مدیریت مصرف انرژی الکتریکی و حرارتی در مجتمع‌های مسکونی

صیاد نوجوان[1] ، استادیار

۱- دانشکده مهندسی برق- دانشگاه بناب- بناب- ایران
sayyad.nojavan@bonabu.ac.ir

چکیده: مطالعات صورت گرفته نشان‌گر آن است که در کنار استفاده از روش‌های مختلف مدیریت مصرف در بخش خانگی، می‌توان از سیستم‌های موسوم به هاب انرژی نیز برای بهبود در عملکرد و مدیریت در مصرف برق و انرژی منازل استفاده کرد. در هر سیستم انرژی الکتریکی، هدف مشتریان به حداقل رساندن هزینه انرژی‌شان است. در این مقاله مشخص می‌شود که می‌توان در هر خانه از هاب انرژی مسکونی پیشنهادی شامل وسایل مصرفی مختلف، سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی (باتری، خودرو برقی)، سیستم‌های تولید انرژی (فتوولتاییک خورشیدی، بادی و یا انرژی تولیدی از یک نیروگاه گازی خورشیدی ترکیبی) و لینک‌های ارتباطی دو طرفه بین این اجزا استفاده کرد. لازم به ذکر است که در این مقاله سیستم هاب شامل CHP (ترکیب حرارت و برق)، PHEV (خودروی برقی)، HLM (مدیریت بار خانه) و DR (برنامه پاسخ به تقاضا خانگی) و TS (ذخیره ساز حرارتی) می‌باشد که باید بار الکتریکی و حرارتی را با کمترین هزینه تغذیه کند. نهایتا، اثرات برنامه پاسخگویی بار و سیستم ذخیره سازی در بخش مطالعات عددی بررسی شده و نتایج آن باهم مقایسه شده است که نشان دهنده کارایی مدل پیشنهادی است.

واژه های کلیدی: هاب انرژی مسکونی، مدیریت بار، برنامه پاسخگویی بار، خودروی برقی، ذخیره‌ساز الکتریکی و حرارتی.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۷/۱۲/۲۵

تاریخ پذیرش مقاله : ۱۳۹۸/۱۰/۱۸

نام نویسنده‌ی مسئول : صیاد نوجوان

نشانی نویسنده‌ی مسئول : آذربایجان شرقی، بناب، بلوار ولایت، دانشگاه بناب

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-12]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1398.8.3.2.7]
[DOI: 10.29252/ieijqp.8.3.1]

۱- مقدمه

پس از گسترش شبکه‌های گاز طبیعی و همچنین مزایای این حامل انرژی، ترکیب فناوری حرارت و برق CHP سطح غیر منتظره‌ای از محبوبیت را به دست آورده است [۲,۱]. واحد CHP به عنوان یک تکنولوژی تولید همزمان برای توزیع منابع انرژی و برای تولید برق حرارت به طور همزمان در محل به خوبی شناخته شده است. تبدیل انرژی بین حامل‌های مختلف و ارتباط بین جریان توان را احراز می‌کند و در نتیجه فعل و انفعالات سیستم را به همراه دارد [۳و۴].

تحقیقات اخیر یک چهارچوب یکپارچه از سیستم های انرژی از جمله حامل‌های انرژی چند گانه [۵]، به جای تمرکز بر روی تک تک حامل انرژی را نشان می‌دهد. از آنجا که طراحی و اجرای این سیستم با توجه به طرح‌بندی به هم‌پیوسته سیستم پیچیده هستند، مهم بوده که به انتخاب ابزاری برای کمک به تنظیمات بهتر سیستم و ترکیبی از منابع انرژی را ارائه می‌کند [۷,۶]. چارچوب هاب انرژی برای تعیین یک روش مدل‌سازی برای چنین سیستم‌های انرژی چند حاملی به تصویب رسیده است [۸,۵]. هاب انرژی وظایف تبدیل، ذخیره‌سازی، هماهنگی و مدیریت انرژی را دارد [۱۴-۹]. مسئله اساسی در این منابع این است که چه مقدار از هر حامل انرژی هاب باید مصرف و چگونه آنها باید تغییر یابند تا به خروجی مد نظردر بارهای خود برسند. در حال حاضر افزایش علاقه به سیستم‌های انرژی چندحاملی خانه مسکونی می باشد. این سیستم یکپارچه‌سازی منابع انرژی مختلف به منظور تغذیه‌ی بار خانگی است [۱۵]. در خانه‌ها تمام خواسته‌های به عنوان مثال برق و حرارت، با سیستم‌های برق و یا گاز طبیعی تامین می‌شود. یک هاب انرژی مسکونی می‌تواند انرژی چندحاملی یک خانه، که در آن منابع انرژی ورودی برق و گاز طبیعی مدل و خروجی خواسته های الکتریکی و حرارت می‌باشد [۱۶]. علاوه‌براین، استفاده از وسیله‌ی نقلیه‌ی الکتریکی هیبریدی PHEV یکی از فناوری جدید می‌باشد که رشد کرده است که می‌تواند به عنوان یک سیستم ذخیره-سازی و همچنین به عنوان یک منبع تقاضای برق در خانه عمل کند. ویژگی‌های PHEV، بسته به رفتار صاحب PHEV یا استانداردهای کارخانه سازنده آن دارد که باید در مدل‌سازی گنجانده شود [۱۷]. منابع انرژی مختلف و فناوری‌های جدید مانند PHEV و CHP در مدل هاب انرژی مسکونی با توجه به انتخاب بهینه از منابع انرژی و نحوه‌ی جریان انرژی تحقیقات کمی صورت گرفته است [۱۸,۶] که به سیستم انرژی چندحاملی و هاب انرژی توجه داشته‌اند. در سال‌های اخیر در سطح مشتری برنامه های حساس به تقاضا DR نقش برجسته ای در تحقق شبکه‌های هوشمند بازی می‌کنند. کنترل اتوماتیک تقاضای خانگی از دیدگاه مشتری به عنوان مدیریت بار خانه HLM متقاعدکننده‌ی مشتریان به شرکت در برنامه‌ی DR فعالانه می‌باشد. در روش HLM تقاضای بار ممکن است به ساعت کم‌باری در حساسیت به زمان‌های مختلف تعرفه‌ی انرژی تغییر یابد [۲۰,۱۹]. برنامه‌ی HLM را می‌توان در فرآیندهای بهینه‌سازی بهره‌برداری مسکونی هاب انرژی استفاده کرد. برای انجام این کار، لوازم خانگی الکتریکی و گرمایش به گروه‌های حساس و غیرحساس تقسیم می-شوند. زمان بهره‌برداری و مصرف انرژی در لوازم حساس با توجه به محدودیت‌های عملیاتی تعیین شده توسط مشتری می‌توانند در روش HLM کنترل شوند [۲۱].

این مقاله ابتدا به مدل‌سازی یک خانه به عنوان یک هاب انرژی با توجه به لوازم مختلف الکتریکی و گرمایش، CHP مسکونی و یک PHEV پرداخته و سپس بهره برداری از هاب انرژی بهینه‌سازی شده است. نوآوری مقاله بصورت زیر می‌باشد:

۱- درنظر گرفتن مدل واقعی خودروی برقی

۲- درنظر گرفتن اثرات برنامه پاسخگویی بار

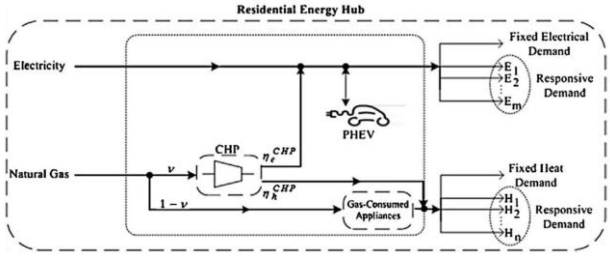
۳- درنظر گرفتن اثرات سیستم ذخیره‌ساز حرارتی

ادامه مقاله بصورت زیر سازماندهی شده است: بخش ۲ مدل پیشنهادی برای هاب انرژی مسکونی با درنظر گرفتن برنامه پاسخگویی بار بصورت ریاضی مدل‌سازی شده است. مطالعات عددی و نتایج مقایسه‌ای در بخش ۳ ارائه شده است. نهایتا، بخش ۴ نتیجه‌گیری مقاله را ارائه داده است.

۲- فرمول‌بندی مسئله هاب انرژی مسکونی

شکل۱ شماتیکی از هاب انرژی مسکونی را نشان می‌دهد. در یک خانه‌ی هوشمند لوازم حساس و بدون حساسیت مصرف برق یا گاز طبیعی به تغذیه تقاضاهای الکتریکی و حرارتی می‌انجامد. بنابراین لوازم نقش مبدل یا تهویه در هاب انرژی‌های مسکونی را بازی می‌کنند.

کنترلر در خانه به عنوان مثال یک کنترل هاب انرژی می‌تواند تعیین کننده‌ی وضعیت روشن/خاموش بودن برخی از لوازم حساس از قبیل ماشین لباسشویی، ظرفشویی و جاروبرقی در هر زمان باشد. همچنین سطح مصرف انرژی دیگر لوازم حساس مانند کولر، اجاق گاز و آب‌گرم‌کن در هر مدت زمان می‌تواند توسط کنترل تنظیم شود.



شکل ۱: مدل هاب انرژی مسکونی

مشتری می‌تواند محدودیت‌های بهره برداری مانند فاصله‌ی زمانی بهره‌برداری مجاز برای هر یک از این وسایل تنظیم شده است. CHP میکرو به عنوان یک تولید پراکنده مسکونی مصرف گاز طبیعی برای تعیین گرما و توان گاز به برق و گاز برای گرم کردن بازده تبدیل از

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-12]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1398.8.3.2.7]
[DOI: 10.29252/ieijqp.8.3.1]

CHP به ترتیب η_h^{CHP} و η_e^{CHP} در شکل۱ ارائه شده است. علاوه‌براین PHEV به عنوان یک سیستم ذخیره‌سازی برق در هاب انرژی عمل می‌کند با توجه به این که آن را می‌تواند در تقاضای خانگی الکتریکی سودآور است.

در مدل هاب انرژی‌های مسکونی ارائه شده تقاضای برق را می‌توان با شبکه‌ی برق ارائه داد که توسط دشارژ باتری PHEV و با استخراج انرژی الکتریکی از CHP صورت می‌گیرد. با توجه به شکل۲، گاز طبیعی می‌توان به لوازم و گاز مصرف یا CHP وارد شود. همان‌طور که قبلا اشاره شد، توزیع گاز طبیعی بین دو گزینه بر اساس عامل انتقال تعیین می‌شود.

در این مقاله، یک مسئله بهینه‌سازی فرموله منجر به بهره‌برداری بهینه از هاب انرژی و همچنین مدیریت بهینه از تقاضاهای خانگی برای روز بعد می‌باشد. هدف برای حداقل رساندن هزینه‌ی پرداخت مشتری در حساسیت به تعرفه‌های انرژی است. خروجی مسئله می‌تواند از عوامل انتقال هاب انرژی مقدار حامل‌های انرژی دریافت شده در ورودی هاب در هر زمان بهره‌برداری لوازم حساس و شارژ/دشارژ PHEV می‌باشد. تابع هدف (۱) در معادله زیر ارائه شده است:

$$Min\ \text{Cost} = \sum_t [\lambda_g(t)E_g(t) + \lambda_e(t)E_e(t)] \qquad (۱)$$

بر اساس هاب مسکونی نشان داده شده در شکل۱ معادلات تعادل توان و حرارت در معادلات (۲) و (۳) ارائه شده است.

$$E_e(t) + E_e^{CHP}(t) + \eta_{dch}E_{dch}^{PHEV}(t) = \frac{1}{\eta_e}\times D_{e,DRP}(t) + \frac{1}{\eta_{dch}}\times E_{ch}^{PHEV}(t) \qquad (۲)$$

$$(1-v(t))E_g(t)\eta_h + E_h^{CHP}(t) + p_t^{dis,h} = D_h(t) + p_t^{ch,h} \qquad (۳)$$

توجه داشته باشید که E_{ch}^{PHEV} و E_{dch}^{PHEV} به ترتیب توان شارژ و دشارژ در باتری خودروی برقی هست. انرژی الکتریکی و حرارتی خروجی CHP توسط معادلات (۴) و (۵) مدل‌سازی شده است.

$$E_e^{CHP}(t) = v(t)\times E_g(t)\times \eta_e^{CHP} \qquad (۴)$$

$$E_h^{CHP}(t) = v(t)\times E_g(t)\times \eta_h^{CHP} \qquad (۵)$$

تاکنون قیود بهره برداری مربوط به توان الکتریکی و حرارتی به طور کامل در معادلات هاب انرژی ارائه شده است. در حال حاضر محدودیت مربوط به PHEV و CHP معرفی شده‌اند. میزان شارژ و دشارژ باتری PHEV به مقادیر قطعی در معادلات (۶) و (۷) به عنوان محدوده شارژ/دشارژ شناخته شده است [۲۲].

$$E_{ch}^{PHEV}(t) \le E_{ch}^{\max} \qquad (۶)$$

$$E_{dch}^{PHEV}(t) \le E_{dch}^{\max} \qquad (۷)$$

فرض بر این است که خودروی برقی PHEV در ساعات مشخصی از روز از خانه بیرون رفته و برگشته است که به ترتیب با زمان‌های g و c نشان داده شده است، در بازه [c,g] شارژ و دشارژ در خانه امکان‌پذیر نیست. علاوه‌براین، مصرف انرژی الکتریکی از PHEV در فاصله‌ی خارج از خانه به عنوان E_{out}^{PHEV} به عنوان PHEV برآورد شده است. بنابراین سطح شارژ باتری PHEV در ساعت t، $E^{PHEV}(t)$ می‌تواند قبل و بعد از فاصله خارج از خانه بر اساس معادله (۸) محاسبه شود.

$$E^{PHEV}(t) = \begin{cases} E_0^{PHEV} + \sum_{h=1}^{t-1}[E_{ch}^{PHEV}(h) - E_{dch}^{PHEV}(h)] & ,\forall t \le g \\ E_0^{PHEV} + \sum_{h=1}^{t-1}[E_{ch}^{PHEV}(h) - E_{dch}^{PHEV}(h)] - E_{out}^{PHEV} & ,\forall t \ge c \end{cases} \qquad (۸)$$

به عبارت دیگر فرمول (۸) معادله‌ی تعادل انرژی خودروی برقی می‌باشد. واضح است که میزان انرژی باتری خودروی برقی دارای مقدار مثبت است. انرژی دشارژ شده در هر یک ساعت باید کم‌تر از سطح شارژ باتری PHEV که در معادله‌ی (۹) بیان شده است. علاوه بر این، سطح شارژ باید محدود به ظرفیت باتری باشد. این سطح محدود شارژ با معادله ریاضی بیان شده در معادله (۱۰) بیان شده است. مشتری معمولا انتظار یک PHEV کامل شارژ شده در زمان حرکت (ساعت g) دارد. این موضوع با فرمول (۱۱) بیان شده است.

$$E_{dch}^{PHEV}(t) \le E^{PHEV}(t) \qquad (۹)$$

$$E^{PHEV}(t) \le Cap^{PHEV} \qquad (۱۰)$$

$$E^{PHEV}(g) = Cap^{PHEV} \qquad (۱۱)$$

سطح شارژ باتری PHEV در پایان روز بیشتر یا مساوی با سطح شارژ اولیه باتری PHEV منطقی تصور می‌شود. که با فرمول (۱۲) نشان داده شده است.

$$E^{PHEV}(24) \ge E_0^{PHEV}(t) \qquad (۱۲)$$

محدودیت‌های بهره‌برداری CHP در (۱۳) به عنوان یکی دیگر از محدودیت مسئله ارائه شده است [۲۳]. برق و گاز طبیعی دریافتی در ورودی هاب را می‌توان با توجه به محدودیت‌های زیر محدود کرد.

$$v(t)E_g(t) \le E_{\max}^{CHP} \qquad (۱۳)$$

$$E_e(t) \le E_e^{\max} \qquad (۱۴)$$

$$E_g(t) \le E_g^{\max} \qquad (۱۵)$$

همان طور که گفته شد برای اجرای مدیریت بار خانگی، بارهای حرارت و الکتریکی به بارهای حساس و ثابت تقسیم شده اند:

$$D_e(t) = D_e^{fix}(t) + D_e^{res}(t) \qquad (۱۶)$$

$$D_h(t) = D_h^{fix}(t) + D_h^{res}(t) \qquad (۱۷)$$

فرض بر این است که لوازم غیرحساس مانند تلویزیون و رایانه‌های شخصی، در ساعات مختلف با تقاضای ثابت برآورد شده‌اند برخی از لوازم حساس مانند ماشین لباسشویی که در حالت روشن/خاموش کار می‌کند. چنین دستگاهی نیاز به یک زمان عمل قطعی برای تکمیل کار دارد. این زمان بهره‌برداری باید در یک بازه‌ی زمانی مجاز تعیین شده توسط مشتری نهفته باشد. این محدودیت در معادله (۱۸) برای لوازم الکتریکی تعیین شده است. مصرف انرژی در این نوع از لوازم حساس همانند معادله (۱۹) است.

$$\sum_{t=b_i^e}^{e_i^e} I_i^e(t) = U_i^e \qquad (۱۸)$$

$$E_i(t) = E_i I_i^e(t) \qquad (۱۹)$$

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-12]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1398.8.3.2.7]
[DOI: 10.29252/ieijqp.8.3.1]

علاوه بر کنترل الکتریکی روشن/خاموش دستگاه‌ها، سطح مصرف انرژی برخی از لوازم حساس در هر یک ساعت می‌تواند به میزان قطعی پیوند بخورد. این محدوده با توجه به تنظیمات فنی لوازم و رفتار مشتری تعیین می‌شود. این میزان با معادله ریاضی (۲۰) برای لوازم الکتریکی ارائه شده است. مصرف لوازم j در یک روز به صورت معادله‌ی ریاضی (۲۱) محاسبه می‌شود. بار الکتریکی حساس توسط معادله (۲۲) مدل‌سازی می‌شود.

$$E_j^{\min}(t) \le E_j(t) \le E_j^{\max}(t) \quad (۲۰)$$

$$\sum_t E_j(t) = E_j \quad (۲۱)$$

$$\sum_t E_i(t) + \sum_t E_j(t) = D_e^{res}(t) \quad (۲۲)$$

برنامه پاسخگویی بار برای هموار کردن منحنی بار مسکونی پیشنهاد شده است تا هزینه بهره‌برداری را کاهش دهد. که بصورت معادله (۲۳) مدل‌سازی شده است که نشان دهنده افزاینده بار در ساعات کم باری و کاهنده بار در ساعات پیک است. این بار افزایشی و کاهشی باید درصدی از بار پایه باشد که توسط معادلات (۲۴) و (۲۵) محدود شده است. علاوه‌براین، مقدار این بار افزایشی و بار کاهشی با هم برابر است که در معادله (۲۶) نشان داده شده است. و نهایتا، عدم همزمانی افزایش و کاهش بار در هر لحظه از زمان در قید (۲۷) محدود شده است [۲۴].

$$D_{e,DRP}(t) = D_e(t) + p_t^{shup,e} - p_t^{shdo,e} \quad (۲۳)$$

$$0 \le p_t^{shup,e} \le LPF^{shup,e} \times D_e(t) \times I_t^{shup,e} \quad (۲۴)$$

$$0 \le p_t^{shdo,e} \le LPF^{shdo,e} \times D_e(t) \times I_t^{shdo,e} \quad (۲۵)$$

$$\sum_t^H p_t^{shup,e} = \sum_t^H p_t^{shdo,e} \quad (۲۶)$$

$$I_t^{shup,e} + I_t^{shdo,e} \le 1 \quad (۲۷)$$

انرژی ذخیره شده در سیستم ذخیره‌ساز حرارتی براساس انرژی ساعت قبل و میزان حرارت شارژ و دشارژ شده و تلفات حرارتی در معادله (۲۸) نشان داده شده و در معادله (۲۹) محدود شده است. همچنین میزان تلفات حرارتی در معادله (۳۰) ارائه شده است. میزان حرارت شارژ و دشارژ شده توسط معادلات (۳۱) و (۳۲) محدود شده است. نهایتا، عدم همزمان شارژ و دشارژ سیستم ذخیره‌ساز حرارتی توسط معادله (۳۳) محدود شده است.

$$C_t^{st,h} = C_{t-1}^{st,h} + p_t^{ch,h} \times \eta_{ch}^h - p_t^{dis,h} / \eta_{dis}^h - p_t^{loss,h} \quad (۲۸)$$

$$\alpha_{\min}^h \times C_c^{st,h} \le C_t^{st,h} \le \alpha_{\max}^h \times C_c^{st,h} \quad (۲۹)$$

$$p_t^{loss,h} = \alpha_{loss}^h \times C_t^{st,h} \quad (۳۰)$$

$$\frac{\alpha_{\min}^h \times C_c^{st,h} \times I_t^{ch,h}}{\eta_{ch}^h} \le p_t^{ch,h} \le \frac{\alpha_{\max}^h \times C_c^{st,h} \times I_t^{ch,h}}{\eta_{ch}^h} \quad (۳۱)$$

$$\alpha_{\min}^h \times C_c^{st,h} \times I_t^{dis,h} \times \eta_{dis}^h \le p_t^{dis,h} \le \alpha_{\max}^h \times C_c^{st,h} \times I_t^{dis,h} \times \eta_{dis}^h \quad (۳۲)$$

$$I_t^{ch,h} + I_t^{dis,h} \le 1 \quad (۳۳)$$

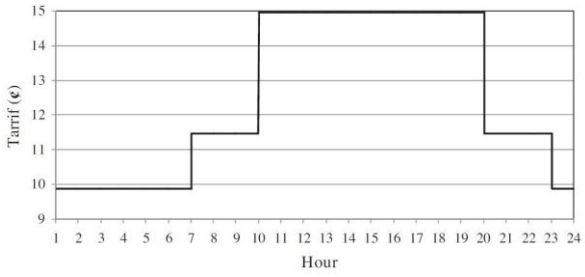
۳- مطالعات عددی

در این بخش، روش ارائه شده و فرمولاسیون به یک خانه برای نمونه اعمال می‌شود. این مطالعه به اندازه‌ی کافی است که بتوان تجزیه و تحلیل عمیق برای اثرات مدل هاب انرژی‌های مسکونی پیشنهاد کرد واجرای HLM در منحنی بار خانگی و هزینه‌ی پرداخت مشتری را به دست آورد.

۳-۱- فرضیات و داده‌ها

تمامی داده های مورد نیاز در این مقاله از مرجع [۲۵] اخذ شده است. تعرفه‌ی گاز که معمولا تصور می شود یک نرخ ثابت در یک روز است. در این جا فرض می شود 5.5 \$/kWh است. از سوی دیگر بهای متفاوت هم برای برق طراحی شده است. قیمت بر اساس برنامه‌ی DR در روش قیمت‌گذاری متمرکز است. رایج‌ترین زمان تعرفه‌های الکتریکی متمایز برای مشتری مسکونی زمان استفاده قیمت‌گذاری TOU است. سطح قیمت‌های مختلف معمولا دو یا سه سطح در تعرفه TOU برای یک روز معرفی شده است. در این جا سه سطح TOU به عنوان قیمت برق همان طور که در شکل۲ نشان داده شده است، فرض می‌شود. همچنین توجه داشته باشید که چنین تعرفه‌ای بر اساس رفتار تقاضای بار در یک روز طراحی شده است.

قیمت انرژی الکتریکی در هنگام برآورد مصرف بالاست. جدول ۱ پارامترهای مربوط به PHEV را بیان می‌کند. داده CHP یعنی ضریب تبدیل گاز به برق و تبدیل حرارت راندمان و حداکثر مقدار گاز طبیعی وارد در جدول ۲ ارائه شده است. به طور کلی بازده مصرف برق و گاز لوازم , η_e و η_h به ترتیب ۰/۹۹ و ۰/۹۵تصور می‌شود.



شکل ۲- قیمت برق

جدول ۱- داده‌های خودروی برقی PHEV

Cap^{PHEV}	$[kWh/h]\ E_{ch}^{\max}$	$[kWh/h]\ E_{dch}^{\max}$	E_0^{PHEV}
7.8	1.4	1.4	3.9
g	**C**	E_{out}^{PHEV}	η_{ch}, η_{dch}
8 a.m.	5 p.m.	5	0.88

جدول ۲- داده‌های CHP

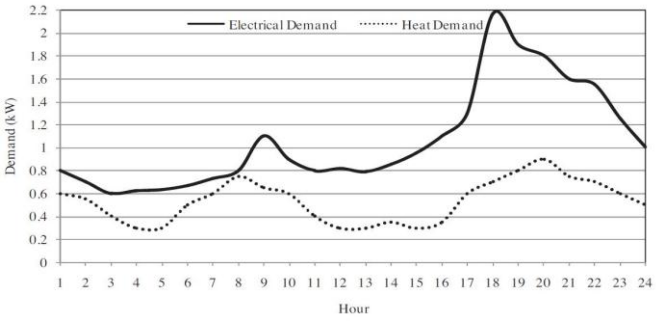
[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-12]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1398.8.3.2.7]
[DOI: 10.29252/ieijqp.8.3.1]

η_e^{CHP}	η_h^{CHP}	$[kW]\ E_{\max}^{CHP}$
0.3	0.4	1

تقاضای الکتریکی شامل مصرف لوازم خانگی از قبیل ماشین لباسشویی، ماشین ظرفشویی، تلویزیون، نور، کولر و فن و غیره می‌باشد. تقاضای حرارت شامل مصرف آب‌گرم کن، اجاق گاز و غیره است. مطالبات برق و حرارت در یک روز عادی در زمستان در نظر گرفته شده است که در شکل۳ نشان داده شده است. بر این اساس اوج تقاضا برق در حدود2.2 kW در ساعت ۱۸ است و اوج تقاضای حرارت حدود 0.9 kW در ساعت ۲۰ است. لازم به ذکر است که علاوه‌براین تقاضا، تقاضای شارژ PHEV باید توسط حامل‌های انرژی دریافت شده در ورودی هاب تغذیه شوند .

برنامه HLM در روند بهینه‌سازی هاب انرژی‌های مسکونی استفاده می‌شود. برای این کار محدودیت‌های بهره‌برداری لوازم پاسخ‌گو باید در نظر گرفته شود. برای سادگی تنها با یک روشن/خاموش دستگاه کنترل و یک دستگاه که سطح انرژی مصرف را می‌تواند کنترل کند، در این جا در نظر گرفته شده است. برق لوازم خانگی مانند ماشین لباسشویی با روشن/خاموش کنترل می‌شود و در یک دستگاه گرم مثل آب‌گرم‌کن که سطح مصرف انرژی در هر یک ساعت را می‌تواند در فاصله‌ی مجاز کنترل کند. فاصله‌ی زمانی مجاز بهره‌برداری از ماشین لباسشویی یک کیلووات ساعتی فرض بر این است که بین ساعت ۸ و ۲۴ باشد. علاوه‌براین، میزان حداکثر توان مصرفی یک کیلو وات ساعت و مصرف انرژی در ساعت عامل یک کیلو وات ساعت است. بنابراین:

$$b_{WM}^e = 8, e_{WM}^e = 24, I_{WM}^e(t) = 0; \forall t \in [1,7]$$
$$U_{WM}^e = 1h, E_{WM} = 1kWh$$



شکل ۳- بار الکتریکی و حرارتی هاب انرژی

مشتری تعیین می‌کند که آب‌گرم‌کن باید کم‌تر از یک دهم کیلووات ساعت بین ساعت ۸ و ۱۷ مصرف کار کند، و باید بین یک دهم کیلووات ساعت و سه دهم کیلووات ساعت در سایر ساعت مصرف می‌کند. علاوه‌براین، مصرف کل انرژی در روز باید ۳/۸ کیلووات ساعت باشد. بنابراین:

$$H_{WH}^{\min}(t) = \begin{cases} 0,8 \le t \le 17 \\ 0.1, t \le 7 : or : t \ge 18 \end{cases}$$

$$H_{WH}^{\max}(t) = \begin{cases} 0.1,8 \le t \le 17 \\ 0.3, t \le 7 : or : t \ge 18 \end{cases}$$
$$H_{WH} = 3.8kWh$$

۳-۲- مقایسه نتایج شبیه‌سازی مدل هاب انرژی

بهره‌برداری از هاب انرژی توسط معادله‌ی (۱) تحت قیود فنی (۲)-(۳۳) با و بدون برنامه پاسخگویی بار و سیستم ذخیره‌ساز حرارتی بهینه‌سازی شده است. مسئله بهینه‌سازی پیشنهادی با استفاده از یک برنامه‌ریزی خطی آمیخته با اعداد صحیح تحت نرم افزار بهینه‌سازی GAMS حل شده است که زمان انجام محاسبات کمتر از ۱۰ ثانیه است. چهار مطالعه موردی به منظور نشان دادن اثر DRP و TS بر روی مدل هاب انرژی مسکونی و کاهش هزینه بهره‌برداری در نظر گرفته شده است.

مطالعات موردی در نظر گرفته شده به صورت زیر ارائه شده است.

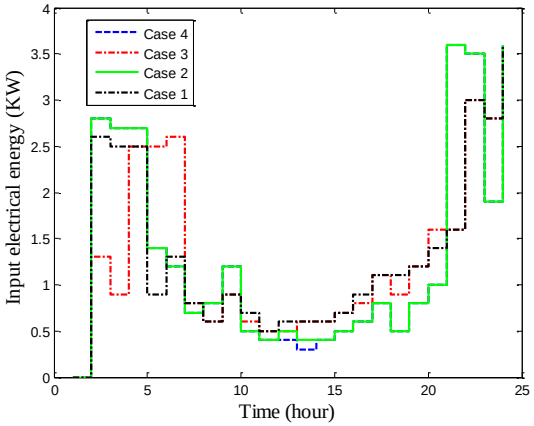
۱- شبیه‌سازی مدل هاب انرژی مسکونی بدون حضور DRP و TS
۲- شبیه‌سازی مدل هاب انرژی مسکونی با حضور DRP و بدون TS
۳- شبیه‌سازی مدل هاب انرژی مسکونی با حضور TS و بدون DRP
۴- شبیه‌سازی مدل هاب انرژی مسکونی با حضور DRP و TS

با توجه به نتایج به دست آمده از شبیه سازی مدل هاب انرژی مسکونی، هزینه انرژی مصرفی در مطالعه موردی ۱ برابر با $ ۵۰۹.۸ می باشد در حالی که از DRP و TS صرف نظر شده است. همچنین، هزینه انرژی مصرفی در مطالعه موردی ۲ برابر با $ ۴۹۷.۴ است که این میزان کاهش هزینه بخاطر اثرات برنامه پاسخگویی بار جهت هموار کردن منحنی بار در مدل هاب انرژی مسکونی است. علاوه براین، هزینه انرژی مصرفی در مطالعه موردی ۳ برابر با $ ۵۰۳.۷ است که این میزان کاهش هزینه نسبت به مطالعه موردی ۱ بخاطر اثرات سیستم ذخیره ساز حرارتی TS در مدل هاب انرژی مسکونی است. نهایتا، هزینه انرژی مصرفی در مطالعه موردی ۴ برابر با $ ۴۹۲.۲ است که این میزان کاهش نسبت به مطالعه های موردی ۱، ۲ و ۳ بخاطر اثرات همزمان برنامه پاسخگویی بار و سیستم ذخیره ساز حرارتی در مدل هاب انرژی مسکونی است.

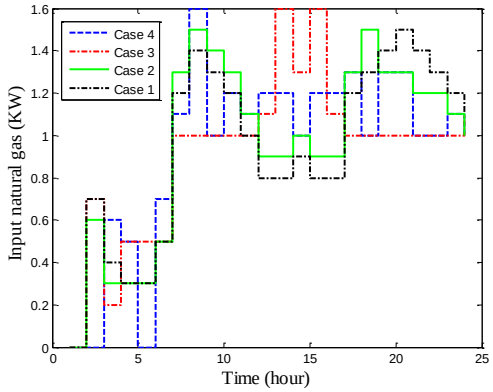
شکل ۴ انرژی الکتریکی ورودی هاب انرژی در ۴ مطالعه موردی را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که خرید انرژی الکتریکی توسط هاب انرژی در ساعات پیک بخاطر اجرای برنامه پاسخگویی بار و مدیریت هوشمند شارژ و دشارژ سیستم ذخیره‌ساز حرارتی کمتر شده و در ساعات کم مصرف بیشتر شده است. بنابراین، منجر به کاهش هزینه بهره‌برداری و پرداخت مصرفی هاب انرژی مسکونی شده است. علاوه براین، شکل‌های ۵ و ۶ به ترتیب نمودار گاز طبیعی ورودی هاب انرژی و گاز طبیعی ورودی به لوازم مصرفی گاز سوز GCA در ۴ مطالعه موردی را نشان می‌دهد. از این شکل‌ها مشاهده می‌شود که میزان گاز خریداری شده از شبکه گاز توسط هاب انرژی در ساعات پرمصرف

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-12]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1398.8.3.2.7]
[DOI: 10.29252/ieijqp.8.3.1]

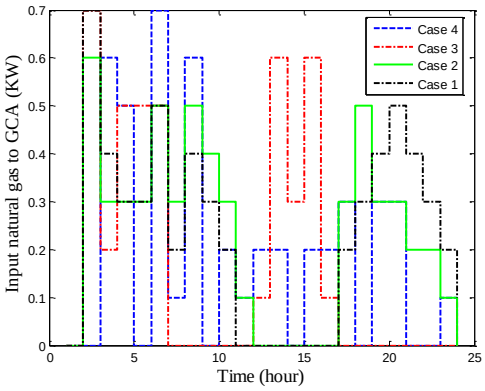
کاهش یافته و در ساعات کم مصرف افزایش یافته است که ناشی از انتقال قسمتی از بار ساعات پرمصرف به ساعات کم مصرف بخاطر اجرای برنامه پاسخگویی بار هست و البته شارژ و دشارژ هوشمند ذخیره‌ساز حرارتی هست.



شکل ۴- مقایسه انرژی الکتریکی ورودی هاب انرژی در ۴ مطالعه موردی



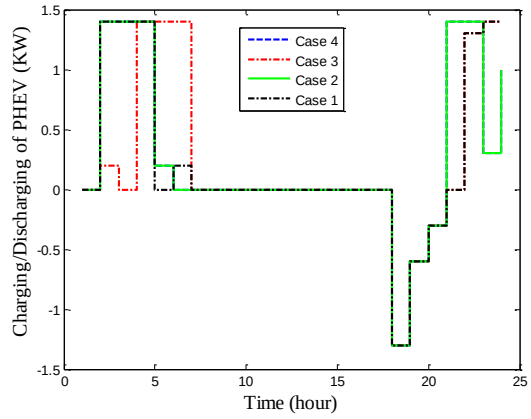
شکل ۵- مقایسه گاز طبیعی ورودی هاب انرژی در ۴ مطالعه موردی



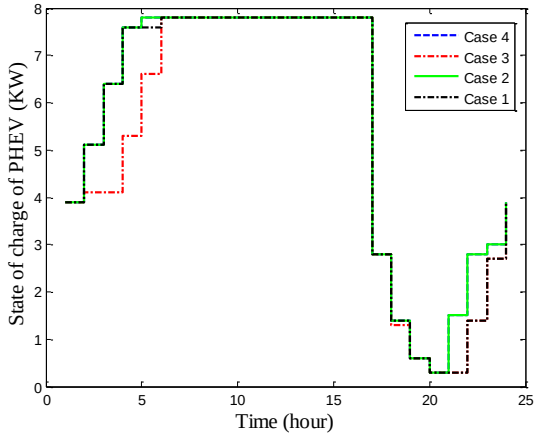
شکل ۶- مقایسه گاز طبیعی ورودی به لوازم مصرفی گاز سوز GCA در ۴ مطالعه موردی

شکل ۷ و ۸ به ترتیب منحنی شارژ و دشارژ خودروی برقی واحد مسکونی و میزان انرژی موجود آن در ۴ مطالعه موردی را مقایسه کرده است. با توجه به شکل‌ها مشاهده می‌شود که میزان شارژ و دشارژ خودرو در ساعات ۷ تا ۱۸ صفر است زیرا خودرو در واحد مسکونی و در پارکینگ پارک نشده است. همچنین، میزان شارژ خودروی برقی در ساعات کم مصرف که قیمت انرژی کمتر است شارژ شده و در ساعات پرمصرف برقی که قیمت برق زیاد است دشارژ می‌شود. علاوه براین، برنامه پاسخگویی بار و مدیریت هوشمند شارژ و دشارژ سیستم ذخیره ساز حرارتی منجر به کاهش نرخ شارژ و دشارژ خودروی برقی شده است که منجر به افزایش عمر باتری خودروی برقی خواهد شد.

همچنین، شکل‌های ۹ و ۱۰ منحنی شارژ/دشارژ و میزان انرژی ذخیره شده در سیستم ذخیره‌ساز حرارت در ۴ مطالعه موردی را مقایسه کرده است. مشاهده می‌شود که در مطالعه های موردی ۱ و ۲ میزان شارژ و دشارژ بدلیل عدم استفاده از این ذخیره‌ساز حرارتی صفر است. علاوه براین، شارژ و دشارژ ذخیره ساز حرارتی در مطالعه موردی ۳ منجر به کاهش هزینه مصرفی هاب انرژی مسکونی شده است. نهایتا، در مطالعه موردی ۴ میزان شارژ و دشارژ ذخیر ساز حرارتی نسبت به مطالعه موردی ۳ کاهش یافته است که ناشی اعمال برنامه پاسخگویی بار همزمان است که منجر به کاهش بیشتر هزینه هاب انرژی شده است.

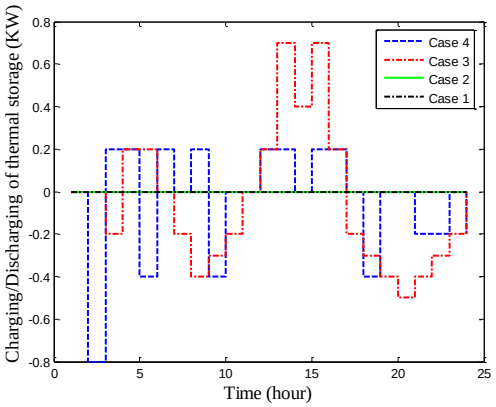


شکل ۷- مقایسه نمودار شارژ / دشارژ خودروی برق در ۴ مطالعه موردی

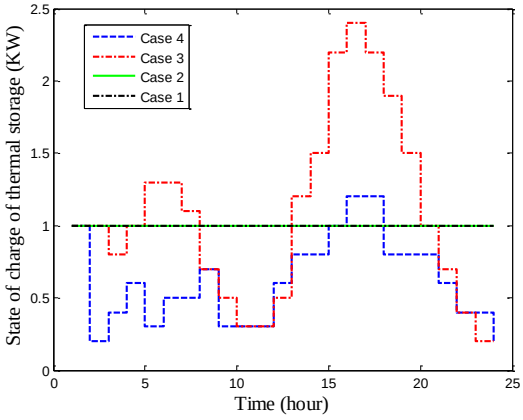


شکل ۸- مقایسه میزان انرژی خوددروی برقی در ۴ مطالعه موردی

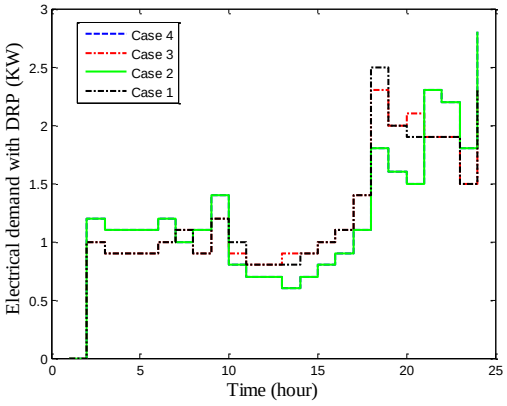
[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-12]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1398.8.3.2.7]
[DOI: 10.29252/ieijqp.8.3.1]



شکل ۹- مقایسه نمودار شارژ / دشارژ ذخیره ساز حرارت در ۴ مطالعه موردی

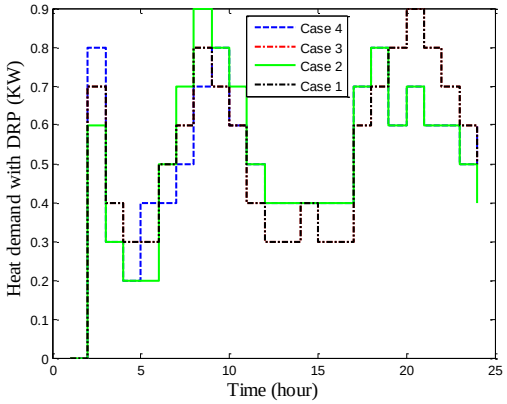


شکل ۱۰- مقایسه میزان انرژی ذخیره ساز حرارتی در ۴ مطالعه موردی

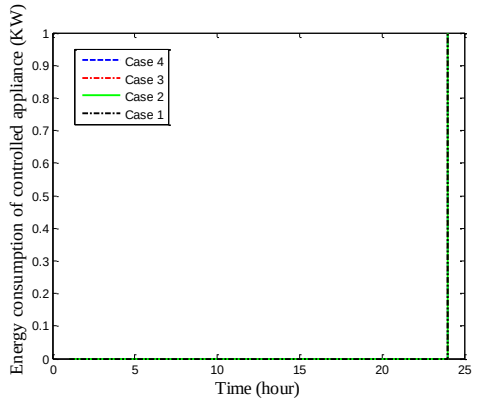


شکل ۱۱- تقاضای الکتریکی با حضور برنامه پاسخگویی بار

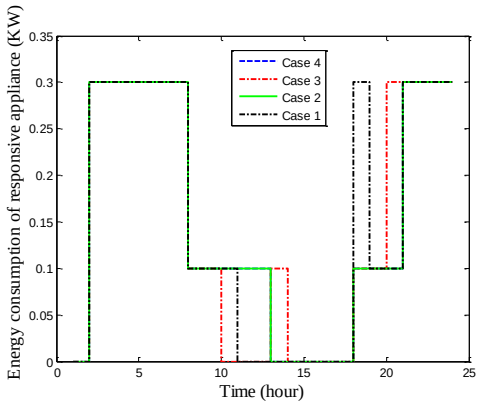
شکل‌های ۱۱ و ۱۲ به ترتیب منحنی تقاضاهای الکتریکی و حرارتی را با درنظر گرفتن برنامه پاسخگویی بار (DRP) در ۴ مطالعه موردی را با هم مقایسه کرده است. از این شکل ها مشاهده می‌شود که میزان تقاضاهای الکتریکی و حرارتی در ساعات اوج مصرف بدلیل اجرای برنامه پاسخگویی بار کمتر شده و درعوض در ساعات کم مصرف بیشتر شده است که در نهایت منجر به هموار شدن منحنی بار الکتریکی و حرارتی شده و در نهایت منجر به کاهش هزینه هاب انرژی شده است. نهایتا، شکل های ۱۳ و ۱۴ به ترتیب میزان مصرف انرژی دستگاه کنترل شده و مصرف انرژی لوازم خانگی پاسخگو در ۴ مطالعه موردی را با هم مقایسه کرده است.



شکل ۱۲- مقایسه تقاضای حرارتی با حضور برنامه پاسخگویی بار



شکل ۱۳- میزان مصرف انرژی دستگاه کنترل شده



شکل ۱۴- مقایسه مصرف انرژی لوازم خانگی پاسخگو

نهایتا، شکل های ۱۳ و ۱۴ به ترتیب میزان مصرف انرژی دستگاه کنترل شده و مصرف انرژی لوازم خانگی پاسخگو در ۴ مطالعه موردی را باهم مقایسه کرده است. از شکل ۱۳ مشاهده می‌شود که دستگاه کنترل شده ساعت ۲۴ را برای مصرف انرژی انتخاب کرده است که بهترین زمان از نظر قیمت است تا میزان هزینه خرید انرژی هاب انرژی کمتر شود. علاوه براین، میزان مصرف انرژی لوازم خانگی پاسخگو کاهش یافته که ناشی از اعمال برنامه پاسخگویی بار است که درنهایت منجر به کاهش هزینه هاب انرژی در حالت درنظر گرفتن برنامه پاسخگویی بار و مدیریت هوشمند شارژ و دشارژ ذخیره ساز حرارتی بطور همزمان شده است.

۴- نتیجه گیری

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-12]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1398.8.3.2.7]
[DOI: 10.29252/ieijqp.8.3.1]

حضور حامل‌های مختلف انرژی و هم چنین ظهور فناوری‌های تولید هم زمان جدید مانند CHP در مجتمع مسکونی مستلزم طراحی یک مدل یک پارچه برای بهره‌برداری از این سیستم چند حاملی انرژی است. مدل هاب انرژی‌های مسکونی در این مقاله برای نشان دادن بهره‌برداری خانه چند حاملی انرژی ارائه شده است. در زیرساخت یکپارچه پیشنهادی برای حامل های انرژی، HLM می‌تواند به بهره-برداری کامل از هاب انرژی‌های مسکونی انجام شود. یک مسئله پیشنهاد شده برای بهینه‌سازی در این مقاله، بهره‌برداری از نمونه خانه-های هوشمند است. به عنوان مثال، خروجی هاب تقاضاهای الکتریکی و حرارتی در نظر گرفته در مورد اول این مطالعه می‌باشد. نتایج بهینه-سازی نشان می‌دهد که در ساعت‌های کم تعرفه، مصرف برق به طور مستقیم از شبکه‌ی برق تامین می‌شود. با این حال، در ساعات میانی و تعرفه‌ی بالا، بخشی از مصرف برق توسط CHP ارائه شده است. در نتیجه، جریان گاز طبیعی به CHP در این ساعت افزایش یافته است. همانطور که انتظار می‌رود PHEV در ساعت تعرفه‌های پایین شارژ و دشارژ در مواردی که تعرفه بالا برای کاهش هزینه‌های تامین تقاضای برق است، می‌باشد. در مورد استفاده از HLM خواسته‌های الکتریکی به ساعت تعرفه پایین تغییر جهت می‌دهد. اگر چه کاهش هزینه پرداخت مشتری با استفاده از HLM می‌باشد، این امر منجر به یک پیک بالاتر در دریافت توان در مقایسه با حالت بدون HLM می‌باشد. مطرح کردن موضوع اوج افزایش در مورد استفاده از HLM در حالت حاظر توسط نویسندگان نادیده گرفته شده است. علاوه‌براین، عدم قطعیت در ارتباط با رفتارهای مشتری می تواند در نتایج HLM تاثیرگذار باشد. این موضوع به عنوان یک منطق تحقیق جالب برای کار آینده ارائه شده است.

مراجع

[1] M.W. Tian, A.G. Ebadi, K. Jermsittiparsert, M. Kadyrov, A. Ponomarev, N. Javanshir, S. Nojavan, "Risk-based stochastic scheduling of energy hub system in the presence of heating network and thermal energy management", Applied Thermal Engineering, vol. 159, pp.113825, 2019.

[2] Y. Cao, Q. Wang, J. Du, S. Nojavan, K. Jermsittiparsert, N. Ghadimi, "Optimal operation of CCHP and renewable generation-based energy hub considering environmental perspective: An epsilon constraint and fuzzy methods", Sustainable Energy, Grids and Networks, vol. 20, pp. 100274, 2019.

[3] S.M. Moghaddas-Tafreshi, M. Jafari, S. Mohseni, S. Kelly, "Optimal operation of an energy hub considering the uncertainty associated with the power consumption of plug-in hybrid electric vehicles using information gap decision theory", International Journal of Electrical Power & Energy Systems, vol. 112, pp. 92-108, 2019.

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

[5] B.C. Erdener, K.A. Pambour, R.B. Lavin, B. Dengiz, "An integrated simulationmodel for analysing electricity and gas systems", International Journal of Electrical Power & Energy Systems. vol. 54, pp. 26–37, 2014.

[6] V. Davatgaran, M. Saniei, S.S. Mortazavi, "Optimal bidding strategy for an energy hub in energy market", Energy, vol. 148, pp. 482-493, 2018.

[7] M. Mohammadi, Y. Noorollahi, B. Mohammadi-ivatloo, M. Hosseinzadeh, H. Yousefi, S.T. Khorasani, "Optimal management of energy hubs and smart energy hubs–a review", Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 89. Pp. 33-50, 2018.

[8] M. Geidl, G. Koeppel, P. Favre-Perrod, B. Klockl, G. Andersson, K. Frohlich, "Energy hubs for the future", IEEE power and energy magazine, vol. 5(1), pp. 24-30, 2006.

[9] F. Brahman, M. Honarmand, S. Jadid, "Optimal electrical and thermal energy management of a residential energy hub, integrating demand response and energy storage system", Energy and Buildings, vol. 90, pp. 65-75, 2015.

[10] Y. Chen, W. Wei, F. Liu, Q. Wu, S. Mei, "Analyzing and validating the economic efficiency of managing a cluster of energy hubs in multi-carrier energy systems", Applied Energy, vol. 230, pp. 403-416, 2018.

[11] M. Geidl, G. Andersson, "Optimal power flow of multiple energy carriers", IEEE Transactions on power systems, vol. 22(1), pp. 145-155, 2007.

[12] C. Unsihuay-Vila, J.W. Marangon-Lima, A.Z. De Souza, I.J. Perez-Arriaga, P.P. Balestrassi, "A model to long-term, multiarea, multistage, and integrated expansion planning of electricity and natural gas systems', IEEE Transactions on Power Systems, vol. 25(2), pp. 1154-1168, 2010.

[13] M. Moeini-Aghtaie, P. Dehghanian, M. Fotuhi-Firuzabad, A. Abbaspour, "Mul-tiagent genetic algorithm: an online probabilistic view on economic dispatchof energy hubs constrained by wind availability", IEEE Transactions on Sustainable Energy, vol. 5, pp. 699–708, 2013.

[14] A. Parisio, C.D. Vecchio, A. Vaccaro, "A robust optimization approach to energyhub management", International Journal of Electrical Power & Energy Systems, vol. 42, pp. 98–104, 2012.

[15] E. Fabrizio, V. Corrado, M. Filippi, "A model to design and optimize multi-energysystems in buildings at the design concept stage", Renewable Energy, vol. 35, pp. 644–655, 2010.

[16] M.C. Bozchalui, S.A. Hashmi, H. Hassen, C.A. Canizares, K. Bhattacharya, "Optimal operation of residential energy hubs in smart grids", IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 3(4), pp. 1755-1766, 2012.

[17] S. Shafiee, M. Fotuhi-Firuzabad, M. Rastegar, "Investigating the impacts of plug-in hybrid electric vehicles on power distribution systems", IEEE Transactions on SmartGrid, vol. 4, pp. 1351–1360, 2013.

[18] F. Kienzle, P. Ahcin, G. Andersson, "Valuing investments in multienergy conver-sion, storage, and demand-side management systems under uncertainty", IEEE Transactions on Sustainable Energy, vol. 2, pp. 194–202, 2011.

[19] M. Rastegar, M. Fotuhi-Firuzabad, F. Aminifar, "Load commitment in a smart home", Applied Energy, vol. 96, pp. 45–54, 2012.

[20] D. Setlhaolo, X. Xia, J. Zhang, "Optimal scheduling of household appliances fordemand response", Electric Power Systems Research, vol. 116, pp. 24–28, 2014.

[21] P.O. Kriett, M. Salani, "Optimal control of a residential microgrid", Energy, vol. 42, pp. 321–330, 2012.

[22] S. Nojavan, K. Zare, B. Mohammadi-Ivatloo, "Application of fuel cell and electrolyzer as hydrogen energy storage system in energy management of electricity energy retailer in the presence of the renewable energy sources and plug-in electric vehicles",

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

[DOR: 20.1001.1.23222344.1398.8.3.2.7]

[DOI: 10.29252/ieijqp.8.3.1]

Energy Conversion and Management, vol. 136, pp. 404-417, 2017.

[23] A. Najafi-Ghalelou, S. Nojavan, K. Zare, "Heating and power hub models for robust performance of smart building using information gap decision theory", International Journal of Electrical Power & Energy Systems, vol. 98, pp. 23-35, 2018.

[24] S. Nojavan, K. Zare, B. Mohammadi-Ivatloo, "Optimal stochastic energy management of retailer based on selling price determination under smart grid environment in the presence of demand response program", Applied Energy, vol. 187, pp. 449-464, 2017.

[25] M. Rastegar, M. Fotuhi-Firuzabad, M. Lehtonen, "Home load management in a residential energy hub", Electric Power Systems Research, vol. 119, pp. 322-328, 2015.

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

[DOR: 20.1001.1.23222344.1398.8.3.2.7]

[DOI: 10.29252/ieijqp.8.3.1]