل سازی پیک مصرف از طریق مجموع قدرمطلق تفاضل تقاضای بار ناشی از اجرای برنامه های پاسخگویی بار با میانگین تقاضای بار برق در طول کل دوره مطالعه بدست می آید [۲۸].

$$\text{Min}(z_3) = \sum_t |D_{\text{load,E,DR}}^t - AD_{\text{load,E}}| \quad \text{رابطه ۱۶}$$

$$AD_{\text{load,E}} = \frac{1}{\gamma} \sum_t D_{\text{load,E}}^t \quad \text{رابطه ۱۷}$$



### حداکثرسازی قابلیت اطمینان

به منظور رسیدن به این هدف، از شاخص میانگین ظرفیت ذخیره منابع ذخیره‌ساز انرژی<sup>۱۶</sup> استفاده می‌شود. این شاخص میانگین انرژی برق، گرمایشی، سرمایه‌ی و گاز ذخیره شده در سیستم‌های ذخیره‌سازی در کل دوره مورد مطالعه را نشان می‌دهد [۲۹].

$$\text{Max}(z_f) = \frac{1}{34} \sum_{i=1}^T [\text{SoC}_{\text{EES},t} + \text{SoC}_{\text{TES},t} + \text{SoC}_{\text{CES},t} + \text{SoC}_{\text{GES},t}] \quad (\text{رابطه ۱۸})$$

### محدودیت‌ها

#### محدودیت‌های تعادل نیروهای برق، گرمایش، سرمایه‌ی و گاز

این قسمت مربوط به محدودیت‌های تعادل کلی انرژی‌های برق، گرمایش، سرمایه‌ی و گاز بین دو طرف تقاضا کننده و عرضه کننده است [۱۴]، [۱۵].

$$(D_{\text{load},E}^t + P_{\text{EES},\text{ch}}^t + P_{\text{EV},\text{ch}}^t + P_{\text{Sell,Grid}}^t + P_{\text{EC}}^t) - (P_{\text{Buy,Grid}}^t + P_{\text{PV}}^t + P_{\text{WT}}^t + P_{\text{EV},\text{disch}}^t + P_{\text{CCHP}}^t + P_{\text{EES},\text{dis}}^t) = 0 \quad (\text{رابطه ۱۹})$$

$$(D_{\text{load},T}^t + P_{\text{TES},\text{ch}}^t) - (P_{\text{CCHP}}^t + P_{\text{TES},\text{dis}}^t + P_{\text{GB}}^t) = 0 \quad (\text{رابطه ۲۰})$$

$$(D_{\text{load},C}^t + P_{\text{CES},\text{ch}}^t) - (P_{\text{CCHP}}^t + P_{\text{CES},\text{dis}}^t + P_{\text{EC}}^t) = 0 \quad (\text{رابطه ۲۱})$$

$$(D_{\text{load},G}^t + P_{\text{GES},\text{ch}}^t + G_{\text{GB}}^t) - (G_{\text{Buy}}^t + P_{\text{GES},\text{dis}}^t) = 0 \quad (\text{رابطه ۲۲})$$

#### محدودیت تبادل انرژی با شبکه سراسری برق

محدودیت‌های زیر مربوط به حد بالا و حد پایین مقدار تبادل انرژی برق با شبکه سراسری برق در هر دوره است [۱۴].

$$0 \leq P_{\text{Buy,Grid}}^t \leq P_{\text{Buy,Grid}}^{\text{max}} \quad (\text{رابطه ۲۳})$$

$$0 \leq P_{\text{Sell,Grid}}^t \leq P_{\text{Sell,Grid}}^{\text{max}} \quad (\text{رابطه ۲۴})$$

#### محدودیت‌های سیستم تولید همزمان برق، گرمایش و سرمایه‌ی

سیستم تولید همزمان برق، حرارت و سرمایه‌ی از سوخت گاز برای تولید انرژی استفاده می‌کند. محدودیت‌های مربوط به مقدار خروجی برق، سرمایه‌ی و گرمایش از این سیستم به صورت معادلات زیر است [۲۰].

$$P_{\text{ECCHP}}^t = G_{\text{CCHP}}^t \times \text{LHV} \times \eta_{\text{CCHP}}^E \quad (\text{رابطه ۲۵})$$

$$P_{\text{CCCHP}}^t = G_{\text{CCHP}}^t \times \text{LHV} \times \eta_{\text{CCHP}}^C \quad (\text{رابطه ۲۶})$$

$$P_{\text{TCCHP}}^t = G_{\text{CCHP}}^t \times \text{LHV} \times \eta_{\text{CCHP}}^T \quad (\text{رابطه ۲۷})$$

$$0 \leq G_{\text{CCHP}}^t \leq \text{Max}_{G_{\text{CCHP}}^t} \quad (\text{رابطه ۲۸})$$



### محدودیت‌های چیلر برق

برق منبع ورودی چیلر برق است و خروجی آن نیروی سرمایش است [۲۲].

$$0 \leq P_{EC}^t \leq P_{EC}^{\max} \quad \text{رابطه ۲۹}$$

$$PC_{EC}^t = P_{EC}^t \times COP_{EC} \quad \text{رابطه ۳۰}$$

### محدودیت‌های بویلر گازی

گاز منبع ورودی بویلر گازی است و خروجی آن نیروی گرمایش است [۱۵].

$$0 \leq P_{GB}^t \leq P_{GB}^{\max} \quad \text{رابطه ۳۱}$$

$$P_{GB}^t = G_{GB}^t \times \eta_{GB} \quad \text{رابطه ۳۲}$$

### وسیله نقلیه برق

محدودیت ۳۳ نشان‌دهنده سطح برق ذخیره شده در وسیله نقلیه برق در دوره آتی است. محدودیت ۳۴ نشان‌دهنده این است که وضعیت ذخیره برق وسیله نقلیه در هر دوره  $t$  دارای حداکثر و حداقل است. محدودیت ۳۵ مقدار برق مصرفی وسیله نقلیه در دوره فعلی را نشان می‌دهد. با توجه به اینکه در هر دوره وسیله نقلیه می‌تواند وظیفه شارژ یا دشارژ را بر عهده بگیرد مقدار آن صفر و یا یک است (محدودیت‌های ۳۶ تا ۳۸) [۱۶].

$$SoC_{EV,t+\Delta t} = SoC_{EV,t} + ((\eta_{EV,ch} \times P_{EV,ch}^t) - (P_{EV,disch}^t / \eta_{EV,disch}) - (P_{EV,tr}^t)) \quad \text{رابطه ۳۳}$$

$$SoC_{EV}^{\min} \leq SoC_{EV,t} \leq SoC_{EV}^{\max} \quad \text{رابطه ۳۴}$$

$$P_{EV,tr}^t = AD_{EV,tr}^t \times \eta_{EV} \quad \text{رابطه ۳۵}$$

$$0 \leq P_{EV,ch}^t \leq X_{EV,ch}^t \times P_{EV,ch} \quad \text{رابطه ۳۶}$$

$$0 \leq P_{EV,disch}^t \leq X_{EV,disch}^t \times P_{EV,disch} \quad \text{رابطه ۳۷}$$

$$0 \leq X_{EV,ch}^t + X_{EV,disch}^t \leq 1 \quad \text{رابطه ۳۸}$$



### محدودیت‌های منابع ذخیره

روابط ۳۹ الی ۴۴ مربوط به منبع ذخیره برق، روابط ۴۵ الی ۵۰ مربوط به منبع ذخیره گرمایش، روابط ۵۱ الی ۵۶ مربوط به منبع ذخیره سرمایه‌ش و روابط ۵۷ الی ۶۲ مربوط به منبع ذخیره گاز است که به صورت معادلات ذیل تعریف شده است [۱۸].

### محدودیت‌های منابع ذخیره برق

$$\begin{aligned} \text{SoC}_{\text{EES},t+1} &= \text{SoC}_{\text{EES},t} + (\eta_{\text{EES},\text{ch}} \times P_{\text{EES},\text{ch}}^t - P_{\text{EES},\text{disch}}^t / \eta_{\text{EES},\text{disch}}) \times \Delta t && \text{رابطه ۳۹} \\ \text{SoC}_{\text{EES}}^{\min} &\leq \text{SoC}_{\text{EES},t} \leq \text{SoC}_{\text{EES}}^{\max} && \text{رابطه ۴۰} \\ \cdot &\leq P_{\text{EES},\text{ch}}^t \leq X_{\text{EES},\text{ch}}^t \times P_{\text{EES},\text{ch}} && \text{رابطه ۴۱} \\ \cdot &\leq P_{\text{EES},\text{disch}}^t \leq X_{\text{EES},\text{disch}}^t \times P_{\text{EES},\text{disch}} && \text{رابطه ۴۲} \\ \cdot &\leq X_{\text{EES},\text{ch}}^t + X_{\text{EES},\text{disch}}^t \leq 1 && \text{رابطه ۴۳} \\ \text{SoC}_{\text{EES},t1} &= \text{SoC}_{\text{EES},t24} && \text{رابطه ۴۴} \end{aligned}$$

### محدودیت‌های منبع ذخیره گرمایش

$$\begin{aligned} \text{SoC}_{\text{TES},t+1} &= \text{SoC}_{\text{TES},t} + (\eta_{\text{TES},\text{ch}} \times P_{\text{TES},\text{ch}}^t - P_{\text{TES},\text{disch}}^t / \eta_{\text{TES},\text{disch}}) \times \Delta t && \text{رابطه ۴۵} \\ \text{SoC}_{\text{TES}}^{\min} &\leq \text{SoC}_{\text{TES},t} \leq \text{SoC}_{\text{TES}}^{\max} && \text{رابطه ۴۶} \\ \cdot &\leq P_{\text{TES},\text{ch}}^t \leq X_{\text{TES},\text{ch}}^t \times P_{\text{TES},\text{ch}} && \text{رابطه ۴۷} \\ \cdot &\leq P_{\text{TES},\text{disch}}^t \leq X_{\text{TES},\text{disch}}^t \times P_{\text{TES},\text{disch}} && \text{رابطه ۴۸} \\ \cdot &\leq X_{\text{TES},\text{ch}}^t + X_{\text{TES},\text{disch}}^t \leq 1 && \text{رابطه ۴۹} \\ \text{SoC}_{\text{TES},t1} &= \text{SoC}_{\text{TES},t24} && \text{رابطه ۵۰} \end{aligned}$$

### محدودیت‌های منبع ذخیره سرمایه‌ش

$$\begin{aligned} \text{SoC}_{\text{CES},t+1} &= \text{SoC}_{\text{CES},t} + (\eta_{\text{CES},\text{ch}} \times P_{\text{CES},\text{ch}}^t - P_{\text{CES},\text{disch}}^t / \eta_{\text{CES},\text{disch}}) \times \Delta t && \text{رابطه ۵۱} \\ \text{SoC}_{\text{CES}}^{\min} &\leq \text{SoC}_{\text{CES},t} \leq \text{SoC}_{\text{CES}}^{\max} && \text{رابطه ۵۲} \\ \cdot &\leq P_{\text{CES},\text{ch}}^t \leq X_{\text{CES},\text{ch}}^t \times P_{\text{CES},\text{ch}} && \text{رابطه ۵۳} \\ \cdot &\leq P_{\text{CES},\text{disch}}^t \leq X_{\text{CES},\text{disch}}^t \times P_{\text{CES},\text{disch}} && \text{رابطه ۵۴} \\ \cdot &\leq X_{\text{CES},\text{ch}}^t + X_{\text{CES},\text{disch}}^t \leq 1 && \text{رابطه ۵۵} \\ \text{SoC}_{\text{CES},t1} &= \text{SoC}_{\text{CES},t24} && \text{رابطه ۵۶} \end{aligned}$$

### محدودیت‌های منبع ذخیره گاز

$$\begin{aligned} \text{SoC}_{\text{GES},t+1} &= \text{SoC}_{\text{GES},t} + (\eta_{\text{GES},\text{ch}} \times P_{\text{GES},\text{ch}}^t - P_{\text{GES},\text{disch}}^t / \eta_{\text{GES},\text{disch}}) \times \Delta t && \text{رابطه ۵۷} \\ \text{SoC}_{\text{GES}}^{\min} &\leq \text{SoC}_{\text{GES},t} \leq \text{SoC}_{\text{GES}}^{\max} && \text{رابطه ۵۸} \\ \cdot &\leq P_{\text{GES},\text{ch}}^t \leq X_{\text{GES},\text{ch}}^t \times P_{\text{GES},\text{ch}} && \text{رابطه ۵۹} \end{aligned}$$



$$\bullet \leq P_{GES,disch}^t \leq X_{GES,disch}^t \times P_{GES,disch} \quad \text{رابطه ۶۰}$$

$$\bullet \leq X_{GES,ch}^t + X_{GES,disch}^t \leq 1 \quad \text{رابطه ۶۱}$$

$$SoC_{GES,t1} = SoC_{GES,t24} \quad \text{رابطه ۶۲}$$

#### محدودیت‌های برنامه‌های پاسخگویی بار

در این پژوهش برنامه‌های قیمت‌محور مبتنی بر قیمت‌گذاری زمان استفاده<sup>۱۷</sup> بکار گرفته شده است. محدودیت‌های این برنامه برای انرژی‌های برق، گرمایش و سرمایش به ترتیب در ادامه تعریف شده است [۱۴].

#### محدودیت‌های برنامه‌های پاسخگویی بار برق

$$\sum_{t=1}^T D_{Load,E,up}^t = \sum_{t=1}^T D_{Load,E,down}^t \quad \text{رابطه ۶۳}$$

$$\bullet \leq D_{Load,E,up}^t \leq MR_{up}^E \times D_{Load,E}^t \times I_{Load,E,up}^t \quad \text{رابطه ۶۴}$$

$$\bullet \leq D_{Load,E,down}^t \leq MR_{down}^E \times D_{Load,E}^t \times I_{Load,E,down}^t \quad \text{رابطه ۶۵}$$

$$\bullet \leq I_{Load,E,up}^t + I_{Load,E,down}^t \leq 1 \quad \text{رابطه ۶۶}$$

#### محدودیت‌های برنامه‌های پاسخگویی بار گرمایش

$$\sum_{t=1}^T D_{Load,T,up}^t = \sum_{t=1}^T D_{Load,T,down}^t \quad \text{رابطه ۶۷}$$

$$\bullet \leq D_{Load,T,up}^t \leq MR_{up}^T \times D_{Load,T}^t \times I_{Load,T,up}^t \quad \text{رابطه ۶۸}$$

$$\bullet \leq D_{Load,T,down}^t \leq MR_{down}^T \times D_{Load,T}^t \times I_{Load,T,down}^t \quad \text{رابطه ۶۹}$$

$$\bullet \leq I_{Load,T,up}^t + I_{Load,T,down}^t \leq 1 \quad \text{رابطه ۷۰}$$

#### محدودیت‌های برنامه‌های پاسخگویی بار سرمایش

$$\sum_{t=1}^T D_{Load,C,up}^t = \sum_{t=1}^T D_{Load,C,down}^t \quad \text{رابطه ۷۱}$$

$$\bullet \leq D_{Load,C,up}^t \leq MR_{up}^C \times D_{Load,C}^t \times I_{Load,C,up}^t \quad \text{رابطه ۷۲}$$

$$\bullet \leq D_{Load,C,down}^t \leq MR_{down}^C \times D_{Load,C}^t \times I_{Load,C,down}^t \quad \text{رابطه ۷۳}$$

$$\bullet \leq I_{Load,C,up}^t + I_{Load,C,down}^t \leq 1 \quad \text{رابطه ۷۴}$$



### ۳-۳- روش حل مدل ریاضی چندهدفه

برنامه‌ریزان شبکه هوشمند انرژی معمولاً در مسائل مدیریت انرژی توابع هدف چندگانه را در نظر می‌گیرند، از این رو یافتن پاسخ‌های قابل قبول و بهینه‌ای که برای همه توابع هدف مناسب است، ضروری به نظر می‌رسد. روش‌های مختلفی برای حل مسائل چندهدفه وجود دارد که یکی از آنها روش محدودیت افسیلون<sup>۱۸</sup> است. مبنای کلی این روش این است که یکی از توابع مورد نظر را تابع هدف اصلی و توابع دیگر را به عنوان محدودیت در نظر می‌گیرد [۱۹]:

مدل ریاضی این روش به صورت ذیل است:

$$\begin{aligned} & \text{Max OF1}(x) \\ & \text{s. t:} \\ & \text{OF2}(x) \geq \varepsilon_\gamma \\ & \text{OF3}(x) \geq \varepsilon_\gamma \\ & \text{OF4}(x) \geq \varepsilon_\xi \\ & \vdots \\ & \text{OF}_k(x) \geq \varepsilon_k \\ & x \in S \end{aligned} \quad \text{رابطه ۷۵}$$

در مدل بالا  $x$  به عنوان بردار متغیرهای تصمیم و  $S$  به عنوان منطقه موجه شناخته می‌شود. برای یافتن پاسخ مطلوب از بین نقاط پارتوی بدست آمده از روش محدودیت افسیلون، از روش رضایت‌بخشی فازی<sup>۱۹</sup> استفاده شده است. از رابطه ۷۶ برای بی‌بعدسازی اهداف و از رابطه ۷۷ برای بدست آوردن نقطه بهینه استفاده می‌شود. به این ترتیب ابتدا مقدار حداقل تابع هدف انتخاب شده به دست می‌آید و سپس با به حداکثر رساندن مقدار حداقل، راه حل بهینه مطلوب به دست می‌آید.

$$\mu_i = \begin{cases} 1 & f_k \leq f_k^{\text{Min}} \\ \frac{f_k^{\text{Max}} - f_k}{f_k^{\text{Max}} - f_k^{\text{Min}}} & f_k^{\text{Min}} < f_k < f_k^{\text{Max}} \\ 0 & f_k \geq f_k^{\text{Max}} \end{cases} \quad \text{رابطه ۷۶}$$

$$\max \mu = \max \{ \min (\mu_1, \mu_2, \mu_3, \mu_4, \dots) \} \quad \text{رابطه ۷۷}$$



## ۴- تجزیه و تحلیل داده‌ها

### ۴-۱- آماده‌سازی پارامترهای قطعی و غیرقطعی

بعد از مشخص کردن پارامترهای مدل، سرعت باد، شدت تابش خورشید، قیمت بازار و میزان تقاضا به عنوان پارامترهای غیرقطعی تعیین شدند. برای در نظر گرفتن عدم قطعیت این پارامترها، از رویکرد برنامه‌ریزی سناریومحور استفاده شده است. برای سناریوسازی پارامترهای تقاضای برق، گرمایش و سرمایش از داده‌های منبع [۳۰] و برای قیمت برق زمان استفاده از داده‌های منبع [۲۳] استفاده گردید. همچنین داده‌های سرعت باد و شدت تابش خورشید منطقه مورد مطالعه (استان تهران) از یک وب سایت هواشناسی بین‌المللی<sup>۲۰</sup> استخراج و از آن داده‌ها برای سناریوسازی و کاهش سناریو استفاده و از توابع تبدیل سرعت بادی به توان و تابش خورشیدی به توان جهت تبدیل آنها به توان برق استفاده شد [۲۰]. اطلاعات سایر پارامترهای مدل در جدول ۵ خلاصه شده است.

جدول ۵. داده‌های پارامترهای قطعی

پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار
$P_{Sell,Grid}^{max}/P_{Buy,Grid}^{max}$	۱۰۰۰	$SoC_{CES}^{min}/SoC_{CES}^{max}$	۰-۷۵۰	$P_{EC}^{max}$	۵۰۰
$P_{GB}^{max}$	۵۰۰	$\eta_{GES,ch}/\eta_{GES,disch}$	۰/۹۵	$COPE_C$	۴
$\eta_{GB}$	۰/۹۲	$P_{GES,ch}/P_{GES,disch}$	۱۰۰	$SoC_{GES}^{min}/SoC_{GES}^{max}$	۶۰-۶۰۰
$\beta_{Grid,e}$	۰/۳۶۸	$\eta_{EV,ch}/\eta_{EV,disch}$	۰/۲	$C_{MC,WT}$	۰/۰۰۱۷
$\beta_{CCHP}$	۰/۳۷	$P_{EV,ch}/P_{EV,disch}$	۱۵	$C_{MC,PV}$	۰/۰۰۶
$\beta_{GB,e}$	۰/۹	$SoC_{EV}^{min}/SoC_{EV}^{max}$	۱-۲۰	$C_{MC,CCHP}$	۰/۰۰۲
LHV	۹/۷	$\eta_{EES,ch}/\eta_{EES,disch}$	۰/۹۵	$C_{MC,GB}$	۰/۰۰۲
$\eta_{CCHP}^E$	۰/۳۵	$P_{EES,ch}/P_{EES,disch}$	۱۲۰	$C_{MC,EES}$	۰/۰۰۲
$\eta_{CCHP}^C$	۰/۴۵	$SoC_{EES}^{min}/SoC_{EES}^{max}$	۶۰-۶۰۰	$C_{MC,CS}$	۰/۰۰۲
$\eta_{CCHP}^T$	۰/۴۵	$\eta_{TES,ch}/\eta_{TES,disch}$	۰/۹۵	$C_{MC,TS}$	۰/۰۰۲
$\eta_{CES,ch}/\eta_{CES,disch}$	۰/۹۵	$P_{TES,ch}/P_{TES,disch}$	۱۵۰	$C_{MC,GES}$	۰/۰۰۲
$P_{CES,ch}/P_{CES,disch}$	۱۵۰	$SoC_{TES}^{min}/SoC_{TES}^{max}$	۶۰-۶۰۰	$C_{MC,EC}$	۰/۰۰۲



#### ۴-۲- نتایج حل مدل چندهدفه

پس از طراحی مدل ریاضی چندهدفه و جمع‌آوری داده‌های مربوط به پارامترهای قطعی و غیرقطعی، مدل طراحی شده با استفاده از روش محدودیت افسیلون اجرا و جواب‌های پارتو استخراج گردید و سپس برای انتخاب جواب پارتوی مطلوب، از روش رضایت‌بخشی فازی استفاده شد. نتایج توابع هدف در نقطه مطلوب پارتو در جدول ۶ آمده است.

جدول ۶. نتایج حل مدل پیشنهادی

قابلیت اطمینان (کیلووات)	بیک مصرف (کیلووات)	انتشار آلودگی (کیلوگرم)	هزینه بهره برداری (دلار)
۲۱۳۸	۳۱۸۲	۱۸۴۰	۲۶۱۹

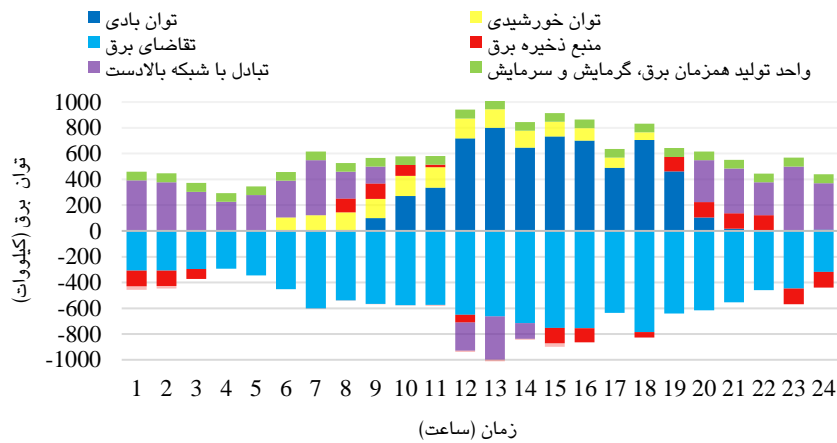
با توجه به جدول بالا مطلوب‌ترین نقطه؛ در مجموع هزینه‌های بهره‌برداری، کاهش آلودگی، کاهش بیک و افزایش قابلیت اطمینان نسبت به سایر نقاط پارتو بهترین است. شکل‌های ۳ تا ۵ به ترتیب تعادل توان برق، گرمایش و سرمایش شبکه هوشمند مورد مطالعه را در نقطه مطلوب پارتو نشان می‌دهد. در این شکل‌ها، نمودارهای میله‌ای بالایی، مقدار توان تولید و نمودارهای میله‌ای پایینی، مقدار توان مصرفی را نشان می‌دهد.

در ساعات ۶ صبح الی ۱۹ بعدازظهر شبکه اکثر انرژی مورد نیاز خود را از میان انرژی‌های تجدیدپذیر تأمین می‌کند. چون در این ساعات تعرفه برق بالا است و همچنین تأمین انرژی بوسیله انرژی‌های تجدیدپذیر خورشید و بادی امکان پذیر و ارزان است و مسائل زیست محیطی به همراه ندارد. لذا شبکه حجم عمده‌ای از انرژی مورد نیاز خود از طریق این منابع تأمین می‌کند. ذخیره‌ساز برق در ساعات ۱، ۲، ۳، ۱۲، ۱۵، ۱۶، ۱۸، ۲۳ و ۲۴ چون مازاد تولید انرژی نسبت به مصرف انرژی وجود دارد، شارژ می‌شود و در ساعات ۸، ۹، ۱۰، ۱۱، ۱۹، ۲۰، ۲۱ و ۲۲ به علت اینکه کمبود انرژی وجود دارد برای تأمین انرژی شبکه دشارژ می‌شود. در ساعات ۱۲، ۱۳ و ۱۴ شبکه با توجه با اینکه مازاد تأمین انرژی دارد و قیمت انرژی در این ساعات بالا هست، مازاد را به شبکه بالادست می‌فروشد و باعث کاهش در هزینه‌های شبکه می‌شود. واحد تولید همزمان برق، گرمایش و سرمایش از منبع گاز تغذیه می‌کند و خروجی آن انرژی برق، گرمایش و سرمایش است. در همه ساعات شبانه روز قسمتی از برق موردنیاز از طریق این واحد تأمین می‌شود. چون از جمله تجهیزاتی است که با هدف کاهش خرید انرژی از

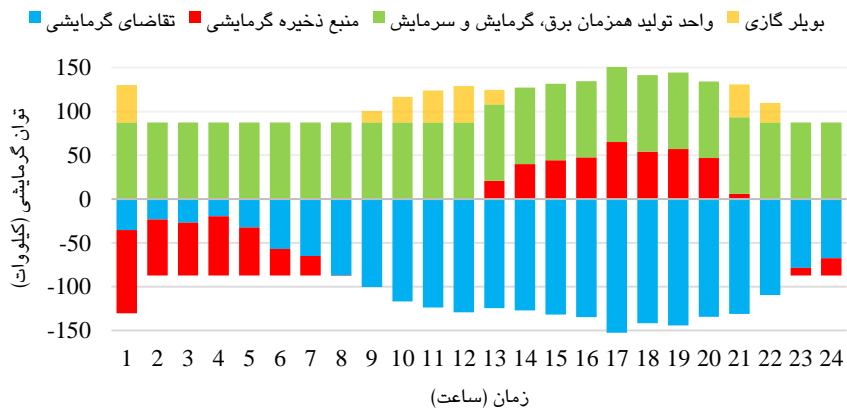


محمدحسین طحاری مهرجردی و همکاران ————— یک مدل ریاضی چندهدفه برای...

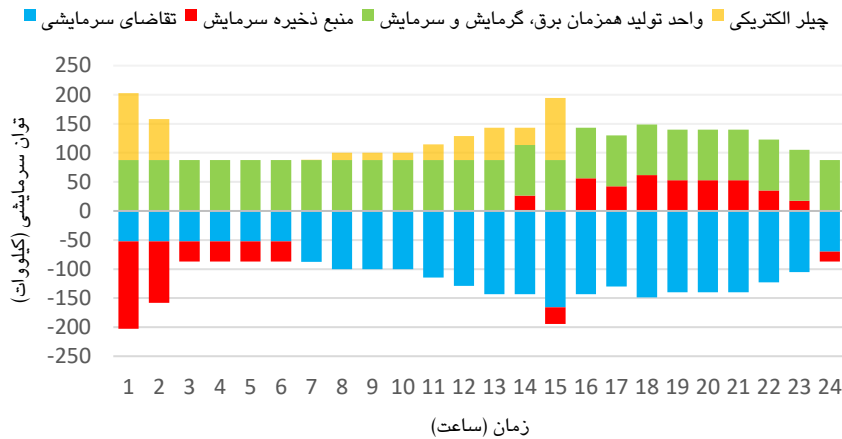
شبکه برق و به دنبال آن کاهش هزینه بهره‌برداری در شبکه‌های هوشمند انرژی استفاده می-شود.



شکل ۳. تعادل توان برق در ۲۴ ساعت شبانه روز



شکل ۴. تعادل توان گرمایشی در ۲۴ ساعت شبانه روز



شکل ۵. تعادل توان سرمایشی در ۲۴ ساعت شبانه روز

با توجه به شکل ۴، توان گرمایشی بوسیله واحد تولید همزمان برق، گرمایشی و سرمایشی و واحد بویلر گازی تأمین می‌گردد. همانگونه که از شکل مشخص است اکثر انرژی گرمایشی موردنیاز از طریق واحد تولید همزمان برق، گرمایشی و سرمایشی تأمین می‌شود. چون ضریب آلودگی این واحد نسبت به بویلر گازی خیلی پایین است. همچنین ذخیره‌ساز گرمایشی در ساعات ابتدایی و انتهایی شبانه‌روز اقدام به شارژ انرژی گرمایشی کرده و در ساعات ۱۳ الی ۲۱ اقدام به دشارژ انرژی برای تأمین انرژی گرمایشی مورد نیاز شبکه می‌کند. با توجه به شکل ۵، مانند انرژی گرمایشی، اکثر انرژی سرمایشی موردنیاز شبکه از طریق واحد تولید همزمان برق، گرمایشی و سرمایشی تأمین می‌شود و فقط در ساعات ۱، ۲ و ۸ الی ۱۵ مقداری از این انرژی بوسیله چیلر برق تأمین می‌گردد. علت این امر هزینه پایین تأمین انرژی بوسیله این واحد است. واحد ذخیره انرژی سرمایشی در ساعات ۱ الی ۶، ۱۵ و ۲۴ با توجه به اینکه مقدار تولید انرژی سرمایشی نسبت به تقاضا مازاد هست شروع به ذخیره‌سازی این انرژی می‌کند و در ساعات ۱۴ و ۱۶ الی ۲۳ برای تأمین انرژی مورد نیاز شبکه، اقدام به دشارژ انرژی می‌کند.



برای بررسی اعتبار مدل، نتایج اجرای مدل پیشنهادی را با نتایج اجرای مدل با دو تابع هدف شامل توابع هدف اول و دوم (آنچه در تحقیقات پیشین بیشتر مورد توجه بوده است)، مطابق با جدول ۷ مورد مقایسه قرار گرفت.

جدول ۷. نتایج اجرای مدل‌ها با در نظر گرفتن دو و چهار تابع هدف

مدل	هزینه (بهره‌برداری (دلار))	انتشار آلودگی (کیلوگرم)	بیک مصرف (کیلووات)	قابلیت اطمینان (کیلووات)
مدل دوهدفه	۲۶۳۵	۱۸۱۱	۳۱۸۲	۱۷۰۶
مدل چهارهدفه	۳۶۱۹	۱۸۴۰	۳۱۸۲	۲۱۳۸

همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، در مدل پیشنهادی هزینه‌های بهره‌برداری به میزان ۰/۶۱٪ کاهش یافته است. بیک مصرف ثابت باقی مانده است. گرچه میزان انتشار آلودگی ۱/۶٪ افزایش یافته است، قابلیت اطمینان شبکه به میزان ۲۵٪ بهبود یافته است. قابل ذکر است با در نظر گرفتن شبکه هوشمند بزرگ‌تر و تنظیم وزن اهداف مورد نظر می‌توان به بهبود بیشتر توابع هدف دست یافت.

#### ۳-۴- بینش‌های مدیریتی

امروزه استفاده گسترده از منابع انرژی تجدیدپذیر در چرخه تولید انرژی برق از اهمیت بالایی برخوردار است. ایران سومین تولیدکننده بزرگ گاز دنیا است، اما به دلیل مصرف بی‌رویه و رو به رشد برق یارانه‌ای، جمعیت رو به رشد با عادات مصرفی نامطلوب، و بالاخره تغییرات آب و هوایی که موجب شدت نوسانات فصلی همزمان با افزایش دمای هوا شده، با کمبود گاز و در نتیجه کمبود انرژی برق مواجه است. نیروگاه‌های برق ایران که عمدتاً از گاز برای تولید برق استفاده می‌کنند نمی‌توانند نیاز به برق کشور را در جریان اوج مصرف تأمین کنند. این موارد باعث شده مدیریت انرژی و نیروگاه‌های تولید برق کشور در مقطعی به استفاده از سوخت‌های فسیلی بسیار آلوده‌کننده در تولید برق روی آورده و/یا جریان صادرات گاز به کشورهای دیگر را قطع کنند.



یک شبکه هوشمند انرژی با استفاده از تکنولوژی دیجیتال دوطرفه، انرژی را از تولیدکنندگان به مشتریان منتقل می‌کند، تا با کنترل وسایل منازل مصرف‌کنندگان در مصرف انرژی صرفه‌جویی شود، هزینه‌ها کاهش یابد و قابلیت اطمینان شبکه بالا برود. چنین شبکه مدرن الکتریکی، که جایگزین عادات مصرفی کنترل نشده می‌شود، به عنوان راهی برای مدیریت انرژی، گرمایش جهانی و مسائل زیست محیطی از سوی بسیاری از دولت‌ها تعقیب می‌شود. شبکه‌های هوشمند انرژی علاوه بر اینکه موجب بهبود بهره‌وری عرضه انرژی خواهند شد، امکان استفاده آسان از انواع انرژی‌های تجدیدپذیر را نیز فراهم می‌سازند. امروزه شبکه‌های هوشمند انرژی فناوری‌های متنوعی دارند و تسهیلات جدیدی برای تولید، انتقال و مصرف انرژی ارائه می‌دهند. پیاده‌سازی شبکه‌های هوشمند انرژی امری اجتناب ناپذیر است و باید به وسیله طراحی نقشه راه مناسب انجام گیرد؛ این طراحی به سیاست‌های کلان و اسناد بالادستی صنعت برق کشور و نگاه ویژه مسئولان دولتی متکی است. شبکه هوشمند پیشنهادی در تحقیق حاضر با در نظر گرفتن اهداف مختلف شامل کاهش هزینه‌های عملیاتی، آلاینده‌گی و پیک مصرف و افزایش قابلیت اطمینان شبکه، به مدیریت بهینه انرژی مناطق مسکونی هوشمند کمک می‌کند. همچنین با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های موجود، به تصمیم‌گیری عاقلانه‌تر برای مصرف انرژی در مناطق مسکونی هوشمند منجر می‌شود.

## ۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله، مسأله مدیریت انرژی یک ریزشبکه خانه‌های هوشمند، با حضور منابع انرژی تجدیدپذیر بادی و خورشیدی، سیستم‌های ذخیره‌سازی و تعرفه قیمت‌گذاری زمان استفاده و با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های تولید و مصرف انرژی و قیمت مورد بررسی قرار گرفت. اهداف این مطالعه کاهش هزینه‌های عملیاتی، انتشار گازهای گلخانه‌ای و پیک مصرف و افزایش قابلیت اطمینان شبکه هوشمند انرژی بود. مسأله مدیریت انرژی با چهارهدف فوق و با در نظر گرفتن محدودیت‌های مربوطه مدلسازی و با استفاده از روش‌های محدودیت افسیلون و روش رضایت‌بخشی فازی به ترتیب جهت بدست آوردن نقاط پارتو و انتخاب نقطه مطلوب پارتو استفاده شد. مقدار توابع هدف هزینه، آلودگی، پیک مصرف و قابلیت اطمینان در مطلوب-ترین نقطه به ترتیب برابر با ۲۶۱۹ دلار، ۱۸۴۰ کیلوگرم، ۳۱۸۲ کیلووات و ۲۱۳۸ کیلووات بدست



آمد. با توجه به اینکه شبکه‌های هوشمند انرژی در ساعات پیک بار و ساعاتی که قیمت انرژی بالا است انرژی مورد نیاز را از منابع انرژی تجدیدپذیر و ذخیره‌سازها فراهم می‌کنند لذا مقدار هزینه و انتشار آلودگی این شبکه‌ها پایین است. همچنین حضور تعرفه قیمت‌گذاری زمان استفاده، باعث می‌شود شبکه، پیک مصرف را کاهش و بار موردنیاز را به ساعاتی که پیک نیست انتقال دهد و این امر باعث تسطیح منحنی پیک بار شبکه می‌شود. وجود ذخیره‌سازها باعث می‌شود در ساعاتی که امکان عرضه بار منابع داخلی شبکه بیشتر از تقاضا است، انرژی مازاد در ذخیره‌سازها ذخیره شود و در مواقع کمبود عرضه مورد استفاده قرار گیرد و بدین ترتیب باعث افزایش قابلیت اطمینان شبکه می‌شود. نتایج این پژوهش با نتایج مطالعات گذشته بررسی شده مبنی بر اینکه شبکه‌های هوشمند انرژی در بهبود اهداف هزینه‌های بهره‌برداری و انتشار آلودگی موثر است همخوانی دارد.

پیشنهاد می‌گردد در تحقیقات آتی به غیر از تسهیم انرژی با شبکه بالادست، امکان تسهیم انرژی بین مناطق مسکونی هوشمند فراهم و نقش این تسهیم در بهبود توابع هدف بررسی گردد. همچنین سایر اهداف در شبکه‌های هوشمند انرژی همچون شاخص عدم وابستگی به شبکه بالادست و شاخص آسایش مشتریان نیز بررسی گردد. در بخش سناریوسازی برای پارامترهای غیرقطعی، پیشنهاد می‌گردد از سایر رویکردهای سناریوسازی مانند روش مونت کارلو<sup>۲۱</sup> و روش نمونه‌برداری ابرمکعب لاتین<sup>۲۲</sup> نیز استفاده گردد. همچنین پیشنهاد می‌شود توابع هدف به صورت دو به دو اجرا و با مشخص کردن نقاط پارتو، مورد تحلیل و مقایسه قرار گیرند.

## ۶- پی‌نوشت‌ها

۱. Smart grid
۲. Internet of Things
۳. Demand response
۴. Khoi, M. Begvoic and Damir
۵. Demand-side management
۶. Wang et al.
۷. Bodong et al.
۸. Lu et al.
۹. Yang et al.
۱۰. Cao et al.
۱۱. Scenario-based optimization
۱۲. Weibull Distribution
۱۳. Beta Distribution
۱۴. Normal Distribution
۱۵. GAMS
۱۶. Average Reserve Index (ARI)
۱۷. Time of Use
۱۸. Epsilon constraint
۱۹. Fuzzy satisfying technique
۲۰. <https://pwwatts.nrel.gov>
۲۱. Monte Carlo (MC)
۲۲. Latin hypercube sampling (LHS)



## ۶- پیوست

### معادل فارسی علائم اختصاری

علائم اختصار	معادل انگلیسی	معادل فارسی
EV	Electric Vehicle	وسیله نقلیه برق
GB	Gas Boiler	بویلر گازی
NG	Natural Gas	گاز طبیعی
MC	Maintenance Cost	هزینه تعمیرات و نگهداری
PV	Photovoltaic	نیروگاه خورشیدی
WT	Wind Turbine	نیروگاه بادی
CCHP	Combined cooling, heat & power	واحد تولید همزمان برق، سرمایشی و حرارت
EC	Electric Chiller	چیلر برق
EES	Electric Energy Storage	منبع ذخیره برق
CES	Cold Energy Storage	منبع ذخیره سرمایشی
TES	Thermal Energy Storage	منبع ذخیره گرمایشی
GES	Gas Energy Storage	منبع ذخیره گاز

## ۷- منابع

- [۱]. Karaaslan, A., & Gezen, M. (۲۰۲۲). The evaluation of renewable energy resources in Turkey by integer multi-objective selection problem with interval coefficient. *Renewable Energy*, ۱۸۲, ۸۴۲-۸۵۴. <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2021.10.053>
- [۲]. Thirunavukkarasu, G. S., Seyedmahmoudian, M., Jamei, E., Horan, B., Mekhilef, S., & Stojcevski, A. (۲۰۲۲). Role of optimization techniques in microgrid energy management systems—A review. *Energy Strategy Reviews*, ۴۳, ۱۰۰۸۹۹. <https://doi.org/10.1016/J.ESR.2022.100899>
- [۳]. Morales-España, G., Martínez-Gordón, R., & Sijm, J. (۲۰۲۲). Classifying and modelling demand response in power systems. *Energy*, ۲۴۲, ۱۲۲۵۴۴. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2021.122544>
- [۴]. Ashkan Niusha, A., Adel Azar, A., Moazzez, H. & Heydari, K. (۲۰۲۱). A Multi-objective Optimization Model for Iran's Renewable Power Portfolio. *Management Research in Iran*, ۲۳, ۱۷۱-۱۹۱. [in Persian]



- [۵]. Marzban., E & Mohammadi, M. (۲۰۲۱). Future Scenarios for power Management in Iran. *Management Research in Iran*, ۲۰, ۱۷۶-۲۰۴. <https://dorl.net/dor/۲۰,۱۰۰۱,۱,۲۳۲۲۲۰۰,۱۳۹۵,۲۰,۳,۸,۷> [in Persian]
- [۶]. Li, L., Zheng, Y., Zheng, S., & Ke, H. (۲۰۲۰). The new smart city programme: Evaluating the effect of the internet of energy on air quality in China. *Science of The Total Environment*, ۷۱۴, ۱۳۶۳۸۰. <https://doi.org/۱۰,۱۰۱۶/J.SCITOTENV.۲۰۱۹,۱۳۶۳۸۰>
- [۷]. Haddad., H., Taghizadeh Yazdi., M., Zandieh., M., Jalili Heydari Dehui., J. & Razavi Haji Agha, H. (۲۰۲۲). Presenting a Bi-Level programming approach for Unit commitment in Iran with minimization of greenhouse gas emission, *Modern researches in decision making*, ۶, ۵۵-۷۴. <https://dorl.net/dor/۲۰,۱۰۰۱,۱,۲۴۷۶۶۲۹۱,۱۴۰۰,۶,۴,۳,۷>. [in Persian]
- [۸]. Khaji., M., maghsoud amiri., M. & Taghi Taghavifard, M. (۲۰۲۲). Robust Bidding Strategy for Thermal Power Generation Company in Competitive Electricity Market, *Modern researches in decision making*, ۷, ۹۰-۱۱۸. <https://dorl.net/dor/۲۰,۱۰۰۱,۱,۲۴۷۶۶۲۹۱,۱۴۰۱,۷,۳,۴,۹>. [in Persian]
- [۹]. Aminian., M & Jadid, S. (۲۰۱۶). Optimized Energy Management in Smart Buildings with Energy Trading, *Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers*, ۱۳, ۱۰۵-۱۱۶. <https://doi.org/۲۰,۱۰۰۱,۱,۲۶۷۶۵۸۱۰,۱۳۹۵,۱۳,۳,۱۱,۹>. [in Persian]
- [۱۰]. Aghajani, G. R., Shayanfar, H. A., & Shayeghi, H. (۲۰۱۵). Presenting a multi-objective generation scheduling model for pricing demand response rate in micro-grid energy management. *Energy Conversion and Management*, ۱۰۶, ۳۰۸-۳۲۱. <https://doi.org/۱۰,۱۰۱۶/J.ENCONMAN.۲۰۱۵,۰۸,۰۵۹>
- [۱۱]. Khan, A. R., Mahmood, A., Safdar, A., Khan, Z. A., & Khan, N. A. (۲۰۱۶). Load forecasting, dynamic pricing and DSM in smart grid: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, ۵۴, ۱۳۱۱-۱۳۲۲. <https://doi.org/۱۰,۱۰۱۶/J.RSER.۲۰۱۵,۱۰,۱۱۷>
- [۱۲]. Wang, G., Gao, Y., Feng, J., Song, J., Jia, D., Li, G., Li, Y., & Vartosh, A. (۲۰۲۳). Optimal stochastic scheduling in residential micro energy grids considering pumped-storage unit and demand response. *Energy Strategy Reviews*, ۴۹(August), ۱۰۱۱۷۲. <https://doi.org/۱۰,۱۰۱۶/j.esr.۲۰۲۳,۱۰,۱۱۷۲>
- [۱۳]. Bodong, S., Wiseong, J., Chengmeng, L., & Khakichi, A. (۲۰۲۳). Economic management and planning based on a probabilistic model in a multi-energy market in the presence of renewable energy sources with a demand-side management program. *Energy*, ۲۶۹, ۱۲۶۵۴۹. <https://doi.org/۱۰,۱۰۱۶/j.energy.۲۰۲۲,۱۲۶۵۴۹>
- [۱۴]. Lu, X., Li, H., Zhou, K., & Yang, S. (۲۰۲۳). Optimal load dispatch of energy hub considering uncertainties of renewable energy and demand response. *Energy*, ۲۶۲, ۱۲۵۵۶۴. <https://doi.org/۱۰,۱۰۱۶/j.energy.۲۰۲۲,۱۲۵۵۶۴>



- [۱۵]. Yang, S. X., Nie, T. qi, & Li, C. C. (۲۰۲۲). Research on the contribution of regional Energy Internet emission reduction considering time-of-use tariff. *Energy*, ۲۳۹, ۱۲۲۱۷۰. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2021.122170>
- [۱۶]. Abdunnasser, G., Ali, A., Shaaban, M. F., & Mohamed, E. E. M. (۲۰۲۲). Stochastic multi-objectives optimal scheduling of energy hubs with responsive demands in smart microgrids. *Journal of Energy Storage*, ۵۵, ۱۰۵۵۳۶. <https://doi.org/10.1016/J.EST.2022.105536>
- [۱۷]. Eghbali, N., Hakimi, S. M., Hasankhani, A., Derakhshan, G., & Abdi, B. (۲۰۲۲). Stochastic energy management for a renewable energy based microgrid considering battery, hydrogen storage, and demand response. *Sustainable Energy, Grids and Networks*, ۳۰, ۱۰۰۶۵۲. <https://doi.org/10.1016/J.SEGAN.2022.100652>
- [۱۸]. Jalilian, F., Mirzaei, M. A., Zare, K., Mohammadi-Ivatloo, B., Marzband, M., & Anvari-Moghaddam, A. (۲۰۲۲). Multi-energy microgrids: An optimal dispatch model for water-energy nexus. *Sustainable Cities and Society*, ۷۷, ۱۰۳۵۷۳. <https://doi.org/10.1016/J.SCS.2021.103573>
- [۱۹]. Niazvand, F., Kharrati, S., Khosravi, F., & Rastgou, A. (۲۰۲۱). Scenario-based assessment for optimal planning of multi-carrier hub-energy system under dual uncertainties and various scheduling by considering CCUS technology. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, ۴۶, ۱۰۱۳۰۰. <https://doi.org/10.1016/J.SETA.2021.101300>
- [۲۰]. Monemi, M., Karimi, H., Jadid, S., & Anvari-moghaddam, A. (۲۰۲۱). Stochastic electrical and thermal management of energy hubs integrated with demand response programs and renewable energy : A prioritized multi-objective framework. *Electric Power Systems Research*, ۱۹۶(September ۲۰۲۰), ۱۰۷۱۸۳. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2021.107183>
- [۲۱]. Lu, X., Liu, Z., Ma, L., Wang, L., Zhou, K., & Yang, S. (۲۰۲۰). A robust optimization approach for coordinated operation of multiple energy hubs. *Energy*, ۱۹۷. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117171>
- [۲۲]. Cao, Y., Wang, Q., Du, J., Nojavan, S., Jermittiparsert, K., & Ghadimi, N. (۲۰۱۹). Optimal operation of CCHP and renewable generation-based energy hub considering environmental perspective: An epsilon constraint and fuzzy methods. *Sustainable Energy, Grids and Networks*, ۲۰, ۱۰۰۲۷۴. <https://doi.org/10.1016/j.segan.2019.100274>
- [۲۳]. Eshraghi, A., Salehi, G., Heibati, S., & Lari, K. (۲۰۱۹). An enhanced operation model for energy storage system of a typical combined cool , heat and power based on demand response program : The application of mixed integer linear programming. *Building Services Engineering Research & Technology*, ۴(۱), ۴۷-۷۴. <https://doi.org/10.1177/0143724418879247>
- [۲۴]. Shafiee, F., Kazemi, A., Jafarnejad Chaghooshi, A., Sazvar, Z., & Amoozad



- Mahdiraji, H. (۲۰۲۱). A robust multi-objective optimization model for inventory and production management with environmental and social consideration: A real case of dairy industry. *Journal of Cleaner Production*, ۲۹۴, ۱۲۶۲۳۰. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2021.126230>
- [۲۵]. SoltaniNejad Farsangi, A., Hadayeghparast, S., Mehdinejad, M., & Shayanfar, H. (۲۰۱۸). A novel stochastic energy management of a microgrid with various types of distributed energy resources in presence of demand response programs. *Energy*, ۱۶۰, ۲۵۷-۲۷۴. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2018.06.136>
- [۲۶]. Karimi, H., Jadid, S., & Hasanzadeh, S. (۲۰۲۳). Optimal-sustainable multi-energy management of microgrid systems considering integration of renewable energy resources: A multi-layer four-objective optimization. *Sustainable Production and Consumption*, ۳۶, ۱۲۶-۱۳۸. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2022.12.025>
- [۲۷]. Mokaramian, E., Shayeghi, H., Sedaghati, F., & Safari, A. (۲۰۲۱). Four-Objective Optimal Scheduling of Energy Hub Using a Novel Energy Storage, Considering Reliability and Risk Indices. *Journal of Energy Storage*, ۴۰, ۱۰۲۷۳۱. <https://doi.org/10.1016/J.EST.2021.102731>
- [۲۸]. Karimi, H., Jadid, S., & Makui, A. (۲۰۲۱). Stochastic energy scheduling of multi-microgrid systems considering independence performance index and energy storage systems. *Journal of Energy Storage*, ۳۳, ۱۰۲۰۸۳. <https://doi.org/10.1016/J.EST.2020.102083>
- [۲۹]. Jani, A., Karimi, H., & Jadid, S. (۲۰۲۲). Multi-time scale energy management of multi-microgrid systems considering energy storage systems: A multi-objective two-stage optimization framework. *Journal of Energy Storage*, ۵۱, ۱۰۴۵۵۴. <https://doi.org/10.1016/J.EST.2022.104554>
- [۳۰]. Hosseini, S. E., & Ahmarinejad, A. (۲۰۲۱). Stochastic framework for day-ahead scheduling of coordinated electricity and natural gas networks considering multiple downward energy hubs. *Journal of Energy Storage*, ۳۳, ۱۰۲۰۶۶. <https://doi.org/10.1016/J.EST.2020.102066>