بهینه‌سازی عملکرد ریزشبکه به وسیله پاسخ‌گویی بار حرارتی با در نظر گرفتن بهبود آسایش گرمایی مصرف‌کنندگان

سید مهدی کاظمی رزی[1]، دانشجو، حسین عسکریان ابیانه[1]، استاد، حامد نفیسی[1]، استادیار، موسی مرزبند[2]، استادیار، مسعود صمدیان ذکریا[3]، مشاور صنعتی

۱- دانشکده مهندسی برق- دانشگاه صنعتی امیرکبیر- تهران- ایران
s.m.kazemi@aut.ac.ir ،askarian@aut.ac.ir ،nafisi@aut.ac.ir –
۲- دانشکده ریاضیات، فیزیک و مهندسی برق- دانشگاه Northumbria- نیوکاسل- انگلستان
mousa.marzband@northumbria.ac.uk–
۳- شرکت گاز استان تهران- تهران- ایران
mas_samadian@yahoo.com –

چکیده: **ریزشبکه‌های چندحاملی[1] (شامل برق، گاز و حرارت) در سال‌های اخیر رشد فزاینده‌ای پیدا کرده است و منجر به ارائه مدل‌های پاسخ‌گویی بار در کنار ذخیره‌سازهای چندحاملی و منابع تجدیدپذیر شده است. مدیریت مناسب پاسخ‌گویی بار به همراه ذخیره‌سازها می‌تواند منجر به بهبود انعطاف‌پذیری شود. در این مقاله، یک مدل خطی احتمالاتی برای بررسی تاثیر انعطاف‌پذیری و پاسخ‌گویی بار ارائه شده است. ویژگی منحصر به فرد مدل ارائه شده، لحاظ نمودن پاسخ‌گویی بار الکتریکی و حرارتی، ذخیره‌ساز-های چندحاملی و نیز مشارکت در بازار رزرو می‌باشد. ماحصل مدل ارائه شده، تضمین آسایش گرمایی مصرف‌کنندگان در حین افزایش انعطاف‌پذیری حاصل از پاسخ‌گویی بار و تامین رزرو است. اعمال مدل بر روی یک شبکه توزیع در انگلستان، نشان‌دهنده این است که پاسخ‌گویی بار، نقش مهمی در افزایش انعطاف‌پذیری ریزشبکه دارد و هزینه ها در مقایسه با حالت بدون پاسخ‌گویی بار کاهش می‌یابد.**

واژه‌های کلیدی: **انعطاف‌پذیری، ریزشبکه چندحاملی، ذخیره‌ساز چندحاملی، پاسخ‌گویی بار الکتریکی و حرارتی، آسایش گرمایی.**

تاریخ ارسال مقاله : ۱۳۹۸/۰۶/۰۶

تاریخ پذیرش مقاله : ۱۳۹۸/۱۰/۱۷

نام نویسنده‌ی مسئول : حامد نفیسی

نشانی نویسنده‌ی مسئول : دانشگاه صنعتی امیرکبیر

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-12]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1398.8.3.8.3]
[DOI: 10.29252/ieijqp.8.3.68]

۱- مقدمه

با نفوذ بیش‌تر منابع تجدیدپذیر در شبکه و طبیعت احتمالاتی آن‌ها و نیز نیاز به بازدهی بیش‌تر در ریزشبکه‌ها، نیاز به انعطاف‌پذیری بیش-تری در شبکه‌ها احساس می‌گردد. گسترش شبکه‌های هوشمند چند-حاملی که کنترل هم‌زمان برق، گاز و حرارت را امکان‌پذیر می‌سازد و در نتیجه عملکرد هر دو شبکه بهینه‌تر می‌گردد، بسیار حائز اهمیت شده است. زیرا این شبکه‌ها، امکان کنترل و اندازه‌گیری دقیق مصرف و تولید را در هر نقطه شبکه برق و گاز فراهم می‌آورد [۱]. انعطاف‌پذیری در سمت مصرف با استفاده از منابع گرمایش برقی، حضور ذخیره‌ساز-های چندحاملی و پاسخ‌گویی بار به دست می‌آید [۲]. علاوه بر تجهیز TES[۲]، نوعی ذخیره‌ساز گرمای دیگر وجود دارد که توسط ساختار ساختمان به وجود می‌آید [۳].

همان‌گونه که در مساله پاسخ‌گویی بار الکتریکی که در آن مصرف بار الکتریکی مصرف‌کنندگان با سیگنال قیمت برق تغییر می‌کند، در بخشی از بار گرمایی که در آن به تامین دمای ساختمان پرداخته می-شود، نوعی پاسخ‌گویی بار گرمایی وجود دارد. این پاسخ‌گویی با یک سیگنال قیمت که به صورت یک جریمه تعریف شده است یا پذیرفتن یک بازه به جای یک نقطه برای دما انجام می‌گردد. چنان‌چه دما در آن بازه قرار گیرد، از سوی مصرف‌کننده قابل قبول است [۳].

در [۲] به انعطاف‌پذیری سیستم با توجه به تاثیر تکنولوژی‌های متفاوت در انعطاف‌پذیری و شرکت در بازار رزرو پرداخته شده است. در [۴]، به بررسی انعطاف‌پذیری سیستم و تاثیر آن در تامین قابلیت اطمینان ریزشبکه و نیز اثر تعرفه‌های برق در انعطاف‌پذیری، پرداخته شده است. مرجع [۵] به بررسی پتانسیل انعطاف‌پذیری ایجاد شده توسط خود ساختمان‌ها و کنترل آن با استفاده از یک ذخیره‌ساز گرمای جدید به صورت تانک آب داغ، می‌پردازد. بررسی پاسخ‌گویی بار و نیز انعطاف‌پذیری در شبکه، و یک راه‌حل برای عملکرد ذخیره‌ساز گرما به صورت قیمتی و بر اساس پاسخ‌گویی بار، در [۶] ارائه شده است. در [۷]، به طبقه‌بندی استراتژی‌های بهبود انعطاف‌پذیری برای کنترل پاسخ‌گویی بار در ساختمان‌های مسکونی و تجاری شبکه و نیز بهبود یک ساختار برای ارزیابی انعطاف‌پذیری تقاضا در ساختمان‌ها پرداخته شده است. بررسی در [۸]، به ارائه یک چارچوب ارزیابی و مدل‌سازی برای شناسایی سیگنال‌های قیمتی و جریان‌های نقدی برای هر قسمت شبکه می‌پردازد که برای آنالیزهای اقتصادی پاسخ‌گویی بار در شبکه استفاده گشته است. مرجع [۹]، نیز به بررسی انعطاف‌پذیری ناشی از منابع پاسخ‌گویی بار می‌پردازد. در [۱۰]، یک مدل جدید پیشنهاد شده است که در آن به کاهش بار در کنار پاسخ‌گویی بار و ذخیره‌سازها پرداخته شده و از HVAC[۳] به عنوان بار استفاده شده است. در [۱۱]، به افزایش انعطاف‌پذیری یک شبکه که شامل منابع تجدیدپذیر بادی است، با استفاده از ادوات FACTs[۴] پرداخته شده است. افزایش انعطاف‌پذیری باعث کاهش تلفات و افزایش بازدهی منابع بادی در شبکه شده است. مطالعه انجام‌شده در [۱۲] به ارائه یک چارچوب برای شرکت در برنامه پاسخ‌گویی بار و تغییر رفتار مطابق با سیگنال‌های قیمتی، در جهت کاهش هزینه ریزشبکه می‌پردازد، و در آن از جابه‌جایی منابع برای تولید انرژی بر اساس سیگنال‌های قیمت انجام می‌گردد تا آسایش مصرف‌کنندگان کم نگردد. مرجع [۱۳]، بر خلاف کارهای قبلی که به بررسی پاسخ‌گویی بار برای بارهای نسبتا بزرگ پرداخته بودند، بارهای تجاری و مسکونی کوچک را در نظر می-گیرد. در [۱۴] روشی با چندین معیار تعریف می‌گردد تا پاسخ‌گویی بار (بار پمپ گرمایی که آسایش گرمایی را نیز فراهم می‌آورد) ناشی از خانه‌ها را بهبود دهد. در [۳]، به بررسی تاثیر پاسخ‌گویی بار بر انعطاف-پذیری پرداخته شده است. اما در آن به تاثیر فراخوانی رزرو بر آسایش گرمایی مصرف‌کننده‌ها، و تعدادی از تجهیزات الکترو-حرارتی مانند باتری توجه نشده است. در نتیجه نقص‌های موجود در این موضوع عبارت‌اند از:

۱. در هیچ کدام از کارهای قبلی، به بررسی تاثیر رزرو در مطالعه تاثیر پاسخ‌گویی بار روی انعطاف‌پذیری پرداخته نشده است.
۲. در مدل‌های قبلی، تحلیل جامعی که اثر همه تجهیزات الکترو-حرارتی موجود را در نظر بگیرد، وجود ندارد.
۳. مدلی با ساختار مقاوم در تامین آسایش گرمایی مصرف-کنندگان در هنگام فراخوانی رزرو، برای بررسی تاثیر پاسخ-گویی بار بر انعطاف‌پذیری شبکه وجود ندارد.

مدل ارائه شده در این مقاله، تاثیر پاسخ‌گویی بار مصرف‌کنندگان را بر روی انعطاف‌پذیری شبکه، ارزیابی می‌نماید. هم‌چنین، رزرو مدل شده است و از آن‌جایی که تولید رزرو می‌تواند بر روی تولید گرما توسط تجهیزات الکترو-حرارتی تاثیر بگذارد، در نتیجه مدل پیشنهادی به گونه ای است که آسایش گرمایی مصرف‌کنندگان در هنگام تامین رزرو دچار اختلال نگردد. به علاوه، ذخیره‌سازهای چندحاملی در نظر گرفته شده است. بر اساس موارد ذکر شده در بالا، مهم‌ترین نوآوری‌های این مقاله به صورت زیر هستند.

۱. ارائه مدلی برای بررسی تاثیر پاسخ‌گویی بار مصرف‌کنندگان بر روی انعطاف‌پذیری ریزشبکه با در نظر گرفتن مشارکت در بازار رزرو و تاثیر رزرو بر روی پاسخ‌گویی بار در ریزشبکه
۲. در نظر گرفتن همه تجهیزات موجود در ریزشبکه‌ها در مدل ارائه شده، شامل انواع منابع و ذخیره‌سازهای چندحاملی
۳. مدل ارائه شده در تامین آسایش گرمایی مصرف‌کنندگان در هنگام فراخوانی رزرو توسط ISO[۵]، مقاوم می‌باشد.

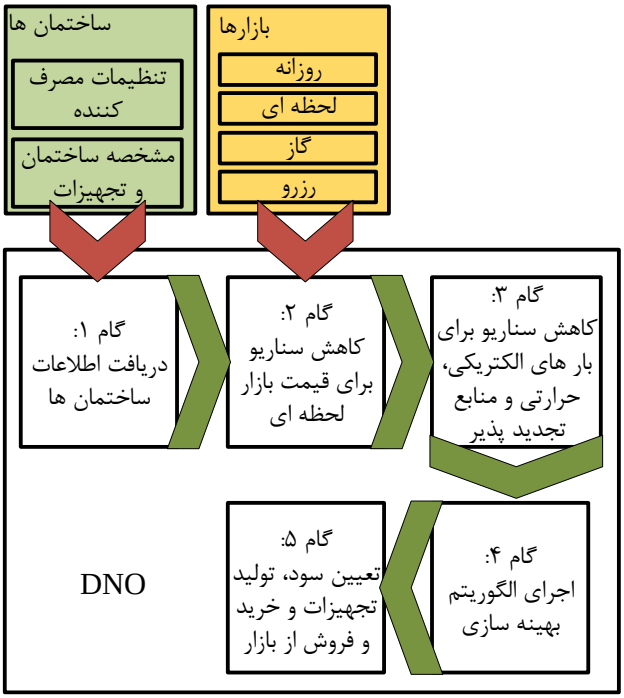
در ادامه مقاله، در بخش ۲، ساختار مدل پیشنهادی بیان گردیده است. فرمول‌بندی مساله در بخش ۳ معرفی شده است. در بخش ۴، کارایی مدل با کاربرد آن بر روی یک نمونه مطالعاتی، شامل یک ریزشبکه با ۹

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-12]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1398.8.3.8.3]
[DOI: 10.29252/ieijqp.8.3.68]

باس که شامل تجهیزات چندحاملی است و با یک فیدر محدود با بازار در ارتباط است، بررسی شده است. نتیجه‌گیری در بخش ۵ بیان شده است.

۲- ساختار پیشنهادی

شکل (۱) مراحل پیاده‌سازی ساختار پیشنهادی را نشان می‌دهد.



شکل (۱): مراحل پیاده‌سازی چارچوب بررسی تاثیر پاسخ‌گویی بار و انعطاف‌پذیری ریزشبکه

گام ۱: ابتدا اطلاعات مربوط به ساختمان‌ها، شامل مقدار مجاز انحراف از دمای تنظیم شده، دمای تنظیم‌شده مصرف‌کنندگان، بار الکتریکی و آب گرم توسط DNO[۶] دریافت می‌شود.

گام ۲: قیمت بازارهای انرژی روزانه، گاز، رزرو و اطلاعات پیشین بازار لحظه‌ای دریافت می‌شود. از آن‌جایی که قیمت بازار لحظه‌ای مشخص نیست، با توجه به اطلاعات فصل‌های قبل، تمام حالت‌های ممکن برای آن در قالب چند سناریو در نظر گرفته می‌شود. سپس الگوریتم کاهش تعداد سناریوها اجرا می‌شود تا تعداد سناریوها کم گردد.

گام ۳: از آن‌جایی که مقدار بار الکتریکی و نیز مصرف آب گرم و هم‌چنین خروجی منابع تجدیدپذیر، در هر فصل متفاوت است، در نتیجه سناریوهای متناظر با سناریوهای انتخاب شده در گام دوم، برای تولید تجدیدپذیر و بار در نظر گرفته می‌شود.

گام ۴: برای عملکرد بهینه شبکه به منظور کاهش هزینه، الگوریتم بهینه‌سازی اجرا می‌گردد (معادله ۳۴). تمام قیدهای تجهیزات (معادلات ۱-۲۲) و قیدهای شبکه (معادلات ۲۳-۳۳) در نظر گرفته می‌شوند.

گام ۵: هزینه مربوط به ریزشبکه محاسبه می شود، و مقادیر تولید منابع و ذخیره‌سازها توسط DNO به آن‌ها ارسال می شود. هم‌چنین مقادیر خرید یا فروش از بازار اصلی تعیین می شود و قیمت فروش انرژی به وسیله DNO به ISO اعلام می‌شود.

۳- فرمول‌بندی مساله

فرمولاسیون LP[۷] به کار گرفته شده در این مقاله قابلیت بهینه‌سازی هم‌زمان عملکرد ریزشبکه چندحاملی، در کنار مشارکت در بازار انرژی و رزرو را فراهم می‌کند. هم‌چنین، ذخیره‌سازهای چندحاملی برای برق و حرارت را نیز در نظر گرفته است. پاسخ‌گویی بار علاوه بر بار الکتریکی، با تعریف سیگنال جریمه، برای بار حرارتی نیز در نظر گرفته شده است. با توجه به عدم قطعیت‌های موجود در برخی از پارامترهای مساله، عدم قطعیت در تولید منابع تجدید پذیر و مصرف بار، مدل ارائه شده احتمالات را نیز در قالب چند سناریو در نظر گرفته است.

۳-۱- قیدهای ذخیره‌سازها و تجهیزات الکترو-حرارتی

۳-۱-۱- ذخیره‌ساز گرما

معادله (۱) و (۲) به ترتیب، حد انرژی ذخیره‌شده و مقدار تلفات گرما در TES را نشان می‌دهد. $X_TES_l^{min}$، $X_TES_l^{max}$ به ترتیب حد پایین و بالا انرژی، $Th_cap_l^{TES}$، $Th_res_l^{TES}$ ظرفیت و مقاومت گرمایی، $X_TES_{s,i,l}$ انرژی و $X_TES_{s,i,l}^{LOSS}$ تلفات گرما در TES است. $T_{s,i,l}$ دما در ساختمان است. s، i، l و t به ترتیب نشان‌دهنده سناریو، گام زمانی پردازش، باس و فاصله‌ی بین هر دو گام زمانی است. معادله (۳) نشان می‌دهد که انرژی ذخیره‌شده در TES به انرژی ورودی به آن در هر لحظه، تلفات انرژی در آن، بار گرمایی محیط، بار آب گرم و نیز مقدار انرژی در حالت قبل بستگی دارد. معادله (۴) بیان‌گر انرژی ورودی به TES است [۳]. $H_IN_{s,i,l}$ گرمای ورودی به TES، $H_SH_{s,i,l}$ بار گرمایی محیط و $TH_{s,i,l}^{DHW}$ مقدار آب گرم است. $Gas_GB_{s,i,l}$ و η_GB_l مصرف گاز و بازدهی GB[۸]، $P_CHP_{s,i,l}$، $\eta_CHP_l^t$، $\eta_CHP_l^e$ توان برق، و بازدهی گرمایی و الکتریکی CHP[۹]، $P_EHP_{s,i,l}$، $C_EHP_{s,i,l}$ توان و ضریب عملکرد EHP[۱۰] و $P_EB_{s,i,l}$، η_EB_l به ترتیب توان و بازده EB[۱۱] می‌باشند. N_s، N_i و N_l به ترتیب تعداد سناریوها، گام‌های زمانی و باس‌ها را نشان می‌دهند.

$$(X_TES_l^{min} - T_{s,i,l})Th_cap_l^{TES} \le X_TES_{s,i,l} \le (X_TES_l^{max} - T_{s,i,l})Th_cap_l^{TES} \quad (۱)$$

$$X_TES_{s,i,l}^{LOSS} = \frac{\left(\frac{X_TES_{s,i,l}}{Th_cap_l^{TES}} - T_{s,i,l}\right)t}{Th_res_l^{TES}} \quad (۲)$$

$$X_TES_{s,i+1,l} = X_TES_{s,i,l} + H_IN_{s,i,l} - X_TES_{s,i,l}^{LOSS} - H_SH_{s,i,l} - TH_{s,i,l}^{DHW} \quad (۳)$$

$$Gas_GB_{s,i,l}\eta_GB_l t + \frac{P_CHP_{s,i,l}\eta_CHP_l^t t}{\eta_CHP_l^e} + P_EHP_{s,i,l}C_EHP_{s,i,l}t + P_EB_{s,i,l}\eta_EB_l t = H_IN_{s,i,l} \quad (۴)$$

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-12]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1398.8.3.8.3]
[DOI: 10.29252/ieijqp.8.3.68]

$\forall$ s=1 to N_s, i=0 to N_i, l=1 to N_l

۳-۱-۲- باتری

معادله (۵) حد انرژی ذخیره شده را در نظر گرفته است. در معادله (۶)، مقدار مجاز توان شارژ و دشارژ باتری مشخص می‌گردد. $P_BES_{s,i,l}$ در حالت شارژ و دشارژ به ترتیب مقدار مثبت و منفی دارد. معادله (۷) بیان‌گر مقدار انرژی در باتری است که تابع توان ورودی به آن و نیز بازدهی آن است [۳]. $E_BES_l^{min}$ ، $E_BES_l^{max}$، حد پایین و بالای انرژی، $P_BES_l^{min}$، $P_BES_l^{max}$ حد پایین و بالا-ی توان، $E_BES_{s,i,l}$ و $P_BES_{s,i,l}$ انرژی و توان و φ_l بازدهی چرخشی باتری است.

$$E_BES_l^{min} \le E_BES_{s,i,l} \le E_BES_l^{max} \quad (۵)$$

$$P_BES_l^{min} \le P_BES_{s,i,l} \le P_BES_l^{max} \quad (۶)$$

$$E_BES_{s,i+1,l} = E_BES_{s,i,l} + \left(\frac{P_BES_{s,i,l}}{\varphi_l}\right) t \quad (۷)$$

$\forall$ s=1 to N_s, i=0 to N_i, l=1 to N_l

۳-۱-۳- منابع انرژی

محدودیت‌های تجهیزات موجود در ریزشبکه به وسیله معادلات (۸)-(۱۱) بیان گردیده است [۳]. $H_GB_l^{min}$ و $H_GB_l^{max}$ حد پایین و بالا توان حرارتی GB، $H_CHP_l^{min}$ و $H_CHP_l^{max}$ حدهای توان حرارتی CHP، $P_EHP_l^{min}$ و $P_EHP_l^{max}$ حدهای توان EHP و $H_EB_l^{min}$ و $H_EB_l^{max}$ حدهای پایین و بالا توان EB است. معادله (۱۲) و (۱۳) رزرو تامین شده به وسیله EHP ($R_EHP_{s,i,l}^{down}$) و EB ($R_EB_{s,i,l}^{down}$) را نشان می‌دهد، در حالی که معادله (۱۴) نشان می-دهد که رزرو تامین شده به وسیله CHP ($R_CHP_{s,i,l}^{down}$) نمی‌تواند از مقداری که توسط مشخصات CHP مشخص می‌گردد، بزرگ‌تر باشد. هم‌چنین معادله (۱۵) رزرو تامین شده به وسیله باتری ($R_BES_{s,i,l}^{down}$) را نشان می‌دهد [۱۵].

$$H_GB_l^{min} \le Gas_GB_{s,i,l}\eta_GB_l \le H_GB_l^{max} \quad (۸)$$

$$H_CHP_l^{min} \le \frac{P_{s,i,l}^{CHP}\eta_l^t}{\eta_l^e} \le H_CHP_l^{max} \quad (۹)$$

$$P_EHP_l^{min} \le P_{s,i,l}^{EHP} \le P_EHP_l^{max} \quad (۱۰)$$

$$H_EB_l^{min} \le P_{s,i,l}^{EB}\eta_l^{EB} \le H_EB_l^{max} \quad (۱۱)$$

$$0 \le R_EHP_{s,i,l}^{down} \le P_EHP_{s,i,l} - P_EHP_l^{min} \quad (۱۲)$$

$$0 \le R_EB_{s,i,l}^{down} \le P_EB_{s,i,l} - \frac{H_EB_l^{min}}{\eta_EB_l} \quad (۱۳)$$

$$0 \le R_CHP_{s,i,l}^{down} \le \frac{H_CHP_l^{max}\eta_CHP_l^e}{\eta_CHP_l^t} - P_CHP_{s,i,l} \quad (۱۴)$$

$$0 \le R_BES_{s,i,l}^{down} \le P_BES_l^{max} + P_BES_{s,i,l} \quad (۱۵)$$

$\forall$ s=1 to N_s, i=0 to N_i, l=1 to N_l

۳-۲- مقداردهی اولیه

مقادیر انرژی ذخیره‌شده در ذخیره‌سازها و نیز دمای ساختمان‌ها، بایستی در اولین گام زمانی برابر آخرین گام زمانی قرار داده شود تا نتایج بهینه‌سازی منحرف نگردد. این امر در معادلات (۱۶)-(۱۸) انجام گردیده است [۱۵].

$$X_TES_{s,0,l} = X_TES_{s,N_i,l} \quad (۱۶)$$

$$E_BES_{s,0,l} = E_BES_{s,N_i,l} \quad (۱۷)$$

$$T_{s,0,l} = T_{s,N_i,l} \quad (۱۸)$$

$\forall$ s=1 to N_s, l=1 to N_l

۳-۳- معادلات مربوط به ساختمان‌ها

معادله (۱۹) و (۲۰) به ترتیب بیان‌گر حد پایین و بالای دمای مجاز برای ساختمان است که به وسیله پارامترهای $\delta_{i,l}^{LOW}/\delta_{i,l}^{HIGH}$ مشخص می‌گردد. دو پارامتر $T_plus_{s,i,l}/T_minus_{s,i,l}$، در صورتی که مدل نتواند دمای تنظیمی را فراهم کند، غیر صفر می‌شوند. در صورت غیر صفر شدن هر کدام از این دو پارامتر، DNO ملزم به پرداخت جریمه به مصرف‌کننده می‌گردد. $T_set_{i,l}$ دمای خواسته شده است. معادله (۲۱) مربوط به دما است و به دما در لحظه قبل، انرژی دریافت شده از TES در هر ساختمان، انرژی تابشی از خورشید ($SG_{s,i,l}$) و حضور مصرف‌کنندگان در خانه ($IG_{s,i,l}$) و تلفات TES بستگی دارد [۳]. $\varrho_{s,i,l}$، $Th_res_l^{bui}$ و $Th_cap_l^{bui}$ به ترتیب نرخ تاثیر تابش خورشید و حضور مصرف‌کنندگان، گام زمانی، مقاومت و ظرفیت گرمایی ساختمان است.

$$O_{s,i,l}\left(T_{s,i,l} - T_plus_{s,i,l}\right) \le O_{s,i,l}\left(T_set_{i,l} + \delta_{i,l}^{HIGH}\right) \quad (۱۹)$$

$$O_{s,i,l}\left(T_set_{i,l} - \delta_{i,l}^{LOW}\right) \le O_{s,i,l}\left(T_{s,i,l} + T_minus_{s,i,l}\right) \quad (۲۰)$$

$$T_{s,i+1,l} = T_{s,i,l} + \Big(H_SH_{s,i,l} + \left(1 - \varrho_{s,i,l}\right)\left(IG_{s,i,l} + SG_{s,i,l}\right) - \left(T_{s,i,l} - T_OUT_{s,i}\right)tTh_res_l^{bui^{-1}} + X_TES_{s,i,l}^{LOSS}\Big) Th_cap_l^{bui^{-1}} \quad (۲۱)$$

$$H_SH_{s,i,l} \ge 0 \quad (۲۲)$$

$\forall$ s=1 to N_s, i=0 to N_i, l=1 to N_l

۳-۴- رزرو

۳-۴-۱- تامین رزرو

برای این که مدل پیشنهادی در هنگام فراخوانی رزرو، برای فراهم کردن آسایش گرمایی و دمای مورد نیاز مصرف‌کنندگان مقاوم باشد، بایستی انرژی حرارتی کافی در TES و نیز خود ساختمان وجود داشته باشد یا منابع حرارت به اندازه کافی موجود باشند. $R_loc_{s,i,l}^{down}$ مقدار رزرو تولید شده در هر باس را نشان می‌دهد. معادله (۲۴)، رزرو فراهم شده از تجهیزات الکترو-حرارتی را به وسیله حد پایین TES، حد پایین خود ساختمان و نیز حد بالای GB محدود می‌نماید تا مدل برای فراهم کردن آسایش گرمایی، حتی در صورت فراخوانی رزرو پایداری داشته باشد. معادله (۲۵) نیز رزرو فراخوانی شده از CHP را به گونه‌ای قرار می‌دهد تا گرمای تولید شده همراه با رزرو، پایداری مدل را دچار اختلال نکند. معادله (۲۴) و (۲۵) در صورت حضور مصرف‌کنندگان در ساختمان با پارامتر ($O_{s,i,l}$) فعال می‌باشند. معادله (۲۶) و (۲۷) به

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-12]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1398.8.3.8.3]
[DOI: 10.29252/ieijqp.8.3.68]

ترتیب حد پایین ($Bres^{d}_{s,i,l}$) و بالای ($Bres^{u}_{s,i,l}$) ذخیره‌سازی خود ساختمان را مشخص می‌نماید. $Trc_minus_{s,i,l}$ $Trc_plus_{s,i,l}$/ اجازه‌ی تغییر در دما را هنگام فراخوانی رزرو می‌دهد که این دو پارامتر نیز در صورت غیر صفر شدن، با جریمه برای DNO همراه هستند. معادله (۲۸) نیز حد پایین BES[۱۲] را برای تامین رزرو توسط انرژی ذخیره شده در آن نشان می‌دهد [۱۵]. $call_res^{max}$ برابر ماکزیمم زمان فراخوانی رزرو است.

$$R_loc^{down}_{s,i,l} = R_EHP^{down}_{s,i,l} + R_EB^{down}_{s,i,l} + R_CHP^{down}_{s,i,l} + R_BES^{down}_{s,i,l} \quad (۲۳)$$

$$O_{s,i,l}(R_EHP^{down}_{s,i,l} C_EHP_{s,i,l} + R_EB^{down}_{s,i,l}\eta_EB_l - R_CHP^{down}_{s,i,l}\eta_CHP^t_l/\eta_CHP^e_l) \le O_{s,i,l}\left(\left(\frac{\left(\frac{X_TES_{s,i,l}}{Th_cap^{TES}_l}+T_{s,i,l}-X_TES^{min}_l\right)Th_cap^{TES}_l+Bres^{d}_{s,i,l}}{call_res^{max}}\right)+\left(H_GB^{max}_l - Gas_GB_{s,i,l}\eta_GB_l\right)\right) \quad (۲۴)$$

$$O_{s,i,l}R_CHP^{down}_{s,i,l}\eta_CHP^t_l/\eta_CHP^e_l \le O_{s,i,l}\left(\frac{\left(X_TES^{max}_l-\frac{X_TES_{s,i,l}}{Th_cap^{TES}_l}-T_{s,i,l}\right)Th_cap^{TES}_l+Bres^{u}_{s,i,l}}{call_res^{max}}+Gas_GB_{s,i,l}\eta_GB_l\right) \quad (۲۵)$$

$$0 \le Bres^{d}_{s,i,l} = O_{s,i,l}(T_{s,i,l} - (T_set_{i,l} - \delta^{LOW}_{i,l}) + Trc_minus_{s,i,l})Th_cap^{bui}_l \quad (۲۶)$$

$$0 \le Bres^{u}_{s,i,l} = O_{s,i,l}((T_set_{i,l} + \delta^{HIGH}_{i,l}) - T_{s,i,l} + Trc_plus_{s,i,l})Th_cap^{bui}_l \quad (۲۷)$$

$$R_BES^{down}_{s,i,l} \le E_BES_{s,i,l}/call_res^{max} \quad (۲۸)$$

$\forall$ s=1 to N_s, i=0 to N_i, l=1 to N_l

۳-۴-۲- تعادل رزرو در شبکه

بر اساس کار انجام شده در [۱۶]، رزرو فراهم شده توسط کل ریزشبکه ($R_dis^{down}_s$) بایستی بر روی تمامی زمان‌های نیاز به رزرو برابر باشد. معادله (۲۹) این قید را ایجاد می‌نماید. در حالی که رزرو تولید شده به وسیله تجهیزات ساختمان‌ها در هر باس ($R_loc^{down}_{s,i,l}$)، می‌تواند در هر سناریو و هر زمان دارای مقدار متفاوتی باشد [۲]. معادله (۳۰)، یک پارامتر کمکی ($R_dis^{down_ob}_{s,i}$) را برای تابع هدف مشخص می‌نماید. κ^d_i نشان‌گر زمان‌های نیاز به رزرو است.

$$\kappa^d_i R_dis^{down}_s = \kappa^d_i \sum^{N_l}_{l=1} R_loc^{down}_{s,i,l} \quad (۲۹)$$

$$\kappa^d_i R_dis^{down_ob}_{s,i} = \kappa^d_i \sum^{N_l}_{l=1} R_loc^{down}_{s,i,l} \quad (۳۰)$$

$\forall$ s=1 to N_s, i=0 to N_i

۳-۵- تعادل توان الکتریکی و گاز

معادله (۳۱) توان‌های تولیدی و مصرفی برق را در کل ریزشبکه به منظور تعادل توان برابر قرار می‌دهد. DE_minus_i، DE_plus_i، $IE_minus_{s,i}$ و $IE_plus_{s,i}$ به ترتیب توان ورودی، خروجی از بازار روزانه، توان ورودی و خروجی از بازار لحظه‌ای، $E^{LOAD}_{s,i,l}$، $P_S_{s,i,l}$ و $P_w_{s,i,l}$، بار الکتریکی، توان منابع خورشیدی و منابع بادی است. معادله (۳۲) نیز مقدار گاز مصرفی در ریزشبکه ($Gas_minus_{s,i}$) که توسط CHP و GB در خواست می‌شود را نشان می‌دهد [۳].

$$DE_minus_i - DE_plus_i + IE_minus_{s,i} - IE_plus_{s,i} = \sum^{N_l}_{l=1}\frac{E^{LOAD}_{s,i,l}}{t} + \sum^{N_l}_{l=1} P_EHP_{s,i,l} + \sum^{N_l}_{l=1} P_EB_{s,i,l} - \sum^{N_l}_{l=1} P_CHP_{s,i,l} - \sum^{N_l}_{l=1} P_S_{s,i,l} - \sum^{N_l}_{l=1} P_w_{s,i,l} + \sum^{N_l}_{l=1} P_BES_{s,i,l} \quad (۳۱)$$

$$Gas_minus_{s,i} = \sum^{N_l}_{l=1}\frac{P_CHP_{s,i,l}}{\eta_CHP^e_l} + \sum^{N_l}_{l=1} Gas_GB_{s,i,l} \quad (۳۲)$$

$$DE_{minus_i}, DE_{plus_i}, IE_{minus_{s,i}}, IE_{plus_{s,i}}, Gas_minus_{s,i} \ge 0 \quad (۳۳)$$

$\forall$ s=1 to N_s, i=0 to N_i

۳-۶- تابع هدف

تابع هدف مدل پیشنهادی در معادله (۳۴) به بهینه‌سازی سود ریز-شبکه می‌پردازد [۱۵]. قیمت گاز برابر ρ_i است. DNO به خرید و فروش انرژی با قیمت λ^+_i/λ^-_i در بازار روزانه می‌پردازد. قیمت بازار لحظه‌ای با مقدار $\mu_minus_{s,i}$ و $\mu_plus_{s,i}$ بیان شده است. رزرو قابل دسترس با قیمت σ^d_i توسط ISO خریداری شده است. هم‌چنین انحراف در دمای تنظیم شده برای ساختمان‌ها با قیمت ϕ_minus_i/ ϕ_plus_i جریمه می‌گردد که این جریمه از سوی DNO به مصرف-کنندگان، در مقابل نقص در تامین آسایش گرمایی پرداخت می‌گردد. هم‌چنین انحراف در تامین دمای خواسته شده به دلیل فراخوانی رزرو نیز با احتمال P_res^{call} در نظر گرفته شده است. p_s احتمال هر سناریو را نشان می‌دهد.

$$Min\{\sum^{N_s}_{s=1}[p_s \sum^{N_i}_{i=1}(\lambda^-_i DE_minus_i t - \lambda^+_i DE_plus_i t + \mu_minus_{s,i} IE_minus_{s,i} t - \mu_plus_{s,i} IE_plus_{s,i} t + \rho_i Gas_minus_{s,i} t - \sigma^d_i R_dis^{down_ob}_{s,i} t + \sum^{N_l}_{l=1}(\phi_plus_i T_plus_{s,i,l} + \phi_minus_i T_minus_{s,i,l} + P_res^{call}\phi_plus_i Trc_plus_{s,i,l} + P_res^{call}\phi_minus_i Trc_minus_{s,i,l}))]\} \quad (۳۴)$$

۴- نتایج شبیه‌سازی

یک مطالعه مفهومی انجام شده است تا قابلیت مدل در بررسی تاثیر پاسخ‌گویی بار گرمایی بر انعطاف‌پذیری شبکه مشخص گردد و نیز در کنار این انعطاف‌پذیری، هزینه‌های شبکه کاهش یابد. هدف در واقع این است تا تاثیر این پاسخ‌گویی بار بر انعطاف‌پذیری و در نتیجه بر عملکرد بهینه و کاهش هزینه‌ها مشخص گردد. این آنالیزها به صورت ۱۵ حالت انجام گرفته است که در جدول (۱) آورده شده است. در حالت (۰)، که حالت پایه برای مقایسه حالات دیگر در نظر گرفته شده است، ریزشبکه تنها در بازار انرژی شرکت دارد و میزان انحراف مجاز در دما که ناشی از ساختمان‌ها است، صفر است. هم‌چنین میزان جریمه برای انحراف دما صفر می‌باشد. در حالت (۱) و (۲) به ترتیب، ساختار خانه‌ها اجازه انحراف به اندازه ۲ و ۱ درجه را در دو جهت پایین و بالا می‌دهد. حالت (۳) و (۴) به ترتیب، اجازه ۲ و ۱ درجه

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-12]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1398.8.3.8.3]
[DOI: 10.29252/ieijqp.8.3.68]

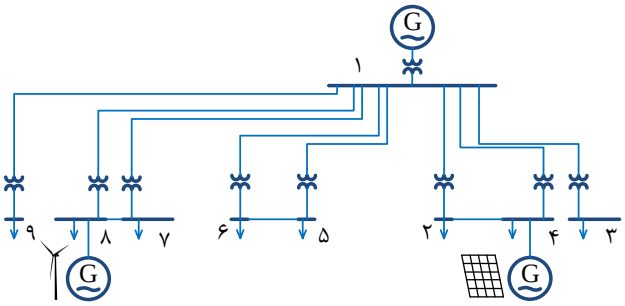
انحراف، تنها در جهت بالا را می‌دهند. در حالت‌های (۱)-(۴) اجازه انحراف در دما توسط ساختار خود ساختمان‌ها داده شده است و به عبارتی، نوعی انعطاف از سوی ساختمان‌ها در تامین دما وجود دارد. در حالت‌های (۵)-(۷)، هر گونه انحراف در دما، با یک میزان جریمه که از سوی DNO به مشتریان پرداخت می‌شود، همراه شده است. در نتیجه DNO در قبال این سیگنال قیمتی واکنش نشان می‌دهد.

جدول (۱): تعریف حالت‌های مربوط به آنالیزها

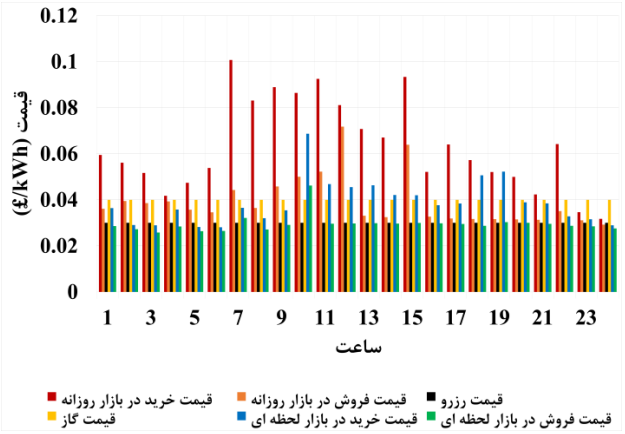
ردیف	نوع بازار	میزان انحراف از دمای تنظیم شده	جریمه برای انحراف از دمای تنظیم شده
۰	انرژی	۰	-
۱	انرژی	°C+/-۲	-
۲	انرژی	°C+/-۱	-
۳	انرژی	°C+۲	-
۴	انرژی	°C+۱	-
۵	انرژی	-	£۰,۰۱/(°C. h)
۶	انرژی	-	£۰,۵/(°C. h)
۷	انرژی	-	£۱۰۰۰/(°C. h)
۸	انرژی/رزرو	°C+/-۲	-
۹	انرژی/رزرو	°C+/-۱	-
۱۰	انرژی/رزرو	°C+۲	-
۱۱	انرژی/رزرو	°C+۱	-
۱۲	انرژی/رزرو	-	£۰,۰۱/(°C. h)
۱۳	انرژی/رزرو	-	£۰,۵/(°C. h)
۱۴	انرژی/رزرو	-	£۱۰۰۰/(°C. h)

در حالت‌های (۸)-(۱۴)، همین حالت‌ها به ترتیب تکرار شده‌اند، لیکن ریزشبکه علاوه بر بازار انرژی برق، در بازار رزرو نیز شرکت دارد.

تولید منابع خورشیدی و بادی در یک سال گذشته برای انگلستان، با توجه به [۱۷] به دست آمده است. پارامتر سکونت برای همه مصرف‌کنندگان در همه حالات، یکسان و برابر یک گرفته شده است. ولتاژ ریزشبکه در دو سطح ۱۱ kV و ۰,۴ kV قرار دارد و شامل تعدادی خانه به صورت خانه‌های جدا از هم کاملا ایزوله شده است که در یک نقطه با ظرفیت ۸۵۰ MVA به شبکه سراسری، مطابق شکل (۲) متصل شده است. تجهیزات الکترو-حرارتی در شبکه، شامل دو عدد GB در باس ۲ و ۸، با ظرفیت ۲۴ kW و بازدهی ۰,۷۵ هستند. در همه باس‌ها یک CHP با توان حرارتی ۵۲ kW، و بازدهی الکتریکی و گرمایی به ترتیب ۰,۲۴ و ۰,۷۲، وجود دارد. ذخیره‌ساز گرما دارای $X_TES_l^{min} = 55°C$ و $X_TES_l^{max} = 80°C$ می‌باشد. $Th_cap_l^{TES} = 0.3483\ kWh/°C$ و $Th_res_l^{TES} = 568\ °C/kW$ در همه باس‌ها است [۳]. بازدهی چرخشی باتری در باس ۲، برابر ۰,۹ است و ظرفیت ۱۰۹,۷۵ kWh و توان ۶۵,۸۵ kW دارد [۴]. ظرفیت منبع بادی و خورشیدی، به ترتیب در باس ۸ و ۴، برابر ۸۶۹,۱ kW و ۲۷۵ kW است. $T_OUT_{s,i} = T_{s,i,l} = 21°C$ و $Th_cap_l^{bui} = 13.89\ kWh/°C$ و $Th_res_l^{bui} = 5.63°C/kW$ است. $-4\ °C$ نیز تعیین گردیده‌اند. قیمت‌های بازارهای انرژی و نیز رزرو بر طبق قوانین بازار انگلستان انتخاب شده است [۱۸]. قیمت رزرو، برابر £/kWh ۰,۰۳ انتخاب شده است. با توجه به این که قیمت بازار لحظه‌ای در ۲۴ ساعت آینده مشخص نیست، در نتیجه برای آن چهار سناریو با توجه به اطلاعات سال‌های پیش بازار انگلستان از [۱۹] انتخاب گشته است. قیمت گاز معادل £/kWh ۰,۰۴ در نظر گرفته شده است [۲۰]. قیمت‌های در نظر گرفته شده برای زمستان، به صورت شکل (۳) می‌باشد.



شکل (۲): شبکه مورد مطالعه در انگلستان



شکل (۳): نمودار قیمت انرژی در روز زمستانی

هم‌چنین، دمای محیط، میزان تابش خورشیدی و سرعت باد و نیز مقدار بار الکتریکی و بار گرمایی دارای احتمالات هستند. در نتیجه سناریوهای در نظر گرفته شده، این پارامترها را در بر دارند. در این سناریوها اطلاعات یک سال گذشته این پارامترها به کار گرفته شده است و سپس با استفاده از الگوریتم کاهش سناریو برگشتی [۲۱]، تعداد سناریوها به چهار عدد که به ترتیب برای زمستان، بهار، تابستان و پاییز هستند، کاهش یافته است. ابتدا الگوریتم کاهش سناریو، برای قیمت بازار لحظه‌ای اجرا می‌گردد. سپس با توجه به این سناریوهای انتخاب شده، سناریوهای متناظر برای دما، تولید منابع خورشیدی و بادی، بار الکتریکی و مصرف آب گرم انتخاب می‌شوند. مصرف آب گرم سال گذشته مصرف‌کنندگان بر اساس [۲۲] انتخاب گشته است. بار حرارتی محیط جهت تامین دمای مطلوب، تنها در صورتی تامین شده است که پارامتر حضور مصرف‌کنندگان، برابر با یک باشد که به این معنی است که مصرف‌کنندگان در خانه حضور دارند.

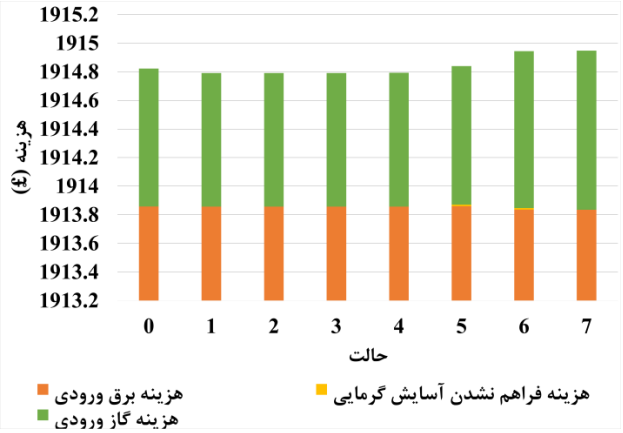
زمان پردازش این مساله بهینه‌سازی خطی با استفاده از نرم‌افزار MATLAB و با یک پردازش‌گر ۳,۶ GHz و ۴ GB حافظه، در حدود ۱ دقیقه است که با توجه به این که برنامه‌ریزی برای ۲۴ ساعت بعدی

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-12]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1398.8.3.8.3]
[DOI: 10.29252/ieijqp.8.3.68]

است، این زمان پردازش مساله مقدار ایده‌آلی برای مدل پیشنهادی می‌باشد.

۴-۱- حالت‌های بدون در نظرگیری رزرو

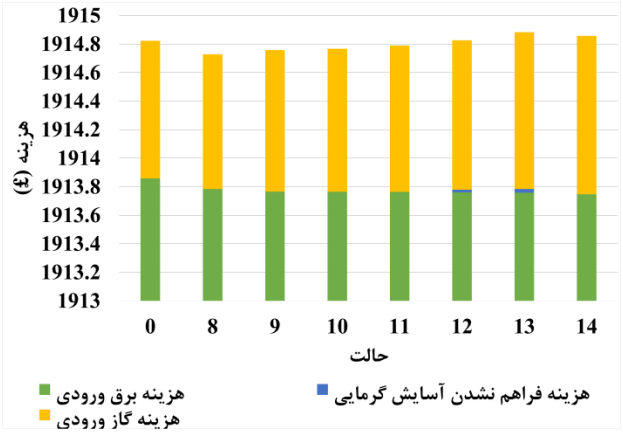
شکل (۴) هزینه مورد انتظار برای هر خانه را در حالت‌های مختلف، زمانی که ریزشبکه فقط در بازار انرژی مشارکت دارد، نشان می‌دهد. مطابق شکل (۴)، هزینه کلی ریزشبکه در مواردی که یک باند به جای نقطه، برای دما تنظیمی در نظر گرفته می‌شود، کاهش می‌یابد. این کاهش در حالت‌های (۱)-(۴) نسبت به حالت (۰) دیده می‌شود. در حالت‌های (۵)-(۷) که مقداری جریمه برای خطا در تامین دمای مورد نیاز در نظر گرفته شده است، هزینه کلی نسبت به حالت پایه افزایش می‌یابد. مقداری از این هزینه را جریمه‌ای تشکیل می‌دهد که توسط DNO بایستی پرداخت شود. هرچه میزان جریمه بیش‌تر می‌گردد، میزان هزینه نیز افزایش می‌یابد، زیرا گاز بیش‌تری مورد نیاز است تا بتواند دمای مورد نظر را تامین نماید تا جریمه کاهش یابد.



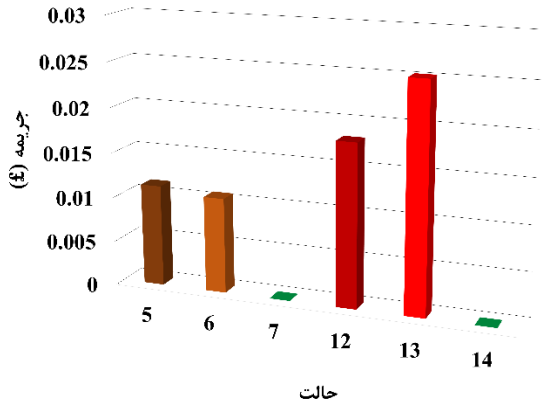
شکل (۴): هزینه برای هر خانه در حالت‌های بدون رزرو

۴-۲- حالت‌های با در نظرگیری رزرو

در حالت‌های (۸)-(۱۴)، ریزشبکه علاوه بر بازار انرژی، در بازار رزرو نیز مشارکت می‌کند. نکته مهم این است که در زمان فراخوانی رزرو از سوی شبکه سراسری، از آن‌جایی که رزرو توسط تجهیزات الکترو-حرارتی تولید می‌گردد و مقدار رزرو آن‌ها در میزان حرارت تولیدی آن‌ها موثر است، این تامین رزرو نباید بر مقدار دمای خانه‌ها تاثیر بگذارد و آن‌ها را از محدوده مجاز آن‌ها خارج نماید. مطابق شکل (۵)، هنگامی که یک بازه (حالت‌های (۸)-(۱۱)) به جای یک نقطه (حالت (۰)) در نظر گرفته می‌شود، مقدار هزینه کاهش می‌یابد. هم‌چنین، در حالت (۸) این بازه برابر ۴ واحد است، اما در (۹) این بازه ۲ واحد است، مشاهده می‌گردد هر چه بازه کوچک تر می‌گردد، هزینه ریزشبکه افزایش می‌یابد. این روند در حالت‌های (۱۰) و (۱۱) که در آن‌ها به ترتیب بازه کوچک‌تر می‌گردد ادامه می‌یابد. با مقایسه حالت‌های (۹) و (۱۰) که در آن‌ها طول بازه برابر است، با این تفاوت که در حالت (۱۰) این بازه تنها در جهت بالای دمای تنظیمی قرار دارد، این نکته به دست خواهد آمد که اگر بازه در نظر گرفته شده برای دما در دو سمت دمای تنظیمی باشد، در این صورت هزینه کم‌تری به دست خواهد آمد.



شکل (۵): هزینه برای هر خانه در حالت‌های با رزرو



شکل (۶): مقایسه مقدار جریمه مربوط به آسایش گرمایی مصرف-کنندگان

با مقایسه شکل‌های (۴) و (۵)، در هر دو مجموعه حالت‌های بدون و با مشارکت در بازار رزرو، در حالت‌های با ۲-/+ درجه برای دما بهینه‌ترین قیمت به دست می‌آید. پس از آن قیمت در حالت‌های با ۱ -/+ درجه و پس از آن قیمت در حالت‌های با بازه تعریف شده در یک سمت دمای تنظیمی قرار دارد. هزینه در حالت‌های با در نظرگیری جریمه برای تخطی دما، مقدار بیش‌تری دارد. دلیل آن خرید گاز بیش‌تر برای جبران دما و نیز اضافه شدن مقداری هزینه برای DNO به عنوان جریمه است. شکل‌های (۴) و (۵) نشان می‌دهند هر چه میزان جریمه در نظر گرفته شده بیش‌تر می‌گردد، مقدار جریمه که باید پرداخت شود، کم‌تر است. زیرا DNO با افزایش جریمه، مقدار تخطی دما را کاهش می‌دهد. همین‌طور با افزایش جریمه واحد، هزینه گاز بیش‌تر می‌گردد تا دمای مورد نظر تامین شود. هزینه در حالت‌های با در نظر-گیری جریمه نسبت به حالت پایه بیش‌تر است. اما در حالت‌های با در نظرگیری یک بازه برای دما، هزینه نسبت به حالت پایه کم‌تر است. در نتیجه با این مکانیزم که می‌توان آن را نوعی ذخیره‌ساز ناشی از ساختار خود ساختمان دانست، صرفه‌جویی بیش‌تری در هزینه به وجود می‌آید و انعطاف‌پذیری اقتصادی ریزشبکه را افزایش می‌دهد. هم‌چنین این انعطاف در هر دو حالت بدون و با مشارکت در بازار رزرو وجود دارد و

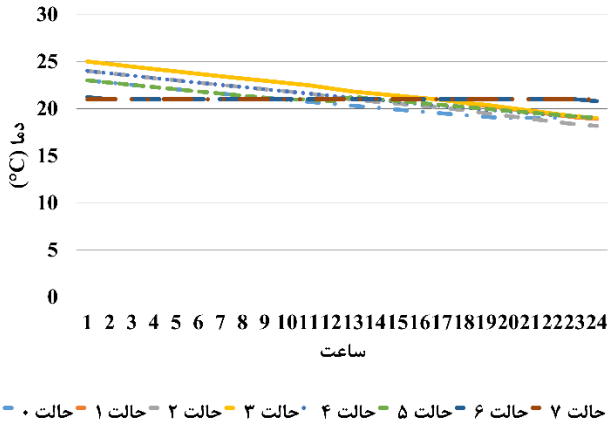
[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-12]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1398.8.3.8.3]
[DOI: 10.29252/ieijqp.8.3.68]

تامین رزرو در این انعطاف‌پذیری تاثیری ندارد و دمای مورد نیاز مشتریان هم‌چنان تامین می‌گردد. اضافه شدن رزرو حتی انعطاف بیش‌تری به لحاظ اقتصادی ایجاد می‌نماید و هزینه در حالت با رزرو نسبت به حالت بدون رزرو کم‌تر می‌باشد. این نتایج با مقایسه شکل-های (۴) و (۵) مشخص می‌گردد.

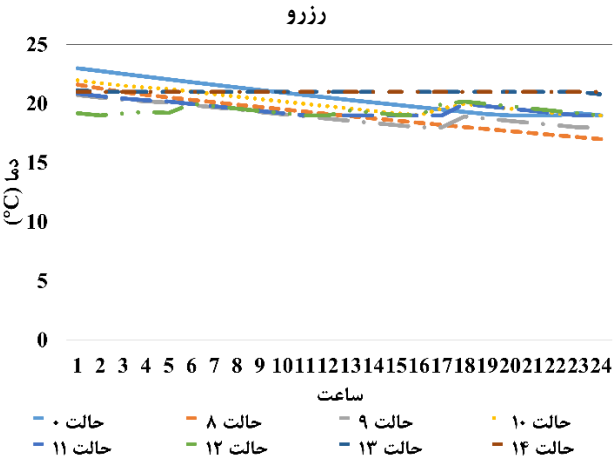
شکل (۶)، مقدار جریمه در حالت‌های در نظر گرفته شده با جریمه در دو حالت بدون رزرو (۵)-(۷) و با رزرو (۱۲)-(۱۴) را نشان می‌دهد. همان‌طور که می‌بینیم با اضافه شدن رزرو، مقدار جریمه‌ها افزایش می‌یابد. این در حالی است که مقدار هزینه کلی کاهش می‌یابد.

۴-۳- مقایسه دما و گاز مصرفی در حالت‌های مختلف

مقدار دما در حالت‌های مختلف بدون رزرو، همراه با حالت (۰) در شکل (۷) آورده شده است.



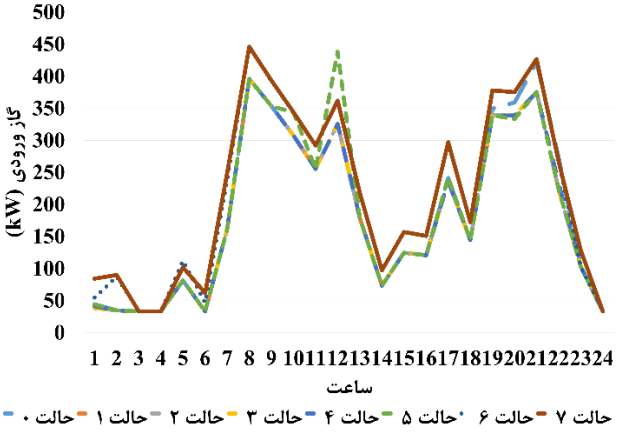
شکل (۷): مقدار دما در حالت‌های مختلف بدون مشارکت در بازار رزرو



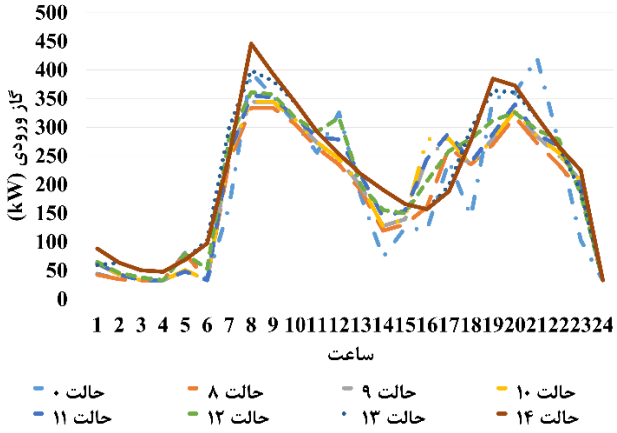
شکل (۸): مقدار دما در حالت‌های مختلف با مشارکت در بازار رزرو

مقدار دما گاهی از ۲۱ درجه تنظیمی بیش‌تر و گاهی کم‌تر است. هنگامی که برای دما یک جریمه تعریف می‌گردد، مقدار دما به ۲۱ درجه نزدیک‌تر می‌گردد. هر چه مقدار جریمه بیش‌تر می‌گردد، دما در ۲۱ درجه ثابت‌تر می‌ماند. در حالت با مقدار جریمه ۱۰۰۰ دیده می-شود که دما در تمام زمان‌ها در ۲۱ درجه ثابت است. مقدار دما در حالت‌های مختلف همراه با تامین رزرو نیز این رفتار را نشان می‌دهد که در شکل (۸) نمایش داده شده است. شکل (۷) و (۸) برای باس ۲ که دارای بیش‌ترین بار الکتریکی و بیش‌ترین مصرف آب گرم است و نیز برای یک روز در بهار رسم شده است. در باس‌ها و سناریوهای دیگر نیز این رفتار دیده می‌شود.

شکل (۹) و (۱۰) به ترتیب مقدار گاز مصرفی را در دو حالت بدون و با مشارکت در بازار رزرو نشان می‌دهد. مقدار مصرف گاز در هر دو حالت، یک رفتار را دارد و در ساعت ۸ و ۲۱ دارای پیک مصرف و در ساعت-های ۳، ۴، ۶ و ۱۴ دارای کم‌ترین مصرف است. علت این رفتار، مقدار مصرف آب گرم در ساعات مختلف روز است. در ساعات ۸ و ۱۴ که مصرف آب گرم در مقادیر بالا قرار دارد و تجهیزات CHP و GB برای تامین این حرارت، گاز بیش‌تری می‌خواهند، مقدار گاز وارد شده بیش-تر است. در ساعاتی که مصرف گاز کم‌تر است، مقدار مصرف آب گرم نیز کم‌تر است. به علاوه، دلیل دیگری که نیز بر مقدار مصرف گاز تاثیر می‌گذارد، مقدار قیمت برق در مقایسه با قیمت گاز در هر لحظه است که بر اساس آن DNO تصمیم می‌گیرد که از تجهیزی که گاز مصرف می‌کند برای تولید حرارت استفاده نماید و یا از تجهیزی که برق مصرف می‌کند، بهره گیرد.



شکل (۹): مقدار مصرف گاز در حالت‌های بدون در نظر گرفتن رزرو



شکل (۱۰): مقدار مصرف گاز در حالت‌های با مشارکت در بازار رزرو

در این جا به مقایسه نتایج به دست آمده با نتایج حاصل از بررسی صورت گرفته در [۳] پرداخته می‌شود. سطر اول جدول (۲)، مقادیر جریمه‌ای که DNO بایستی به هر ساختمان بپردازد را در مدل پیشنهادی، در حالتی که در رزرو مشارکت ندارد نشان می‌دهد. سطر ۲ مقدار جریمه را که طبق بررسی صورت گرفته در [۳] به دست می‌آید را نشان می‌دهد. همان‌گونه که دیده

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-12]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1398.8.3.8.3]
[DOI: 10.29252/ieijqp.8.3.68]

می‌شود، در مدل پیشنهادی، مقدار جریمه پرداختی توسط DNO کاهش یافته است و دلیل آن افزایش انعطاف‌پذیری به دست آمده برای ریزشبکه در نتیجه مشارکت در رزرو، به کارگیری ذخیره‌ساز گرما و نیز منابع الکترو-حرارتی دیگر در شبکه است. بنابر این، استفاده از مدل پیشنهادی می‌تواند هزینه‌های ریزشبکه را کاهش دهد. مشاهده می‌شود که در هر دو مدل، هنگامی که مقدار جریمه واحد بالا در نظر گرفته می‌شود، مقدار جریمه پرداختی به ساختمان‌ها صفر می‌شود. زیرا DNO به گونه‌ای توان ریزشبکه را مدیریت می‌کند تا جریمه پرداختی به ساختمان‌ها کم‌تر شود. در جدول ۳، مقایسه‌ای میان مدل پیشنهادی و مدل قبلی، نشان می‌دهد که هر کدام چه قابلیتی را می‌توانند افزایش دهند.

جدول (۲): مقایسه مقدار جریمه پرداخت شده به هر ساختمان در مدل پیشنهادی و مدل ارائه شده قبلی

	مقدار جریمه ($£/(°C.h)$)		
	۰٫۰۱	۰٫۵	۱۰۰۰
مدل پیشنهادی	۰٫۰۱۲	۰٫۰۱۰	۰
مدل بررسی شده قبلی	۲٫۰۰۰	۱٫۰۰۰	۰

جدول (۳): مقایسه قابلیت‌های مدل پیشنهادی و مدل ارائه شده قبلی

قابلیت	مدل پیشنهادی	مدل قبلی
افزایش انعطاف‌پذیری ناشی از پاسخ‌گویی بار	↑	↑
کاهش هزینه ریزشبکه ناشی از افزایش انعطاف‌پذیری	↑	↑
افزایش درآمد ریزشبکه ناشی از فروش رزرو	↑	–
به کارگیری انواع منابع و ذخیره‌سازهای موجود در ریز-شبکه و بررسی آن‌ها در کنار هم	↑	–
کاهش جریمه پرداختی به ساختمان‌ها در اثر مشارکت در بازار رزرو و به کار گیری انواع منابع و ذخیره‌سازها	↑	–

۵- نتیجه‌گیری

این مقاله یک مدل جامع پیشنهاد داده است که در آن تمامی ذخیره-سازها از جمله باتری در کنار ذخیره‌سازهای گرما و نیز ذخیره‌ساز ساختار ساختمان مدل شده‌اند و از پتانسیل همه ذخیره‌سازها در افزایش انعطاف‌پذیری استفاده گردیده است. توجه ویژه این مقاله به رابطه بین آسایش گرمایی مصرف‌کنندگان و نیز انعطاف‌پذیری ریز-شبکه بوده است. به علاوه مشارکت در بازار رزرو نیز در نظر گرفته شده و تاثیر آن در انعطاف‌پذیری شبکه مورد بررسی قرار گرفته است.

مدل به بررسی حالت‌های در نظر گرفته شده پرداخته است که هر حالت با یک بازه در نظر گرفته شده برای دما که به نوعی می‌توان آن را ذخیره‌ساز خود ساختمان دانست و یا با مقداری جریمه برای ناتوانی در تامین دمای مورد نیاز مشتریان، تعریف شده است. مدل پیشنهادی به شناسایی و بهبود انعطاف‌پذیری ناشی از مکانیسم ذخیره‌سازی خود ساختمان یا سیگنال قیمت برای ناتوانی در تامین دمای مصرف-کنندگان و نیز تاثیر مشارکت در بازار رزرو پرداخته است. مدل ارائه شده، هزینه مورد انتظار و نیز میزان جریمه ناشی از تامین نشدن دما را در هر حالت نشان داده است. مواردی که این مقاله بهبود داده است، شامل تعیین بهتر میزان جریمه برای انعطاف بیش‌تر ریزشبکه از لحاظ هزینه و بهبود آسایش گرمایی مصرف‌کنندگان، تعیین بهتر بازه و خاصیت ذخیره‌سازی خود ساختمان و ایجاد تعادل میان بهبود هزینه و نیز آسایش گرمایی مصرف‌کنندگان، نشان‌دادن تاثیر ذخیره‌سازهای گرما و برق بر انعطاف‌پذیری ریزشبکه، تاثیر مشارکت در بازار رزرو در انعطاف‌پذیری شبکه و کاهش هزینه ریزشبکه بوده است. هم‌چنین مقایسه بین مکانیزم ذخیره‌سازی خود ساختمان و نیز تعیین سیگنال قیمتی به عنوان جریمه برای ناتوانی در تامین دما، نشان داد که تعیین بازه برای دمای تنظیمی در مقایسه با در نظر گرفتن جریمه برای نا-توانی در تامین دما، انعطاف‌پذیری بیش‌تری را نتیجه داده و در نتیجه مقدار هزینه، کاهش بیش‌تری یافته است. هم‌چنین در آن نیاز به سرمایه‌گذاری اضافی نیست. این حالت که در واقع با کاهش هزینه بیش‌تری برای DNO همراه است و در حقیقت سودی است که از سمت مصرف‌کنندگان در اختیار DNO قرار گرفته است، مصرف-کنندگان در آن اجازه داده‌اند تا دما در یک بازه قرار گیرد.

سپاسگزاری

نویسندگان این مقاله، از حمایت‌های شرکت گاز استان تهران در ارائه نکات فنی و فراهم آوردن اطلاعات لازم، جهت بهبود نتایج این مقاله، قدردانی می‌نمایند.

مراجع

[1] M. Yazdani-Damavandi, N. Neyestani, G. Chicco, M. Shafie-Khah, and J. P. S. Catalao, "Aggregation of Distributed Energy Resources Under the Concept of Multienergy Players in Local Energy Systems," *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 8, no. 4, pp. 1679–1693, 2017.

[2] N. Good and P. Mancarella, "Flexibility in Multi-Energy Communities With Electrical and Thermal Storage: A Stochastic, Robust Approach for Multi-Service Demand Response," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 10, no. 1, pp. 503–513, 2019.

[3] N. Good, E. Karangelos, A. Navarro-Espinosa, and P. Mancarella, "Optimization under uncertainty of thermal storage-based flexible demand response with quantification of residential users' discomfort," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 6, no. 5, pp. 2333–2342, 2015.

[4] E. A. Martínez Ceseña, N. Good, A. L. A. Syrri, and P. Mancarella, "Techno-economic and business case assessment of multi-energy microgrids with co-optimization of energy, reserve and reliability services," *Appl. Energy*, vol. 210, pp. 896–913, 2018.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-12]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1398.8.3.8.3]
[DOI: 10.29252/ieijqp.8.3.68]

[5] J. Le Dréau and P. Heiselberg, "Energy flexibility of residential buildings using short term heat storage in the thermal mass," *Energy*, vol. 111, pp. 991–1002, 2016.
[6] B. Alimohammadisagvand, J. Jokisalo, S. Kilpeläinen, M. Ali, and K. Sirén, "Cost-optimal thermal energy storage system for a residential building with heat pump heating and demand response control," *Appl. Energy*, vol. 174, pp. 275–287, 2016.
[7] Y. Chen, P. Xu, J. Gu, F. Schmidt, and W. Li, "Measures to improve energy demand flexibility in buildings for demand response (DR): A review," *Energy and Buildings*, vol. 177. pp. 125–139, 2018.
[8] N. Good, E. A. Martínez Ceseña, C. Heltorp, and P. Mancarella, "A transactive energy modelling and assessment framework for demand response business cases in smart distributed multi-energy systems," *Energy*, vol. 184, pp. 165–179, 2019.
[9] X. Jin, K. Baker, S. Isley, and D. Christensen, "User-preference-driven model predictive control of residential building loads and battery storage for demand response," in *Proceedings of the American Control Conference*, 2017.
[10] A. Taşcıkaraoğlu, N. G. Paterakis, O. Erdinç, and J. P. S. Catalão, "Combining the Flexibility From Shared Energy Storage Systems and DLC-Based Demand Response of HVAC Units for Distribution System Operation Enhancement," *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 10, no. 1, pp. 137–148, 2019.
[11] S. M. Kazemi-Razi, M. Mirsalim, H. Askarian-Abyaneh, H. Nafisi, and M. Marzband, "Maximization of Wind Energy Utilization and Flicker Propagation Mitigation Using SC and STATCOM," in *2018 Smart Grid Conference (SGC)*, 2018, pp. 1–6.
[12] P. Mancarella and G. Chicco, "Real-Time Demand Response From Energy Shifting in Distributed Multi-Generation," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 4, no. 4, pp. 1928–1938, 2013.
[13] E. A. Martínez Ceseña, N. Good, and P. Mancarella, "Electrical network capacity support from demand side response: Techno-economic assessment of potential business cases for small commercial and residential end-users," *Energy Policy*, vol. 82, pp. 222–232, Jul. 2015.
[14] L. Zhang, N. Good, and P. Mancarella, "Building-to-grid flexibility: Modelling and assessment metrics for residential demand response from heat pump aggregations," *Appl. Energy*, vol. 233–234, pp. 709–723, Jan. 2019.
[15] N. P. Good, "Techno-Economic Assessment of Flexible Demand," The University of Manchester (United Kingdom), 2015.
[16] O. Mégel, J. L. Mathieu, and G. Andersson, "Scheduling distributed energy storage units to provide multiple services under forecast error," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 72, pp. 48–57, 2015.
[17] S. Pfenninger and L. Staffell, "Renewables.ninja." [Online]. Available: https://www.renewables.ninja/.
[18] APX-ENDEX., "APX Power U.K.," *(Nov. 10, 2014)*. [Online]. Available: https://www.apxgroup.com/market-results/apx-power-uk/ukpx-rpdhistorical-data/.
[19] Elexon., "SSP/SBP/NIV.," *Nov. 10, 2014*. [Online]. Available: http://www.elexonportal.co.uk/sspsbpniv.
[20] ICE-ENDEX, "ICE ENDEX OCM market data 2014," *accessed December 3, 2014*. [Online]. Available: http://www.iceendex.com/market-data/spot-markets/ocm/.
[21] H. Heitsch and W. Römisch, "Scenario reduction algorithms in stochastic programming," *Comput. Optim. Appl.*, vol. 24, no. 2–3, pp. 187–206, 2003.
[22] E. S. Trust, "Measurement of domestic hot water consumption in dwellings," *Energy Sav Trust*, 2008.

زیرنویس‌ها

[1] Multi-energy
[2] Thermal Energy Storage
[3] Heating, Ventilation and Air Conditioning
[4] Flexible AC Transmission System Devices
[5] Independent System Operator
[6] Distribution Network Operator
[7] Linear Program
[8] Gas Boiler
[9] Combined Heat and Power
[10] Electric Heat Pump
[11] Electrical Boiler
[12] Battery Energy Storage

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-12]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1398.8.3.8.3]
[DOI: 10.29252/ieijqp.8.3.68]