مدل بهینه ظرفیت‌سازی و بهره‌برداری از سیستم Micro CHP در ساختمان های مسکونی

فاطمه تیموری حمزه کلایی[۱و*]، سورنا ستاری خواص[۲]

تاریخ دریافت مقاله:
۱۳۹۰/۲/۱۰
تاریخ پذیرش مقاله:
۱۳۹۰/۴/۱۷

چکیده:

Micro CHP یک سیستم کوچک ترکیب حرارت و برق است. این سیستم گازطبیعی یا انواع دیگری از سوخت‌ها را مصرف کرده و حرارت و برق تولید می‌کند. از آنجایی که مقدار زیادی از انرژی موجود در دنیا برای گرمایش ساختمان‌ها مصرف می‌شود، تولیدات مرکب برق و حرارت می‌توانند ابزاری موثر در جهت رسیدن به بهره‌وری بالا از سوخت و کاهش انتشار دی‌اکسیدکربن باشند. طی روند افزایش پذیرش سیستم‌های Micro CHP خانگی، تولیدکنندگان و مشتریان علاقه‌مندند بدانند که ظرفیت بهینه ژنراتور برق برای این دستگاه چه اندازه می‌باشد و زمانی که این سیستم در یک ساختمان نصب شد از چه استراتژی‌های عملکردی باید استفاده شود تا هزینه‌های تامین برق و حرارت خانوار کمینه شود. در این مقاله یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی با استفاده از نرم‌افزار GAMS توسعه داده‌شده است. هدف این مدل کمینه‌کردن هزینه انرژی سالانه برای ساختمان نمونه‌ای است که، از یک سیستمMicro CHP به همراه یک تانک ذخیره و یک بویلر پشتیبان استفاده می‌کند. مدل، ظرفیت بهینه Micro CHP را به‌گونه‌ای تعیین می‌کند که، نیازهای انرژی خانوار تامین شده و همچنین هزینه انرژی سالانه کمینه شود. علاوه بر این، برای این‌که اثر عوامل کلیدی مانند قیمت گاز و برق، فروش برق به شبکه، تعرفه زمان مصرف و حجم تانک ذخیره بر عملکرد سیستم مشخص شود، تحلیل حساسیت‌هایی نیز صورت گرفته، و مشخص شده است که مقدار بهینه ظرفیت سیستم به هزینه سرمایه‌گذاری اولیه دستگاه، قیمت‌های انرژی و قیمت فروش برق به شبکه حساس است. یک تانک ذخیره بهینه می‌تواند زمان کارکرد دستگاهMicro CHP را افزایش دهد. علاوه بر این یک تعرفه زمان مصرف درصد صرفه‌جویی انرژی را به میزان قابل توجهی افزایش می‌دهد.

کلمات کلیدی:
Micro CHP، مدل بهینه ظرفیت‌سازی، افزایش بهره‌وری سوخت، کاهش انتشار دی‌اکسیدکربن، تحلیل حساسیت

۱) eng.teymoori62@gmail.com
۲) sattari@sharif.ir
* نویسنده مسئول

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-19]

مقدمه

نگرانی‌های مربوط به کاهش منابع فسیلی و آلودگی‌های زیست محیطی سبب توسعه فناوری‌هایی با کارایی بالا برای تامین نیاز-های بشر شده است. تولید همزمان برق و حرارت که به اختصار CHP[1] نامیده می‌شود یک فناوری با راندمان بالا برای تولید برق و انرژی گرمایی از یک منبع سوخت می‌باشد. این به‌معنای مصرف سوخت کمتر، تولید انرژی با هزینه پایین‌تر و در یک روش بسیار سازگارتر با محیط زیست می‌باشد. علاوه بر این سیستم‌های تولید همزمان می‌توانند برقی با کیفیت بالا و قابل اطمینان تولید نمایند. تمام موارد ذکر شده استفاده از CHP ها را جذاب نموده است.اما به‌منظور بهره‌برداری از پتانسیل‌های اقتصادی بالا و صرفه‌جویی انرژی، در سیستم‌های Micro CHP، اندازه سیستم، مخصوصاً ظرفیت محرک اولیه بسیار مهم است.اگر ظرفیت محرک اولیه کمتر از حد لازم برآورد شود، بار مورد نیاز خانوار تامین نشده و اگر بیشتر از حد نیاز تخمین زده شود از فواید اقتصادی و امکان پذیری آن می‌کاهد. از آن جایی که تقاضای برق و حرارت خانوارها دارای نوسانات فصلی و ساعتی می‌باشد، ضروری است که چگونگی عملکرد سالانه دستگاه برای تغییرات تقاضاهای بار تعیین شود. در حقیقت عملکرد سیستم Micro CHP تنها متاثر از تغییرات تقاضای بار نیست، بلکه همچنین قیمت سوخت و سایر سیاست‌های انرژی نیز بر آن تاثیرگذار است. بنابراین، ضروری است مدلی توسعه داده شود که بتوان با استفاده از آن اندازه بهینه سیستم و روش‌های عملکرد سالانه را به‌دست آورد. تا کنون تحقیقات بسیاری در زمینه Micro CHP انجام شده است.در انگلستان نرم‌افزاری در دانشگاه نیوکاسل توسعه داده شد که چگونگی عملکرد Micro CHP با محرک اولیه میکروموتور احتراق داخلی و میکروتوربین گازی و میکروپیلسوختی را برای کمکردن انتشار آلاینده‌ها مدل می‌کرد[۲]. فریدا[2] با استفاده از گازهای متصاعد شده از زیست توده برای سوخت مصرفی پیل سوختی مجموعه‌ای آزمایشگاهی را راه‌اندازی کرد و در سال ۲۰۰۸ نتایج مطالعه و چگونگی کارکرد آن را به چاپ رساند[۷]. دورر و وبر[3] مقدار انرژی و انتشار گازهای گل خانه‌ایی را از کارکرد سیستم‌های مختلف Micro CHP برای تعدادی از انواع خانه‌های مسکونی مورد ارزیابی قرار دادند [۵]. آیو سانت[4]امکان پذیری سیستم Micro CHP را در کانادا با در نظر گرفتن اثرات شرایط محلی بر خصوصیات اقتصادی و زیست محیطی امتحان کرد[۳]. هوینگ[5] ابهامات فنی، اقتصادی و نهادی را در طراحی و عملکرد سیستم‌های Micro CHP با استفاده از یک چارچوب جامع برای تجزیه و تحلیل عدم اطمینان مطرح کرد[۱۰]. احیایی و بهادری امکان پذیری پذیرش میکروتوربین‌های گازی را برای برآورده کردن تمام نیازهای انرژی ساختمان‌های مسکونی ایران مورد مطالعه قرار دادند[۶]. پوسیدنتی[6]امکان پذیری سیستم‌های Micro CHP را در مقایسه با سیستم‌های قدیمی از دیدگاه مزیت‌های انرژی، اقتصادی و زیست محیطی مورد بررسی قرارداده-است[۱۱].

در این مقاله یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی، با استفاده از نرم افزار GAMS نوشته شده است. مدل نوشته شده می‌تواند برای انواع منازل مسکونی و همچنین سیستم‌های Micro CHP با ویژگی‌های مختلف به‌کار گرفته شود. مدل هزینه نهایی انرژی را برای یک سال نمونه با انتخاب ظرفیت بهینه سیستم Micro CHP و تعیین برنامه عملکرد ساعتی آن، کمینه می‌کند.

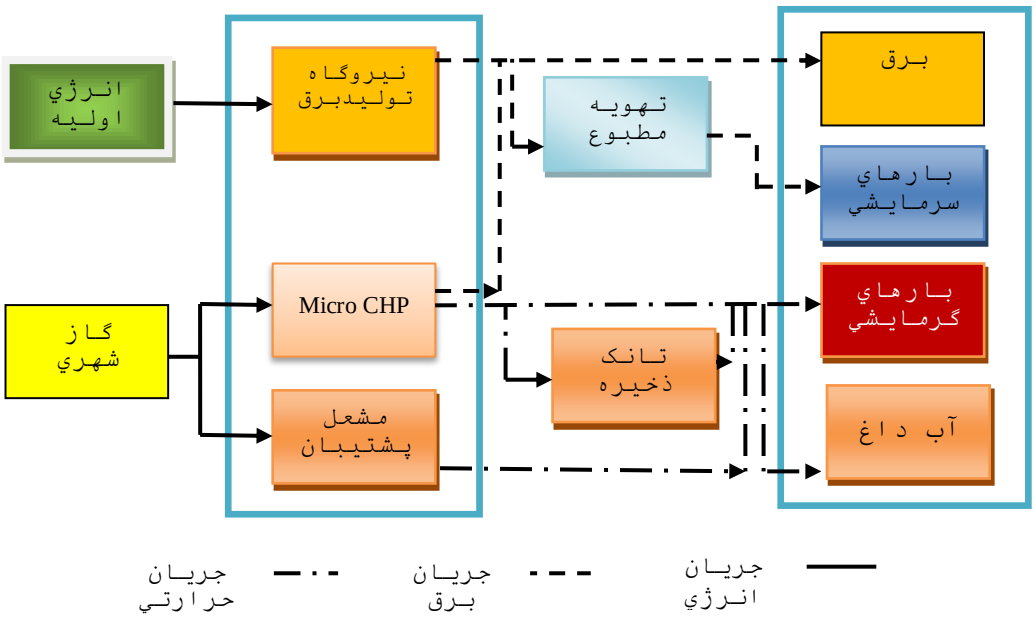
توصیف مدل

این سیستم شامل یک دستگاه Micro CHP، یک تانک ذخیره و یک بویلر پشتیبان می‌باشد. سیستم Micro CHP که با استفاده از گاز طبیعی کار می‌کند، برای تامین تقاضای انرژی خانوار به‌کار رفته و گازهای خروجی دما بالای سیستم برای تأمین

[3]Cogeneration of Heat and Power(CHP)
[4]Fryda
[3]Dorer& Weber
[4]Aussant
[5]Houwing
[6]Possidente

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-19]

بارهای گرمایی، مورد استفاده قرار می‌گیرند. اگر حرارت تولیدی بیشتر از میزان نیاز باشد، حرارت اضافی برای استفاده‌های بعدی در تانک ذخیره، ذخیره خواهد شد و اگر حرارت تولیدی کاملاً نیاز خانوار را تامین ننماید، می‌توان از بویلر کمکی استفاده نمود. به‌طور مشابه، زمانی‌که مقدار برق تولیدی توسط سیستم زیادتر از تقاضای مصرف‌کننده باشد، برق اضافی را می‌توان به شبکه برق تحویل داد. در غیر این صورت کمبود برق توسط خرید برق از شبکه جبران خواهد شد. شکل۱ نقشه سیستم به‌کار رفته در این مدل را نشان می‌دهد.



شکل ۱: ساختار سیستم Micro CHP

تابع هدف

در این مدل هدف کمینه‌کردن هزینه‌ی انرژی سالانه خانوار است. مجموع هزینه‌ها با یکدیگر جمع شده و منفعت حاصل از فروش برق به شبکه از آن کم می‌شود. هزینه‌ها شامل: هزینه خرید برق از شبکه، هزینهسرمایه‌گذاری و کارکرد Micro CHP، هزینه کارکرد و سرمایه‌گذاری بویلر بوده و منفعت اقتصادی سیستم نیز از فروش برق به شبکه حاصل می‌شود. در نهایت تابع هدف از رابطه (۱) به‌دست می‌آید.

$$Min\left\{C_{total}=C_{CON}^{Ele}+C_{run}^{CHP}+C_{run}^{Boiler}+C_{inv}^{CHP}+C_{inv}^{Boiler}-C_{Sell}^{Utility}\right\} \quad (۱)$$

که در روابط بالا C_{total}: مجموع هزینه‌ها، C_{CON}^{Ele}: هزینه خرید برق از شبکه، C_{run}^{CHP}: هزینه کارکرد Micro CHP، C_{run}^{Boiler} : هزینه کارکرد بویلر، C_{inv}^{CHP} : هزینه سرمایه‌گذاری Micro CHP، C_{inv}^{Boiler}: هزینه سرمایه‌گذاری بویلر و $C_{Sell}^{Utility}$: منفعت اقتصادی حاصل از فروش برق به شبکه می‌باشند.

هزینه سرمایه‌گذاری Micro CHP و بویلر کمکی در معادلات (۲) و (۳) شرح داده شده‌اند. هزینه سرمایه‌گذاری اولیه سیستم

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-19]

بهمهزینه سرمایه‌گذاری سالانه تبدیل می‌شود. به این خاطر که هزینه سرمایه گذاری مربوط به تمام طول عمر سیستم است و این مدل به تحلیل هزینه‌های انرژی در یک سال نمونه می‌پردازد، بنابراین باید هزینه سرمایه‌گذاری اولیه را که مربوط به تمام دوره‌ی کارکرد سیستم است به هزینه ثابت سالانه تبدیل نمود.

$$C_{inv}^{CHP} = Cc^{CHP} \times Cp_{rat}^{CHP} \times \left(\frac{I}{1-\left(\frac{1}{(1+I)^{T^{CHP}}}\right)}\right) \quad (۲)$$

$$C_{inv}^{Boiler} = Cc^{Boiler} \times Cp_{rat}^{Boiler} \times \left(\frac{I}{1-\left(\frac{1}{(1+I)^{T^{Boiler}}}\right)}\right) \quad (۳)$$

در رابطه بالا Cp_{rat}^{CHP}: ظرفیت اسمی Micro CHP ، Cp_{rat}^{Boiler}: ظرفیت اسمی بویلر کمکی، Cc^{CHP}: هزینه سرمایه‌گذاری Micro CHP($/kWe)، Cc^{Boiler}: هزینه سرمایه‌گذاری بویلر($/kWt)،I: نرخ بهره و T: طول عمر (سال) می‌باشد.

هزینه عملکرد سالانه Micro CHP و بویلر کمکی در معادلات (۴) و (۵) شرح داده شده‌است. هزینه عملکردی ترکیبی از هزینه سوخت و هزینه تعمیر و نگه‌داری است. هزینه سوخت به صورت مجموع هزینه‌های مربوط به مقدار مصرف سوخت برای هر دوره از عملکرد Micro CHP یا بویلر ضرب در قیمت سوخت محاسبه می‌شود. هزینه‌های تعمیر و نگه‌داری سالانه نیز به‌صورت مجموع برق تولیدی سیستم یا مجموع انرژی حرارتی ضرب در یک ضریب هزینه واحد محاسبه می شود.

$$C_{run}^{CHP} = \sum_{d}\sum_{h} E_{d,h}^{CHP} \times \left(\frac{P_{Gas}}{\alpha_{d,h} \times HR} + c_{run}^{CHP}\right) \quad (۴)$$

$$C_{run}^{Boiler} = \sum_{d}\sum_{h} H_{d,h}^{Boiler} \times \left(\frac{P_{Gas}}{\eta \times HR} + c_{run}^{Boiler}\right) \quad (۵)$$

در روابط بالا d: روزهای یک سال،h: ساعات یک روز، p: قیمت انرژی ($/kWh یا $/m^3)، C_{run}^{CHP}: ضریب هزینه تعمیر و نگه‌داری سالانه Micro CHP، C_{run}^{Boiler}: ضریب هزینه تعمیر و نگه‌داری سالانه بویلر $E_{d,h}^{CHP}$: برق تولید شده توسط Micro CHPدر روز و ساعت مورد نظر، $H_{d,h}^{Boiler}$: حرارت تولید شده توسط بویلر در روز و ساعت مورد نظر، HR : نسبت حرارتی (kWh/m^3)، η: راندمای بویلر و α: راندمان الکتریکی Micro CHP است.

در این تحلیل، فرض شده است که راندمان بویلر کمکی و راندمان الکتریکی Micro CHP و نسبت حرارت به برق(θ) ثابت باشد. بنابراین راندمان حرارتی Micro CHP از طریق رابطه (۶) محاسبه خواهد شد.مجموع هزینه‌ها برای خرید برق نیز توسط معادله (۷) و به‌صورت حاصل‌ضرب مقدار برق خریداری شده از شبکه($E_{d,h}^{Utility}$) در قیمت خرید برق محاسبه می‌شود.

$$\beta_{d,h} = \alpha_{d,h} \times \theta \quad (۶)$$

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-19]

$$C_{CON}^{Ele} = \sum_{d}\sum_{h} E_{d,h}^{Utility} \times \mathrm{P}_{\mathrm{r}\ ele} \qquad (۷)$$

درآمد حاصل از فروش برق به شبکه در معادله (۸) شرح داده شده است. این مقدار از حاصلضرب مقدار برق تحویل داده شده به شبکه در قیمت فروش برق به شبکه به‌دست می‌آید.

E_{Sell}^{CHP} : مقداری از برق تولید شده توسط Micro CHP که به شبکه فروخته می‌شود.

$$C_{Sell}^{Utility} = \sum_{d}\sum_{h} E_{d,h,Sell}^{CHP} \times P_{Sell,h} \qquad (۸)$$

محدودیت‌های اصلی

تعادل عرضه و تقاضا باید برای حرارت و برق در هر نقطه از زمان ایجاد شود. در این مدل برای ممانعت از امکان‌ناپذیری‌ها تعادل انرژی به‌کار رفته است. یک نامساوی معمولاً برای نشان دادن تعادل برق به‌کار می‌رود. معادله (۹) این تعادل را نشان می‌دهد، در این معادله بیان می‌شود که مجموع برق تولید شده توسط سیستم Micro CHP و مقدار برق خریداری شده از شبکه یا فروخته شده به شبکه در هر لحظه باید بیشتر یا مساوی مجموع بارهای ساعتی الکتریکی و سرمایشی باشد. و تعادل حرارتی معادله (۱۰) بیان می‌کند که مجموع حرارت تولیدی سیستمMicro CHP و بویلر باید بیشتر یا مساوی بارهای گرمایشی لحظه‌ای باشد.

$$E_{d,h}^{Utility} + E_{d,h,Self}^{CHP} + E_{d,h,Sell}^{CHP} \geq L_{d,h,ele} + \frac{L_{d,h,cooling}}{COP} \qquad \forall d,h \qquad (۹)$$

$$\gamma \times (H_{d,h,dir}^{CHP} + H_{d,h}^{Boiler}) \geq L_{d,h,space} + L_{d,h,water} \qquad \forall d,h \qquad (۱۰)$$

Self: استفاده در ساختمان، Sell: فروش به شبکه،$L_{d,h,ele}$:بار الکتریکی ساعتی و $L_{d,h,cooling}$:بار سرمایشی ساعتی، $L_{d,h,water}$:بار ساعتی مورد نیاز برای گرمایش آب،$L_{d,h,space}$:بار ساعتی مورد نیاز برای گرمایش فضا، COP: ضریب عملکرد تهویه مطبوع و γ: راندمان تجهیزات گرمایشی ساختمان می‌باشند.

خصوصیات عملکردی Micro CHP با استفاده از معادلات (۱۱) و (۱۲) محدود شده است. محدودیت معادله (۱۱) اجازه نمی‌دهد که دستگاه بیشتر از ظرفیت اسمی خود کار کند و معادله (۱۲) مقدار حرارت بازیافتی از سیستم را برای ذخیره در تانک ذخیره محدود می‌کند. علاوه بر این، برای این‌که ظرفیت سیستم کمتر از ظرفیت‌های موجود در بازار نشود معادله (۱۳) نیز نوشته شده است.

$$E_{d,h,Self}^{CHP} + E_{d,h,Sell}^{CHP} \leq Cp_{rat}^{CHP} \qquad (۱۱)$$

$$H_{d,h,in}^{CHP} + H_{d,h,dir}^{CHP} \leq \frac{E_{d,h,Self}^{CHP} + E_{d,h,Sell}^{CHP}}{\alpha_{d,h}} \times \beta_{d,h} \qquad (۱۲)$$

$$Cp_{rat}^{CHP} \geq Cp_{Lim}^{CHP} \qquad (۱۳)$$

در روابط بالا عبارت‌های $H_{d,h,in}^{CHP}$: حرارت تولید شده توسط Micro CHPکه در تانک ذخیره می‌شود، $H_{d,h,dir}^{CHP}$: حرارت تولید شده توسط Micro CHP که در ساختمان استفاده می‌شود، Cp_{Lim}^{CHP}: کمترین ظرفیت تجاری سیستم Micro CHP

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-19]

موجود در بازار را نشان می‌دهند.

خصوصیات عملکردی بویلر پشتیبان با استفاده از معادله (۱۴) مقید شده است. تا از عملکرد بالاتر از ظرفیت اسمی آن جلوگیری شود.

$$H_{d,h}^{Boiler} \le Cp_{rat}^{Boiler} \quad \forall d,h \qquad (۱۴)$$

علاوه بر محدودیت‌های بالا تعدادی از محدودیت‌های اضافی نیز، نیاز است تا از عملکرد صحیح تانک ذخیره اطمینان حاصل نمود. معادله (۱۵) اجازه نمی‌دهد که حرارت ذخیره شده از ظرفیت تانک ذخیره زیادتر شود.

$$H_{d,h,out} \le Cp_{rat}^{\tan k} \qquad (۱۵)$$

$H_{d,h,out}$: انرژی حرارتی تخلیه شده از تانک ذخیره

در این مدل ضریب تلفات انرژی حرارتی تانک ذخیره به دلیل ناچیز بودن در نظر گرفته نشده است. همچنین فرض شده که Micro CHP می‌تواند بین ۰٪ تا ۱۰۰٪ ظرفیت اسمی کارکند. دستگاه ۱۰۰٪ قابل اطمینان است و هزینه‌های سرمایه‌گذاری و عملکردی تانک ذخیره ناچیز می‌باشد.

اطلاعات و مشخصات فنی سیستم Micro CHP به‌کار رفته و همچنین سایر اطلاعات مورد نیاز برای مدل‌سازی در جدول (۱) نشان داده شده است.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-19]

جدول۱: تعدادی از داده‌های مورد نیاز برای مدل‌سازی منبع:[۱۰،۴،۱۲،۱۳]

مشخصات موتور استرلینگ	
هزینه سرمایه‌گذاری (دلار بر کیلووات[1])	۵۰۰۰
هزینه تعمیر و نگه‌داری سالانه (سنت بر کیلووات ساعت[2])	۰.۷-۱.۵
متوسط راندمان الکتریکی و نهایی	η_e = ٪۲۵ η_{total} = ٪۶۰
متوسط طول عمره Micro CHP	۲۰ سال
نسبت حرارت به برق	۲
مینیمم ظرفیت Micro CHPموجود در بازار	۰.۷ کیلووات
سایر اطلاعات مورد نیاز	
متوسط هزینه اولیه بویلر(دیگ، مشعل، هزینه، تجهیزات جانبی و...)[b]	تقریباً برابر با ۱۷۰۰۰۰ ریال بر کیلووات گرمایشی
متوسط طول عمره بویلر	۲۰
متوسط راندمان بویلر	٪۷۰
ضریب عملکرد دستگاه تهویه مطبوع	۴
نرخ تنزیل	۰.۱
۱- یک دلار = ۱۰۰۰۰ ریال ۲- یک سنت = ۰.۰۱ دلار	

مطالعه موردی

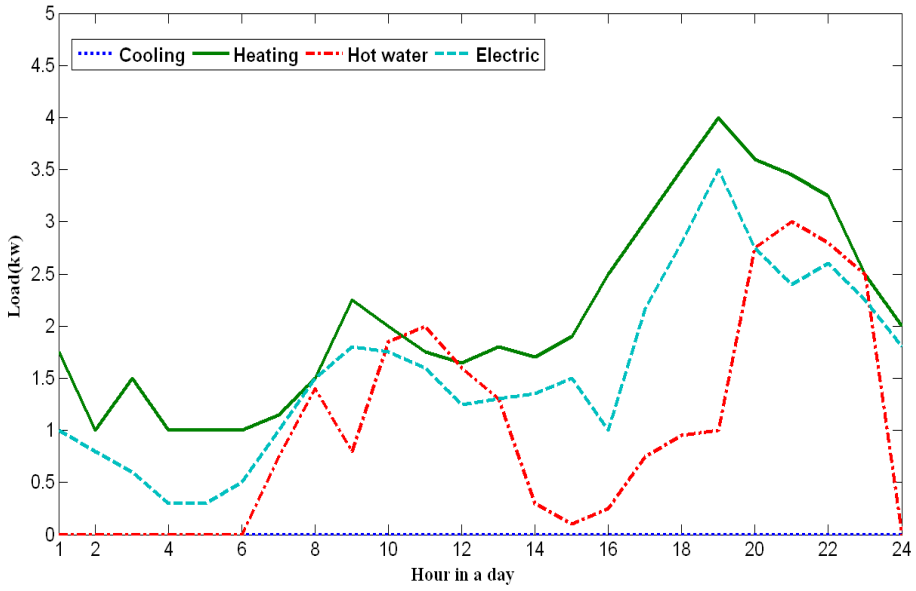
ساختمان انتخاب شده یک ساختمان دو طبقه مسکونی در شهر تهران با مساحت کل ۲۰۰ متر مربع می‌باشد که استفاده از آن در تمام مدت سال به‌صورت دائمی است. این ساختمان از گاز شهری به‌عنوان سوخت ورودی استفاده کرده و سیستم گرمایش آن، سیستم گرمایش مرکزی با استفاده از بویلر و رادیاتور می‌باشد.

بار مصرف کنندگان

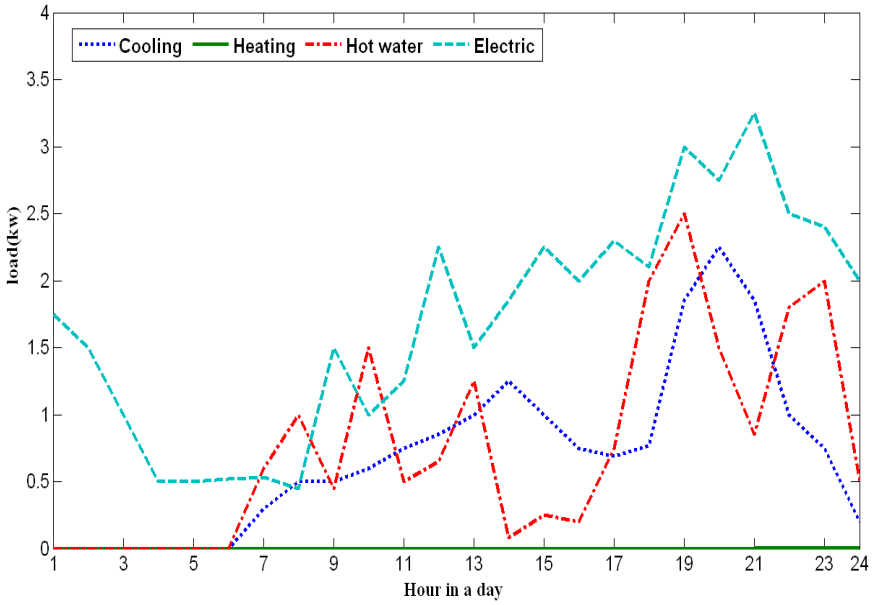
تقاضای انرژی در بخش خانگی می‌تواند به دو بخش تقاضای الکتریکی و تقاضای گرمایشی تقسیم شود، که شامل گرمایش فضا، آب گرم و بارهای سرمایشی است. در این تحقیق از نرم‌افزار کریر[1] برای محاسبه بارهای ساعتی ساختمان مورد مطالعه استفاده شده است و با استفاده از اطلاعات مربوط به مشخصات ساختمان‌ها، بارهای ساعتی برای یک روز نمونه از چهار فصل مختلف سال برای تقاضاهای گرمایش، سرمایش، آب گرم مصرفی و همچنین تقاضای الکتریکی به‌دست آمده است. شکل‌های(۲) و (۳) بار ساعتی مصرف کنندگان را در دو فصل گرمایشی و سرمایشی نشان می‌دهند.

[1]Carrier

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-19]



شکل۲: متوسط بار ساعتی مصرف کنندگان در فصل گرمایشی

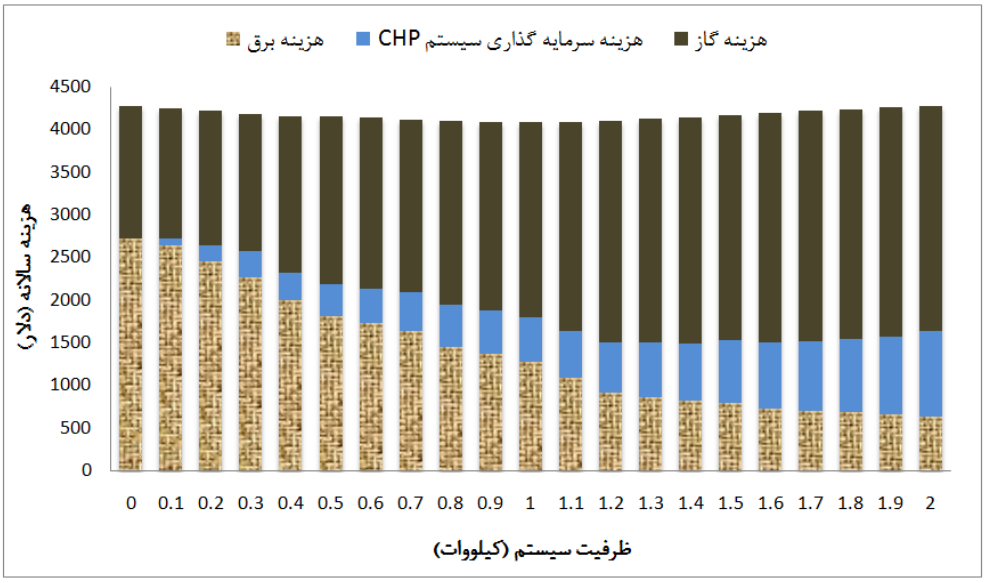


شکل۳: متوسط بار ساعتی مصرف کنندگان در فصل سرمایشی

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-19]

تغییر هزینه سالانه با ظرفیت سیستمMicro CHP

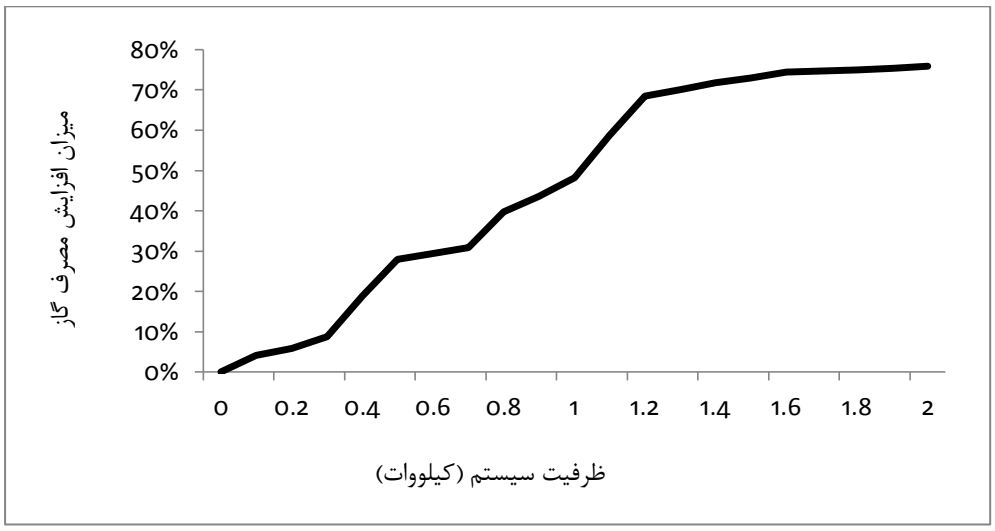
در این بخش ظرفیت اسمی سیستم از ۰ تا ۲ کیلووات تغییر می‌کند. از فروش برق به شبکه چشم پوشی شده است،هزینه سرمایه‌گذاری سالانه سیستم، هزینه سالانه خرید گاز و برق و همچنین مقدار صرفه جویی ایجاده شده در شکل (۴) نشان داده شده است.



شکل٤: هزینه سالانه برق و گاز و سرمایه گذاری سیستم Micro CHP در ظرفیت‌های مختلف

با توجه به این شکل می توان دریافت که هزینه خرید برق از شبکه با افزایش ظرفیت سیستم کاهش می‌یابد. به این خاطر که تولید بیشتری در خود ساختمان انجام می‌گیرد. در مقابل هزینه خرید گاز به‌خاطر افزایش هزینه راه اندازیMicro CHP با افزایش ظرفیت سیستم افزایش یافته است. درصد افزایش مصرف گاز طبیعی نیز در شکل (۵) نشان داده شده است. علاوه بر این، از شکل(۴) می‌توان دریافت که افزایش ظرفیت سیستم همیشه منجر به صرفه‌جویی بالاتر نمی‌شود. زمانی که ظرفیت در حدود ۰.۹ تا ۱ کیلووات است، نسبت صرفه‌جویی هزینه به بالاترین مقدار خود می‌رسد.

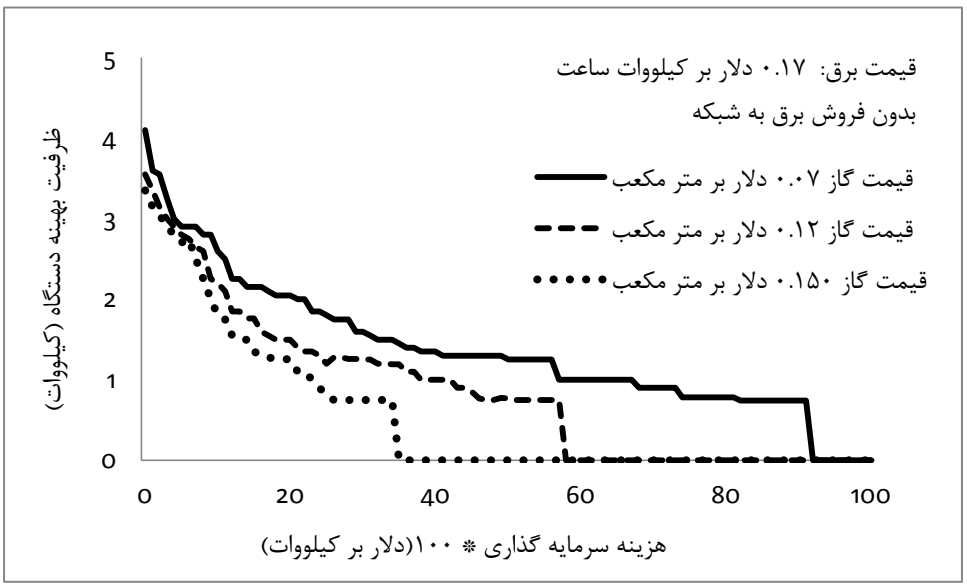
[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-19]



شکل۵: درصد افزایش مصرف گاز طبیعی در اثر استفاده از سیستم‌های Micro CHP

تحلیل حساسیت قیمت گاز

در این بخش حساسیت ظرفیت بهینه سیستم با تغییرات قیمت گاز طبیعی و هزینه سرمایه‌گذاری بررسی شده است. شکل (۶) مقدار ظرفیت بهینه محاسبه شده برای Micro CHP را نشان می‌دهد.



شکل٦: تحلیل حساسیت قیمت گاز طبیعی و هزینه سرمایه‌گذاری

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-19]

در سناریوی قیمت گاز برابر با ۰.۱ دلار بر متر مکعب استفاده از این سیستم برای حالاتی که هزینه سرمایه‌گذاری کمتر از ۹۲۰۰ دلار بر کیلووات باشد، اقتصادی خواهد بود. با در نظر گرفتن فناوری‌های Micro CHP موجود در بازار انتخاب ظرفیت‌های بین ۱ و ۱.۵ کیلووات، زمانی که هزینه سرمایه‌گذاری سیستم حدوداً بین ۶۸۰۰ تا ۳۵۰۰ دلار باشد مطلوب است. همچنان‌که در تصویر(۶) مشاهده می‌شود، زمانی که هزینه سرمایه‌گذاری به بیش از ۹۲۰۰ دلار می‌رسد ظرفیت نامی بهینه سیستم به سرعت از ۰.۷ به صفر می‌رسد و این به خاطر محدودیت کمترین ظرفیت Micro CHP موجود در بازار است.

شکل (۶) همچنین نشان می‌دهد که ماکسیمم مقدار هزینه سرمایه‌گذاری محاسبه شده برای عملکرد اقتصادی سیستم با قیمت گاز بالاتر، کمتر است. برای مثال با افزایش قیمت گاز از ۰.۱ به ۰.۱۲ دلار بر متر مکعب هزینه سرمایه‌گذاری یک سیستم Micro CHPیک کیلووات از ۶۸۰۰ دلار بر کیلووات تقریباً به ۴۴۰۰ دلار برکیلووات افت نموده است. این تحلیل نشان می‌دهد که کاهش قیمت گاز طبیعی یک روش کارآمد برای گسترش استفاده از سیستم‌های Micro CHP است. بنابراین در صورتی که قیمت گاز طبیعی برای این سیستم‌ها کاهش یابد، از محدوده وسیع‌تری از این محصولات که دارای قیمت‌های اولیه بالاتری باشند می‌توان استفاده نمود.

تحلیل حساسیت قیمت برق

یکی دیگر از مولفه‌های مهم تاثیرگذار بر هزینه نهایی سیستم، قیمت خرید برق از شبکه است. این عامل نیز اثر مهمی بر پذیرش سیستم‌های تولید همزمان برق و حرارت خانگی دارد. بدین علت که اگر قیمت برق نسبتاً پایین باشد، مصرف کننده ترجیح می‌دهد به جای این‌که برق را در محل مصرف تولید کند، آن را از شبکه خریداری نماید. شکل (۷) نتایج امکان سنجی اقتصادی Micro CHP را با تغییرات قیمت برق نشان می‌دهد.



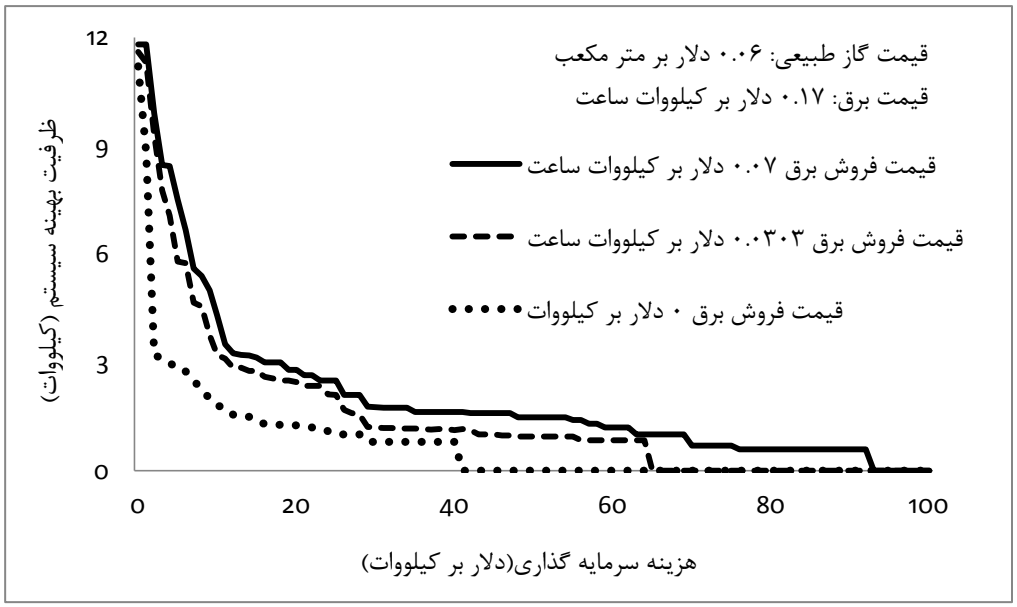
شکل۷: تحلیل حساسیت قیمت برق و هزینه سرمایه‌گذاری

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-19]

از این شکل می‌توان مشاهده نمود که با یک هزینه سرمایه‌گذاری مشخص منفعت نصب سیستم‌های Micro CHP با افزایش قیمت برق افزایش می‌یابد. از طرف دیگر زمانی که هزینه سرمایه‌گذاری سیستم با یک قیمت برق معین پایین‌تر باشد، مقدار بهینه ظرفیت اسمی سیستم نیز افزایش می‌یابد. برای مثال با یک سیستم Micro CHP ۱ کیلووات که معمول‌ترین نوع سیستم‌های Micro CHP موجود در بازار می‌باشد، زمانی که قیمت برق ۰.۱۲ دلار بر کیلووات ساعت است، با هزینه سرمایه‌گذاری کمتر از ۲۴۰۰۰ دلار سیستم هیچ‌گونه منفعت اقتصادی را نشان نمی‌دهد. به هر حال، با یک قیمت برق ۰.۱۸ دلار بر کیلووات ساعت ماکسیمم هزینه خرید سیستم با ظرفیت الکتریکی یک کیلووات تا ۶۶۰۰۰ دلار بر کیلووات افزایش می‌یابد.

تحلیل حساسیت قیمت فروش برق به شبکه

یک سیاست محرک برای نفوذ و گسترش سیستم‌های Micro CHP ، فروش برق به شبکه می‌باشد که در بسیاری از کشورها امکان پذیر است. شکل (۸) ظرفیت بهینه سیستم Micro CHP را برای قیمت‌های فروش برق به شبکه ۰ و ۰.۰۳۰۳ و ۰.۰۷ دلار بر کیلووات ساعت نشان می‌دهد.



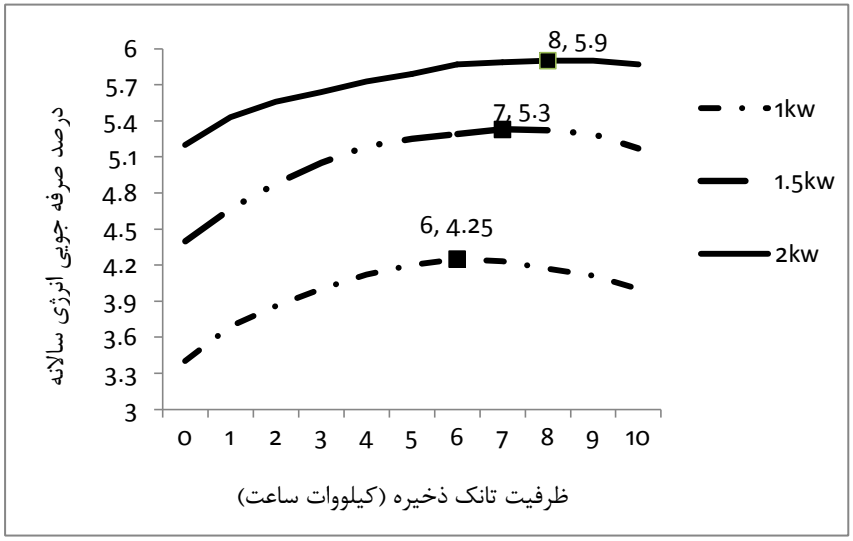
شکل۸: تحلیل حساسیت قیمت فروش برق به شبکه و هزینه سرمایه‌گذاری

برای یک هزینه سرمایه‌گذاری ثابت، با افزایش قیمت فروش برق به شبکه ظرفیت بهینه سیستم افزایش می‌یابد. علاوه بر این، می‌توان دریافت که حتی اگر قیمت فروش برق به شبکه صفر باشد، تحویل برق به شبکه سبب افزایش ظرفیت سیستم می‌شود. به این خاطر که تحویل برق به شبکه سبب افزایش تولید محلی شده، و راندمان نهایی بالا، می‌تواند هزینه تحویل برق رایگان به شبکه را جبران نماید. علاوه براین، زمانی که هزینه سرمایه‌گذاری به اندازه‌ای پایین باشد که قابل قیاس با بویلرهای گازی معمول باشد، ظرفیت بهینه سیستم با کاهش هزینه سرمایه‌گذاری، افزایش شدیدی خواهد داشت. در این حالت، سیستمMicro CHP تمام بارهای گرمایشی را تامین کرده و نیاز به هیچ بویلر کمکی نیز نخواهد بود.

ظرفیت بهینه تانک ذخیره از لحاظ اقتصادی

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-19]

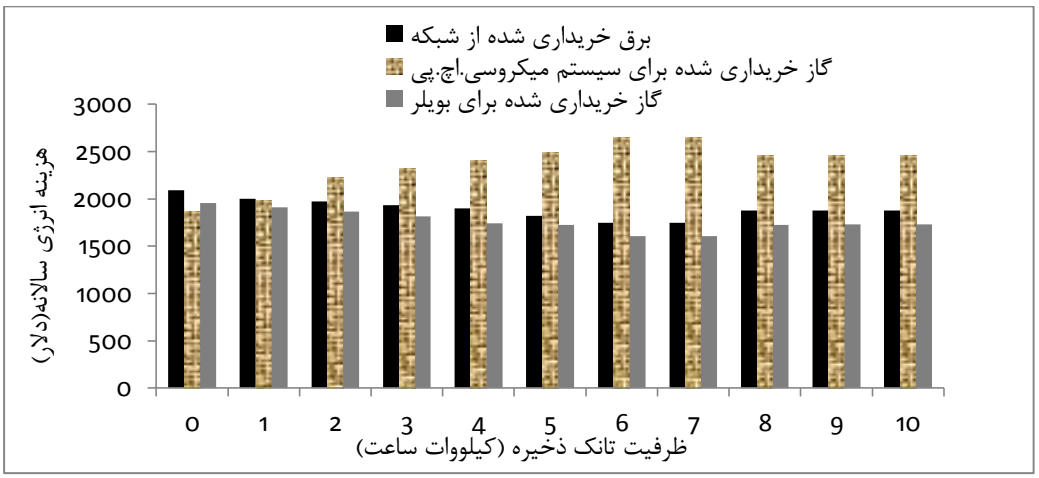
اندازه تانک ذخیره بر توجیه‌پذیری اقتصادی سیستم Micro CHP تاثیر گذار است. یک تانک ذخیره بزرگ، ذخیره‌سازی بیشتری را امکان‌پذیر می‌سازد. در حالی‌که یک تانک ذخیره کوچک‌تر تلفات حرارتی کمتری دارد. شکل (۹) نسبت صرفه‌جویی انرژی سالانه را برای ظرفیت‌های مختلف تانک ذخیره نشان می‌دهد.



شکل۹: اثر ظرفیت تانک ذخیره بر مقدار صرفه‌جویی در هزینه سالانه

از این شکل می‌توان دریافت که هر سناریویی ظرفیت تانک بهینه خود را دارد از ۶ کیلووات برای دستگاه تولید همزمان ۱ کیلوواتی گرفته تا ۸ کیلووات برای سیستم تولید همزمان ۲ کیلوواتی. واضح است که یک سیستم تولید همزمان بزرگتر به‌خاطر حرارت بازیافتی بیشتر به تانک ذخیره بزرگتری نیاز دارد.با یک تانک ذخیره، Micro CHP می‌تواند حرارت اضافی را ذخیره نماید. این امر موجب می‌شود که سیستم پیوسته‌تر عمل کرده و زمان عملکرد آن افزایش یابد. با توجه به زمان عملکرد، هزینه گاز طبیعی نیز برای سیستم Micro CHP با روندی مشابه افزایش می یابد. در مقابل، هزینه برق شبکه و گاز طبیعی برای بویلر کمکی کاهش می‌یابد. شکل (۱۰) اثر ظرفیت تانک ذخیره را بر هزینه انرژی سالانه یک سیستم Micro CHP ۱.۵کیلوواتی نشان می‌دهد.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-19]



شکل ۱۰: اثر ظرفیت تانک ذخیره بر هزینه انرژی سالانه با استفاده از یک سیستم Micro CHP ۱.۵ کیلوواتی

زمانی که ظرفیت تانک ذخیره ۷ کیلووات است، هزینه برق شبکه و گاز طبیعی برای بویلر کمکی کمترین مقدار را خواهند داشت که در این حالت ظرفیت بهینه Micro CHP از دیدگاه اقتصادی ۱.۵ کیلووات است.

اثر ساختار تعرفه برق

تعرفه زمان مصرف(TOU)[1] سبب می‌شود که مصرف برق از ساعات اوج به ساعات غیر اوج انتقال پیدا کند. با یک تعرفه زمان مصرف، کارکرد دستگاه تولید همزمان باید بر طبق نوسانات قیمت برق بهینه شود.

در این بخش اثر تعرفه برق بر درصد صرفه‌جویی در هزینه‌های انرژی سالانه نسبت به حالت یکنواخت (قیمت برق ثابت برای تمام ۲۴ ساعت شبانه روز) بررسی شده و نتایج در جدول (۲) نشان داده شده است. با توجه به این جدول می‌توان دریافت که تعرفه زمان مصرف همیشه منجر به نسبت صرفه‌جویی بالاتری می‌شود.

[1] Time Of Use(TOU)

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-19]

جدول ۲: درصد صرفه‌جویی انرژی برای تعرفه‌های مختلف

نوع تعرفه	قیمت خرید برق(دلار بر کیلووات ساعت)			درصد صرفه جویی در هزینه‌های انرژی سالانه		
	اوج مصرف (پیک برق)	مصرف عادی (پیک متوسط)	مصرف کم (بدون پیک)	۱kw	۱.۵kw	۲kw
زمان مصرف	۰.۲۲۰	۰.۱۷	۰.۰۸	۷.۷	۱۰.۹	۱۲.۳
یکنواخت	۰.۱۷			۴.۱	۵.۲	۵.۸

نتیجه‌گیری

در این مقاله مدلی توسعه داده شد که با استفاده از آن اندازه‌بهینه سیستم و روش‌های عملکردی سالانه تعیین شده است. این مدل می‌تواند برای انواع منازل مسکونی و همچنین سیستم‌های Micro CHP با ویژگی‌های مختلف به‌کار گرفته شود. در این مدل، هزینه‌های انرژی برای یک سال نمونه و ظرفیت بهینه سیستم Micro CHP در چند حالت تعیین شده است. بر طبق بررسی‌های انجام شده نتایج زیر استنباط شده است:

تحت شرایط خاص، با در نظر گرفتن کمترین هزینه سالانه برای سیستم‌های Micro CHP هر پروژه ظرفیت بهینه خود را داراست.مقدار ظرفیت بهینه سیستم به هزینه سرمایه‌گذاری اولیه دستگاه، قیمت‌های انرژی و همچنین قیمت فروش برق به شبکه حساس است.یک تانک ذخیره با ظرفیت بهینه می‌تواند زمان کارکرد Micro CHP را افزایش دهد، اما، یک تانک با اندازه بسیار بزرگ از فواید اقتصادی آن می‌کاهد، زیرا تلفات انرژی را افزایش می‌دهد.یک تعرفه زمان مصرف درصد صرفه‌جویی انرژی را به میزان قابل توجهی افزایش می‌دهد.البته،ظرفیت بهینه، اولین مرحله برای نفوذ و گسترش سیستم‌های Micro CHP می‌باشد. در مطالعات بعدی باید توجهات بر روش‌های عملکردی بهینه سیستم، اثرات اقتصادی و زیست محیطی متناظر متمرکز شود.

منابع

[۱] ستاری، سورنا. لطفی، رقیه. حوری جعفری،حامد.(۱۳۸۸) ممیزی انرژی در سیستم‌های ساختمانی، انتشارات هزاره سوم.

[2] Ameli S.M. AgnewB. Potts I. 2007. Integrateddistributed energy evaluation software (IDEAS) simulation of micro- turbine base CHP system, Applied Thermal Engineering, Vol27, pp 2161-2165.

[3] Aussant C.D. FungA.S. Ugursal V.I. TaherianH. 2009.Residential application ofinternal combustion engine based cogeneration in cold climate—Canada, Energyand Buildings 41 (12) 1288–1298. Design and operation of distributed energy resources: the case of micro-CHP systems, Energy 33 (10).

[4]Central Research Institute of Electric PowerIndustryAvailable

from: <http://criepi.denken.or.jp/jp/index.html>.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-19]

[5]Dorer V. WeberA.2009. Energy and CO2 emissions performance assessment ofresidential microcogeneration systems with dynamic whole-building simulationprograms, Energy Conversion and Management 50 (3) 648–657.

[6] Ehyaei M.A. Bahadori M.N. 2007. Selection of micro turbines to meet electrical and thermal energy needs of residential buildings in Iran, Energy and Buildings 39(12) 1227–1234.

[7] Fryda L. Panoppoulos K.D. KakarasE. 2008. Integrated CHP whit autothermal biomass gasification and SOFC-MGT, Energy Conversion and Management, Vol49pp 281-290.

[8] HawkesA.D. LeachM.A. 2007. Cost-effective operating strategy for residential microcombinedheat and power, Energy 32 (5) 711–723.

[9] Hongbo RN. Weijun GO.Yingjun RAN. 2008. Optimal sizing for residential CHP system.Applied Thermal Engineering 28:514–523.

[10] Houwing M. AjahA.N. Heijnen P.W. Bouwmans I. Herder P.M. 2008.Uncertainties inthe design and operation of distributed energy resources: the case of micro-CHPsystems. Energy 33 (10):1518–1536.

[11] Possidente R. Roselli C. Sasso M. Sibilio S. 2006. Experimental analysis of micro cogeneration units based on reciprocating internal combustion engine, Energyand Buildings 38 (12) 1417–1422.

[12] ProEcoPolyNet Fact Sheet Market analysis micro CHP; June 2010.Available

from: <http://www.berliner-e-agentur.de>

[13] Saibu Gas Co., Ltd; September 2010. Available

from: < http://www.saibugas.co.jp>.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-19]