

ارزیابی عملکرد سیستم‌های ریز تولید پیل سوختی برای ساختمان‌های مسکونی

شیرزاد حسن بگی^۱، سوسن روش ضمیر^{۲*}، حسین قدمیان^۱، محمد حسن ایکانی^۴

۱- تهران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، دانشکده محیط زیست و انرژی

۲- تهران، دانشگاه علم و صنعت ایران، دانشکده مهندسی شیمی

۳- تهران، دانشگاه علم و صنعت ایران، پژوهشکده سبز، آزمایشگاه پیل سوختی

۴- تهران، سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران، پژوهشکده فناوری‌های شیمیایی

پیام نگار: rowshanzamir@iust.ac.ir

چکیده

فناوری‌های سیستم‌های ریز تولید پیل سوختی سیستم‌های مدولار تولید توان کوچکی هستند که در آینده نزدیک قابل رقابت با روش‌های متداول تأمین انرژی خواهند بود. سیستم‌های ریز تولید پیل سوختی از نظر عملکرد فنی و زیست‌محیطی دارای برتری قابل توجهی نسبت به دیگر روش‌های متداول تأمین انرژی هستند و تنها عیب آن‌ها هزینه بالای اقتصادی می‌باشد. کاربرد اصلی سیستم‌های ریز تولید پیل سوختی در ساختمان‌های مسکونی است. امکان‌پذیری جایگزینی یک سیستم ریز تولید پیل سوختی غشاء تبادل یونی (PEMFC)^۱ برای استفاده در ساختمان مسکونی به وسیله این تحقیق بررسی شده است. در ابتدا روی اجزای سیستم انتخابی، محاسبات تراز جرم و انرژی انجام گرفت. سپس، یک مدل با توجه به جانمایی اتاق‌ها، تعداد اعضاء ساکن در ساختمان و تعداد وسایل الکتریکی و کل مصرف توان الکتریکی یک ساختمان چند واحدی در ایران ارائه گردید. در ادامه با استفاده از نیاز توان الکتریکی و آب گرم مصرفی ساختمان، اندازه سیستم ریز تولید پیل سوختی بهینه‌سازی شده و در نهایت هزینه‌های جاری این سیستم با استفاده از گاز شهری برآورد شده است. نتایج به دست آمده نشان داد که سیستم‌های ریز تولید پیل سوختی دارای بازدهی الکتریکی و حرارتی بالاتر (۷۹٪) و سطح انتشار گاز CO₂ پایین‌تر (۲۳٪ کمتر از سیستم‌های متداول) هستند. همچنین نتایج نشان داد که فناوری پیل سوختی در حال حاضر اقتصادی نیست و نمی‌تواند با فناوری‌های متداول رقابت کند. با وجود این، با تولید انبوه پیل سوختی در آینده نزدیک، کاهش هزینه سرمایه‌گذاری، افزایش طول عمر، ضرورت کاهش آلاینده‌های زیست‌محیطی و افزایش قیمت سوخت‌های فسیلی، فناوری پیل سوختی می‌تواند یک جایگزین مناسب و اقتصادی در مقایسه با فناوری‌های متداول باشد.

کلمات کلیدی: سیستم‌های ریز تولید پیل سوختی، تولید همزمان توان و گرما، پیل سوختی، غشاء تبادل پروتون،

ارزیابی عملکرد

۱- مقدمه

مخرب، نسبت به سایر سیستم‌ها، دارای مقبولیت خاصی هستند و از آنها در بعضی کشورها به صورت تجاری استفاده می‌شود. سیستم‌های ریز تولید همزمان تقریباً ۳۰٪ انرژی ورودی به انرژی

سیستم‌های تولید همزمان به دلیل بازدهی بالا و انتشار کم گازهای

1. Proton Exchange Membrane Fuel Cell

الکتریکی و ۵۰٪ آن به انرژی گرمایی تبدیل می‌شود، دوره بازگشت سرمایه این سیستم‌ها نیز بین ۳ تا ۵ سال است [۱۵].

در میان سیستم‌های ریز تولید، سیستم‌های پیل سوختی PEMFC با توجه به ویژگی‌های خاص آن مورد توجه جدی قرار گرفته و برنامه‌های مطالعاتی و تحقیقاتی زیادی درباره آنها انجام شده که در بعضی کشورها نمونه‌های تجاری آن ساخته و نصب شده‌اند. در سیستم‌های ساکن پیل سوختی با ظرفیت کوچک تا متوسط (۴۰-۵۰٪) انرژی شیمیایی سوخت به انرژی الکتریکی تبدیل خواهد شد (بر اساس کمترین ارزش حرارتی هیدروژن) و مابقی به انرژی حرارتی تبدیل می‌شود که در صورت کاربرد به صورت همزمان بازدهی کلی بالایی حاصل خواهد شد [۷، ۶، ۵].

مطالعاتی که تاکنون بر روی سیستم ریز تولید پیل سوختی PEMFC در سطح بین‌المللی انجام گرفته است، بیشتر بر جنبه‌های طراحی و بهینه‌سازی ابعاد، بهینه‌سازی عملکردی، پیکربندی سیستم، ارزیابی عملکرد و مقایسه سیستم، استوار بوده‌اند [۸].

در سال ۲۰۰۲، لگات^۱ در چارچوب برنامه‌های ارزیابی توسعه فن‌آوری برای کاربردهای ریز تولید مسکونی در هلند، در یک کار تحقیقاتی شاخص نیازهای حرارتی و الکتریکی و الگوها به تفکیک انواع خانه‌ها بر مبنای فن‌آوری نصب شده در آنها را مورد ارزیابی قرار داده است که ۱۲٪ صرفه جویی در انرژی برای سیستم‌های موتور گرمایی و ۲۴٪ صرفه جویی برای سیستم‌های ریز تولید پیل سوختی نتیجه شده است [۹، ۵]. در مطالعه دیگری گوردون^۲ اچ داش^۲ و همکارانش در دانشگاه کارولینای شمالی یک پیل سوختی ۱/۵ کیلو واتی PEMFC را برای کاربرد در خانه‌های تک واحدی با استفاده از نرم افزار شبیه‌سازی ترنسپس^۳ توسعه داده‌اند که در نتیجه صرفه جویی ۴۰٪ در مصرف انرژی اولیه حاصل شده است [۱۰]. یکی از معایب سیستم‌های ریز تولید پیل سوختی هزینه بالای آنها نسبت به سیستم‌های رقیب می‌باشد. طبق تحقیق انجام شده توسط ایگناسیو زابالازا^۴ در کشور اسپانیا در سال ۲۰۰۶ برای کاربرد سیستم ریز تولید پیل سوختی در ساختمان‌های چند واحدی نیاز به کاهش هزینه سیستم پیل سوختی به میزان ۷۵٪ درصد بوده تا بتواند با سیستم‌های رقیب برابری کند [۱۴]. در یک کار

تحقیقاتی دیگر سه نوع سیستم ریز تولید توربین گازی، موتور گرمایی و پیل سوختی برای کاربرد در چهار نوع ساختمان تک واحدی و آپارتمانی در کشور بلژیک از نظر عملکرد و اقتصادی مقایسه شده‌اند. در این مطالعه تحقیقاتی که توسط مایکل دی پپ^۵ و همکارانش در سال ۲۰۰۵ انجام گرفته است، نیازهای الکتریکی و حرارتی ساختمان‌ها به وسیله نرم‌افزار DOE 2.5^۶ شبیه‌سازی دینامیکی شده است و با استفاده از پروفایل‌های به دست آمده سیستم‌های ریز تولید طراحی شده‌اند.

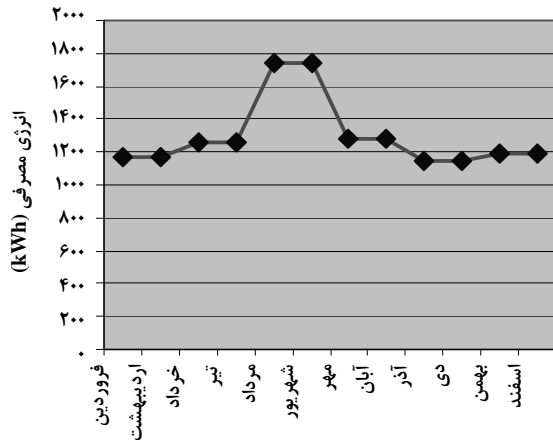
هدف از انجام این تحقیق مقایسه فنی، اقتصادی و زیست محیطی سیستم‌های ریز تولید همزمان بر پایه پیل سوختی با سیستم‌های متداول تأمین انرژی شامل شبکه برق و شبکه گاز سراسری در ساختمان‌های مسکونی در ایران است. برای انجام این تحقیق اطلاعات انرژی و مشخصات تجهیزات مصرف‌کننده و مصارف انرژی سالیانه، انتشارات زیست محیطی و هزینه اقتصادی در یک ساختمان مسکونی چند واحدی محاسبه و تحلیل شده‌اند، سپس مدل سیستم ریز تولید پیل سوختی PEMFC برای کاربرد در ساختمان توسعه داده شده و جریان‌های انرژی، عملکرد فنی، انتشارات زیست محیطی و هزینه‌های اقتصادی سیستم ریز تولید محاسبه گردیده‌اند و در نهایت نتایج فنی، اقتصادی و زیست محیطی سیستم ریز تولید پیل سوختی و سیستم‌های متداول با هم مقایسه شده‌اند. ارزیابی و مقایسه یک سیستم ریز تولید پیل سوختی برای کاربرد در یک ساختمان مسکونی برای اولین بار در سطح کشور انجام گرفته ولی در سطح بین‌المللی تا کنون ارزیابی سه جانبه (فنی، اقتصادی و زیست محیطی) سیستم‌های ریز تولید برای ساختمان مسکونی چند واحدی انجام نشده است. با وجود این، نتایج فنی این تحقیق، برای کشورهای دیگر قابل توسعه خواهد بود، اما نتایج اقتصادی و زیست محیطی فقط برای کشور ایران کاربرد دارد.

۲- ارزیابی فنی

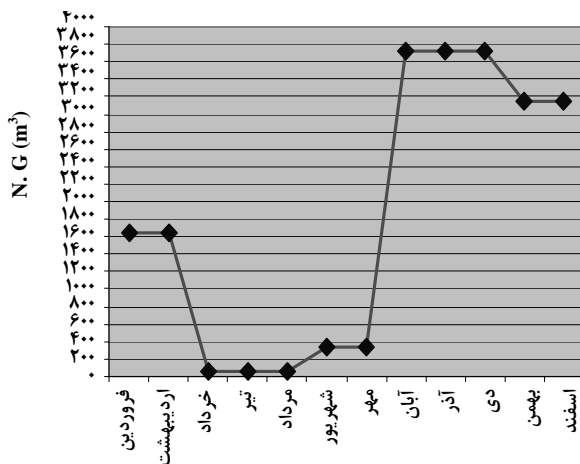
برای این تحقیق، ساختمانی چهار طبقه با زیربنای کل 688 m^2 دارای ۷ واحد مسکونی با زیربنای هر واحد مسکونی 82 m^2 و مجموعاً ۲۵ نفر ساکن در نظر گرفته شده است [۶].

1. Laag et al
2. Gordon H. Dash
3. Trnsys
4. Ignacio Zabalaza

5. Michel De Paep
6. Department of Energy Organization



شکل ۱- پروفایل مصرف انرژی الکتریکی ساختمان (سالیانه)



شکل ۲- پروفایل مصرف گاز طبیعی ساختمان (سالیانه)

ضریب همزمانی هر تاسیسات، عددی است مختص همان تجهیزات در استاندارد ملی ایران شماره ۱۹۳۷ راهنمایی لازم برای تخمین ضرایب همزمانی ارائه شده است [۳ و ۴].
فهرست همزمانی مصرف انرژی الکتریکی یک ساختمان طبق رابطه زیر محاسبه خواهد شد:

$$CF = \frac{SMD}{\sum_{i=1}^n NSMD_i} \quad (1)$$

CF = ضریب همزمانی

SMD = حداکثر توان که به طور همزمان مصرف می‌گردد

NSMD = تک تک توان‌های ماکزیمم مصرف‌کنندگان

1. Coincidence Factor
2. Simultaneous Max. Demand

۱-۲ مصرف انرژی در ساختمان

جنبه‌های مصرف انرژی ساختمان به صورت زیر است:

- ۱- مصرف انرژی الکتریکی برای روشنایی، لوازم خانگی و سیستم‌های خنک‌کننده
 - ۲- مصرف انرژی حرارتی برای گرمایش فضاهای مسکونی و تأمین آب گرم مصرفی
- مشخصات سیستم‌های تأمین انرژی در این ساختمان در جدول (۱) ارائه شده است.

جدول ۱- مشخصات سیستم‌های تأمین انرژی

در ساختمان مسکونی [۶]

ردیف	سیستم انرژی	نوع سیستم	توان کل
۱	تهویه	هواکش	۴۰۰ (W)
۲	لوازم خانگی	انواع لوازم خانگی	۱۱۲ (kW)
۳	روشنایی	لامپ	۶ (kW)
۴	خنک‌کننده	کولر تبخیری	۳/۸۵ (kW)
۵	آب گرم مصرفی	آب گرمکن گازی	—
۶	گرمایشی	بخاری گازی	—

حامل‌های انرژی مورد استفاده در ساختمان، انرژی الکتریکی و گاز طبیعی می‌باشند که انرژی الکتریکی از شبکه سراسری برق و گاز طبیعی از شبکه سراسری گاز حوزه مرکزی ایران تأمین می‌شود. پروفایل مصرف انرژی الکتریکی و حرارتی ساختمان در شکل‌های (۱) و (۲) نشان داده شده است [۱۱].

۲-۲ محاسبه بار الکتریکی ساختمان

بار مصرفی انرژی الکتریکی در یک ساختمان مسکونی به تعداد افراد ساکن، رفتار افراد ساکن (سن، وضعیت اشتغال، فرهنگ و...)، کیفیت زندگی، تجهیزات مورد استفاده، طول عمر تجهیزات، ضرایب همزمانی، آب و هوای منطقه، زیربنای ساختمان، نحوه ساخت ساختمان، طراحی داخلی ساختمان و غیره، بستگی دارد.

انرژی موجود در هیدروژن استفاده نشده در مجموعه پیل سوختی و بازیافت انرژی گاز های احتراق خروجی، مدل جامع سیستم ریز تولید پیل سوختی بر مبنای مجموعه پیل سوختی با ظرفیت اسمی (kW) ۲۰ طراحی گردید، (شکل (۳)).

اجزای سیستم ریز تولید پیل سوختی در این مدل شامل موارد زیر می‌باشند:

- ۱- مجموعه پیل سوختی PEMFC که شامل یک مبدل خنک‌کننده بیرونی و کمپرسور هوا و سیستم رطوبت زنی هوا می‌باشد
- ۲- سیستم ریفرمر متان با بخار که شامل مشعل حرارتی، راکتورهای شیفت دمای بالا و دمای پایین و راکتور اکسایش انتخابی، مبدل‌های خنک‌کننده، مبدل‌های پیش گرمکن سوخت، آب و هوا می‌باشد.
- ۳- مبدل تولید بخار برای سیستم رطوبت زنی
- ۴- مبدل تهویه حرارتی برای تولید هوای گرم
- ۵- مخازن ذخیره آب گرم

۲-۳-۱ مجموعه پیل سوختی

در این پروژه مجموعه پیل سوختی PEMFC با ظرفیت اسمی (kW) ۲۰ با فرضیات زیر در نظر گرفته شده است:

- شرایط سیستم: حالت پایا
- هیدروژن ورودی کاملاً خالص است.
- آب تولیدی در اثر واکنش‌ها بخار می‌باشد.
- کلیه واکنش‌ها در شرایط آدیاباتیک و کامل انجام می‌گیرند.
- خصوصیات فیزیکی پیل‌های مجموعه پیل سوختی مطابق مدل تجربی ۵ کیلو واتی بالارد^۳ در نظر گرفته می‌شوند.
- تلفات حرارتی در مبدل‌ها ناچیز است.
- سوخت ورودی، متان خالص است.

با در نظر گرفتن مشخصات فیزیکی پیل‌ها در مجموعه پیل سوختی و با در نظر گرفتن تعدادی از متغیرها به صورت پیش فرض طبق جدول (۲)، سایر مشخصات و متغیرهای مربوط به جریان‌های جرم و انرژی در مجموعه پیل سوختی با استفاده از موازنه جرم و انرژی و روابط الکتروشیمی طبق جدول (۳) محاسبه شدند [۷].

فهرست تک تک مصرف‌کنندگان انرژی الکتریکی در جدول (۱) داده شده است، لذا:

$$(2) \quad NSMD = 122/25 \text{ (kW)}$$

حداکثر توان مصرفی در سال برابر با ۱۷۴۷ (kWh) در ماه و یا به طور متوسط ۵۸/۲۳ (kWh) در روز بوده است. اگر این مقدار به عنوان حداکثر توان مصرفی تجهیزات در ساختمان در نظر گرفته شود لذا:

$$SMD = 58/23 \text{ (kW)}$$

و در نتیجه ضریب همزمانی برابر است با:

$$CF = \frac{58/23}{122/25} = 0/48$$

اما حداکثر توانی که می‌تواند به طور همزمان در این ساختمان مصرف شود به وسیله تأسیسات کنترلی در ساختمان که یک فیوز ۲۵ آمپر تک فاز است، می‌تواند کنترل شود، لذا SMD واقعی برابر است با:

$$SMD = 25 \text{ (Am)} \times 220 \text{ (V)} \times 0/48 = 388/5 \text{ (kW)}$$

لذا می‌توان حداکثر بار الکتریکی مصرفی ساختمان را به صورت زیر پیش‌بینی کرد:

$$(kW) 18/5 = 0/48 \times 388/5 = \text{حداکثر بار در یک لحظه}$$

با در نظر گرفتن ظرفیت سیستم‌های پیل سوختی تجاری در این پروژه یک سیستم ریز تولید پیل سوختی با ظرفیت (kW) P=۲۰ در نظر گرفته شده است.

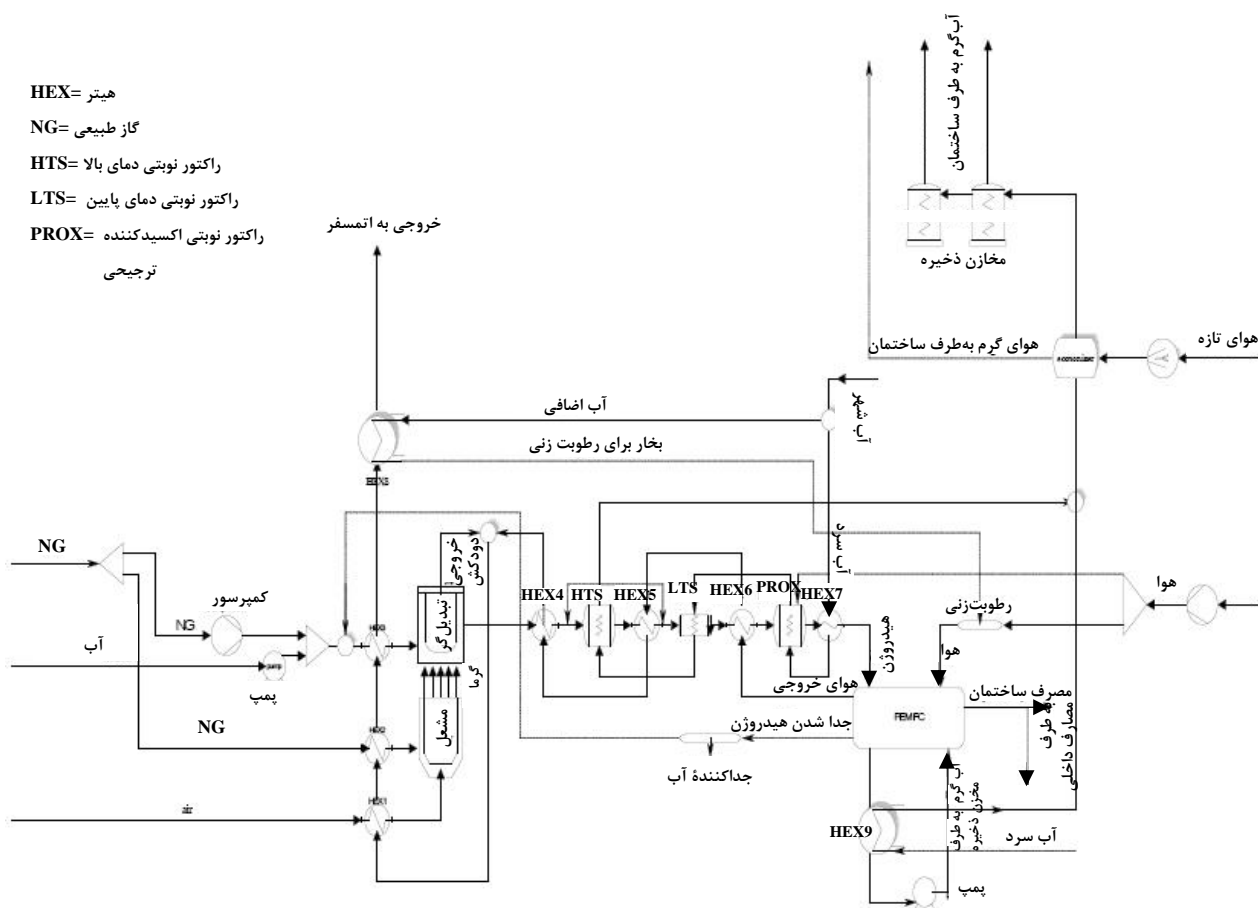
۲-۳-۲ مدل سیستم ریز تولید پیل سوختی PEMFC (گاز

طبیعی /هوا)

بر اساس نیازهای انرژی الکتریکی و گرمایشی سالیانه ساختمان و با توجه به در نظر گرفتن شرایط پایا برای مدلسازی، مدل تعریف شده توسط سازمان IEA^۲ توسعه داده شد و با اضافه کردن مبدل‌های پیش گرمکن، حذف مشعل‌های کمکی و با هدف استفاده از پتانسیل

1. Coincidence Factor
2. International Energy Agency

3. BALLARD MK-V 5(KW)



شکل ۳- طرح اجمالی از سیستم ریز تولید PEMFC و تجهیزات جانبی

جدول ۲- متغیرهای پیش فرض در محاسبات مجموعه پیل سوختی [۲۰]

مقدار	متغیر
۸۰°C	دمای مجموعه پیل سوختی
۳ (atm)	فشار مجموعه پیل سوختی
۲۵ °C	دمای محیط
٪۶۰	رطوبت محیط
۲	نسبت استوکیومتری هوای ورودی
۱/۱۵	نسبت استوکیومتری H ₂ ورودی
۲۲۰ (V)	ولتاژ شبکه برق
HHV= ۴۳(kJ/gr)	ارزش حرارتی H ₂

جدول ۳- نتایج محاسبات مجموعه پیل سوختی

مقدار	متغیر	مقدار	متغیر
۱۶/۱۵ (kW)	توان الکتریکی خالص تولیدی	۰/۷۸ (V)	ولتاژ سلول (پیل)
۳/۸۵ (kW)	توان مصرفی در تجهیزات جانبی	۹۱ (Amp)	جریان
۳۴/۰۵ (kW)	کل توان حرارتی تولیدی	۲۸۲ (cell)	تعداد سلول در مجموعه پیل سوختی
۵/۳ (kW)	تلفات حرارتی	۳۹۲ (mA/cm ²)	چگالی جریان تبدیلی
۱۸/۳ (kW)	گرمای دفع شده توسط سیستم خنک کننده	۰/۱۵۳ (mol/s)	شدت جریان هیدروژن ورودی
۱۰/۵ (kW)	گرمای تبخیر	۰/۶۳۳ (mol/s)	شدت جریان هوای ورودی
۰/۳۷	بازدهی الکتریکی	۰/۱۳۳ (mol/s)	شدت جریان هیدروژن مصرفی
۰/۴۲	بازدهی حرارتی	۰/۰۶۷ (mol/s)	شدت جریان اکسیژن مصرفی
۰/۷۹	بازدهی کلی	۴۳/۷۶ (kW)	کل توان ورودی

۲-۳-۲ سیستم ریفرمر

با توجه به این که سیستم مجموعه پیل سوختی PEMFC به غلظت CO حساس بوده و غلظت بالای ۱۰ ppm باعث مسمومیت آن خواهد شد، برای کاهش غلظت CO واکنش احتراق CO در دمای پایین $^{\circ}\text{C}$ (۱۵۰-۱۰۰) در یک راکتور اکسایش ترجیحی PROX می‌تواند انجام گیرد [۸].

فرایند تبدیل بخار متان در چهار مرحله، همان‌طور که در شکل (۴) نشان داده شده است، انجام می‌گیرد.

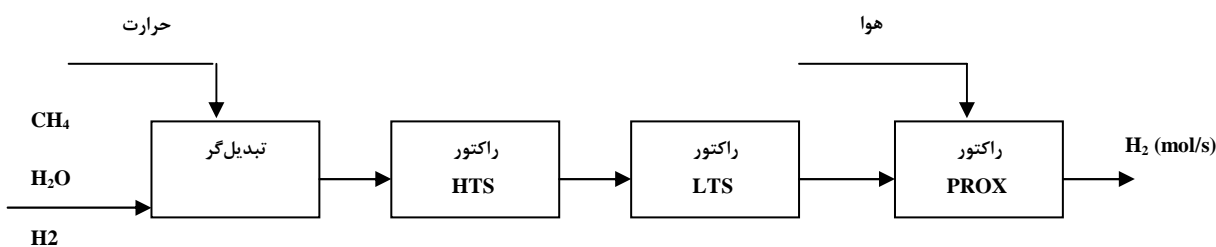
۲-۳-۳ سیستم تهویه حرارتی

در مدل ارائه شده در این پروژه هوای تهویه مورد نیاز برای گرمایش فضاهای مسکونی در فصل زمستان از گرمای حاصل از آب گرم تولیدی در سیستم بازیافت خواهد شد.

در فصل زمستان دمای هوای محیط به طور متوسط $T_{\text{air, inlet}} = 5^{\circ}\text{C}$ با رطوبت نسبی $\text{RH} = 60\%$ در نظر گرفته شده است.

در سیستم فرآوری سوخت (SRM)^۱ در ابتدا متان و آب از یک تبخیرکننده عبور داده می‌شوند که آب بخار شده و تا دمای $^{\circ}\text{C}$ (۷۰۰-۴۵۰) حرارت داده می‌شود. در این مرحله مخلوط آب و سوخت به دو حالت حرارت داده می‌شود، در ابتدا از طریق انتقال حرارت هدایتی از گازهای احتراقی سوخت مشعل و سپس از طریق حرارت تابشی ناشی از یک مشعل سرامیکی با انتشار کم NO_x تا دمای نهایی حرارت داده می‌شود [۶].

در ادامه فرایند برای کاهش غلظت CO محصولات گازی حاصل از واکنش متان و بخار آب از دو راکتور دمای بالا $^{\circ}\text{C}$ (۴۰۰-۳۰۰) و دمای پایین $^{\circ}\text{C}$ (۳۰۰-۲۰۰) که دارای بستر ثابت و پر شده از کاتالیزگر می‌باشند، عبور داده می‌شوند. در این مرحله غلظت CO کاهش یافته و حرارت حاصل از واکنش گرمای CO با بخار آب از طریق یک مبدل داخلی دفع می‌شود [۸].



شکل ۴- مراحل فرایند تبدیل متان [۸]

1. Steam Reformer Methane
2. Preferential Oxidation Shift Reactor

۲-۳-۴ آب گرم مصرفی

بر اساس استاندارد تاسیسات ساختمان امریکا دمای آب گرم مصرفی ساکنان ساختمان باید حداقل برابر $T_{hw}=60^{\circ}\text{C}$ باشد. همچنین بر اساس همین استاندارد مصرف آب گرم به ازای هر نفر بین ۶۰ تا ۱۵۰ لیتر در روز است، که بستگی به تعداد ساکنان، سن و نحوه اقامت در ساختمان و همچنین تعداد وسایل و تجهیزات مصرف‌کننده آب گرم خواهد داشت [۱۶].

در ایران بر طبق آمار ارائه شده مصرف سرانه آب (سرد و گرم) در تهران برابر ۳۰۰ لیتر در روز است که نشان‌دهنده میزان مصرف بالای آب در این شهر است. لذا می‌توان برای اطمینان بیشتر و انجام محاسبات در حالت پایا میانگین حداقل و حداکثر الگوی مصرف را برای آب گرم در نظر گرفت.

$$\dot{m}_{hw,cons} = \frac{150 + 60}{2} = 105 \left(\frac{\text{لیتر}}{\text{نفر، روز}} \right)$$

مصرفی به ازای هر نفر

$$\dot{m}_{hw,cons} = 105 \left(\frac{\text{لیتر}}{\text{نفر، روز}} \right) \times 25 = 2625 \left(\frac{\text{لیتر}}{\text{روز}} \right)$$

گرم مصرفی به ازای ۲۵ نفر

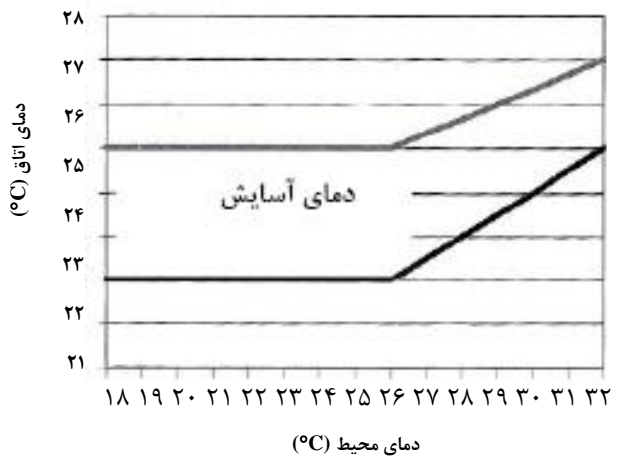
در مدل توسعه یافته به دلیل پتانسیل انرژی حرارتی بالای آب گرم تولیدی در مجموعه پیل سوختی بعد از عبور از سیستم تهویه حرارتی دمای آب گرم تولیدی با شدت جریان جرمی $\left(\frac{\text{لیتر}}{\text{نفر، روز}} \right)$ ۱۹۹ و دمای 60°C وارد مخازن ذخیره آب گرم خواهد شد.

۲-۴ تحلیل پینچ^۲

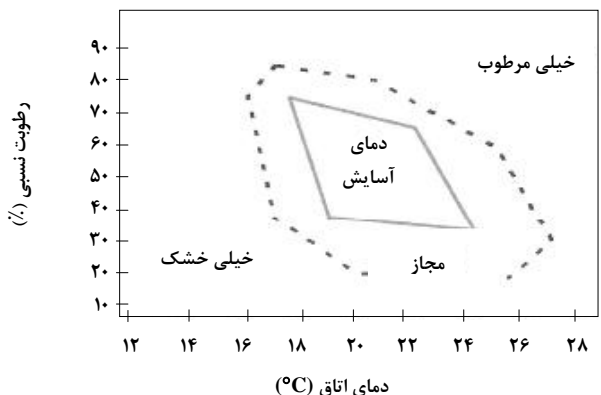
برای ارزیابی وضعیت تبادل حرارت در شبکه تبادلگرهای حرارتی مدل توسعه یافته، تحلیل پینچ انجام گرفت. برای انجام تحلیل پینچ ابتدا مشخصات جریان‌های سرد و گرم در شبکه مبدل‌ها تعیین شد، سپس حداقل اختلاف بین دمای خطوط سرد و گرم ΔT_{min} طوری باید انتخاب شود که سطح مبدل‌ها حداقل و بازیافت حرارت در وضعیت بهینه باشد. هر چه ΔT_{min} بزرگتر باشد، سطح حرارتی مبدل‌ها کوچک‌تر می‌شود و بازیافت حرارت افت خواهد کرد. به طور کلی عموماً ΔT_{min} بین $15-30^{\circ}\text{C}$ مناسب خواهد

بر اساس استانداردهای تأسیسات ساختمان امریکا^۱ دمای آسایش در فضای مسکونی در فصل زمستان $T_{comfort} = 21^{\circ}\text{C}$ است. همچنین بر اساس استاندارد DIN 1946 (شکل (۵))، دمای آسایش بین $22-25^{\circ}\text{C}$ مناسب می‌باشد. لذا در این پروژه دمای هوای گرم خروجی از سیستم بازیافت حرارت با در نظر گرفتن اتلاف حرارتی در کانال‌ها $T_{air,out} = 24^{\circ}\text{C}$ در نظر گرفته می‌شود [۱۶ و ۱۷]. همچنین رطوبت مجاز در دمای آسایش در شکل (۶) قابل محاسبه است.

نرخ تهویه هوای تازه در فصل زمستان به ازای هر نفر ساکن در ساختمان‌های مسکونی برابر $\dot{V} = 15 (cfm)$ است [۱۶].



شکل ۵- نمودار دمای آسایش در ساختمان‌های مسکونی [۱۷]



شکل ۶- رطوبت و دمای آسایش داخل ساختمان [۱۶]

2. Pinch Analysis

1. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers

بود. مشخصات جریان‌های سرد و گرم سیستم طبق جدول (۴) می‌باشند. پس از تعیین مشخصات جریان‌ها با استفاده از نرم افزار Aspen Pinch شبکه مبدل‌ها مورد تحلیل قرار گرفت که نتایج طبق جدول (۵) حاصل گردید و نمودارهای مربوطه نیز طبق شکل‌های (۷) و (۸) ترسیم شدند که تحلیل نتایج نشان می‌دهد که انتگرالسیون حرارتی مدل مناسب است و نیاز به تصحیح شبکه مبدل‌ها نمی‌باشد [۱۸ و ۲].

جدول ۴- مشخصات جریان‌های سرد و گرم

نام تجهیز	جریان	T_{in} (°C)	T_{out} (°C)	\dot{n} (mol/s)	C_p ($\frac{J}{mol.K}$)	$\dot{n} \cdot C_p$ ($\frac{W}{K}$)	ΔH (kW)	نوع سیال
HEX1	سرد	۲۵	۲۰۰	۰/۰۷۴	۲۹/۴	۲/۱۷۵	۰/۳۸۱	هوا
	گرم	۲۸۲	۲۶۹	۰/۸۹۸	۳۲/۲	۲۸/۹۲	-۰/۳۷۶	گاز خروجی
HEX2	سرد	۲۵	۲۰۰	۰/۰۰۶۴	۴۰/۱	۰/۲۵۷	۰/۰۴۵	گاز طبیعی
	گرم	۲۶۹	۲۶۷	۰/۹۸۹	۳۲	۳۱/۶۵	-۰/۰۶۳	گاز خروجی
HEX3	سرد	۲۵	۲۰۰	۰/۲۴	۴۹/۵	۱۱/۹	۲/۰۷۹	گاز طبیعی و بخار آب
	گرم	۲۶۷	۱۹۵	۰/۹۸۹	۳۱/۵	۳۱/۲	-۲/۲۴۳	گاز طبیعی
HEX4	سرد	۱۵۹	۲۷۵	۰/۸۱۷	۳۱/۲۵	۲۵/۵۳	۲/۹۶۱	گاز خروجی پیل سوختی
	گرم	۷۰۰	۳۵۰	۰/۲۴	۳۵/۲	۸/۴۴۸	-۲/۹۵۷	مواد اصلاح شده ^۱
HTS	سرد	۴۱	۷۱	۰/۵۹۸	۷۵/۲	۴۴/۹۶	۱/۳۴۹	آب
	گرم	۵۲۰	۳۵۰	۰/۲۴	۳۳/۸	۸/۱۱۲	-۱/۳۷۹	مواد اصلاح شده
HEX5	سرد	۱۱۱	۱۵۹	۰/۸۱۷	۳۰/۹	۲۵/۲۵	۱/۲۱۱	گاز خروجی پیل سوختی
	گرم	۳۵۰	۲۰۰	۰/۲۴	۳۳/۴	۸/۰۱۶	-۱/۲۰۲	مواد اصلاح شده
LTS	سرد	۲۸	۴۱	۰/۵۹۸	۷۵/۴	۴۵/۱	۰/۵۸۶	آب
	گرم	۲۷۱	۲۰۰	۰/۲۴	۳۲/۵	۷/۸	-۰/۵۵۴	مواد اصلاح شده
HEX6	سرد	۸۰	۱۱۱	۰/۸۱۷	۳۰/۶	۲۵	۰/۷۷۵	گاز خروجی پیل سوختی
	گرم	۲۰۰	۱۰۰	۰/۲۴	۳۲/۴	۷/۷۷۶	-۰/۷۷۷	مواد اصلاح شده
PROX	سرد	۲۴	۲۸	۰/۵۹۸	۷۵/۳	۴۵	۰/۱۸	آب
	گرم	۱۲۳	۱۰۰	۰/۲۴۳	۳۱/۹	۷/۷۵	-۰/۱۷۸	مواد اصلاح شده
HEX7	سرد	۲۰	۲۴	۰/۵۹۸	۷۵/۳	۴۵	۰/۱۸	آب
	گرم	۱۰۰	۸۰	۰/۲۴۳	۳۲/۱	۷/۸	-۰/۱۵۶	مواد اصلاح شده
HEX8	سرد	۲۰	۱۰۰	۰/۱۲	۷۵/۴	۹/۱	۰/۷۲۴	آب
	گرم	۱۹۵	۱۷۲	۰/۸۹۸	۳۱/۵	۲۸/۳	-۰/۶۵۱	گاز خروجی
HEX9	سرد	۲۰	۷۰	۴/۸۶	۷۵/۲	۳۶۵/۵	۱۸/۲۷۴	آب
	گرم	۸۰	۶۰	۵/۸۴	۱۵۶/۶۴	۹۱۴/۷۸	-۱۸/۲۹۶	آب و گلیکول
اکونومایزر ^۲	سرد	۵	۲۴	۷/۴	۲۹/۱۳	۲۱۵/۵۶	۴/۰۹۶	هوا
	گرم	۷۰	۶۰	۵/۴۵۸	۷۵/۴	۴۱۱/۵۳	-۸/۲۳۱	آب گرم

1. Reformater
2. Economizer

۳- تحلیل اقتصادی

در تحلیل اقتصادی سیستم ریز تولید پیل سوختی و سیستم‌های متداول (شبکه سراسری برق و گاز) با در نظر گرفتن سرمایه ثابت اولیه، هزینه سوخت، تعمیر و نگهداری، استهلاک و نرخ بهره، هزینه دوره عمر دو سیستم به وسیله رابطه زیر محاسبه گردیده است [۱۹].

$$LCC = IC + \sum_i \frac{AEU \times C_F}{(1+r)^i} + \sum_i \frac{MC}{(1+r)^i} + \sum_i \frac{AC}{(1+r)^i} \quad (3)$$

IC = هزینه اولیه سیستم

MC = هزینه تعمیر و نگهداری

AC = هزینه سالیانه شامل هزینه متغیر و ثابت سالیانه و سرمایه در

گردش سیستم

AEU = هزینه مصرف انرژی سالیانه

r = نرخ بهره

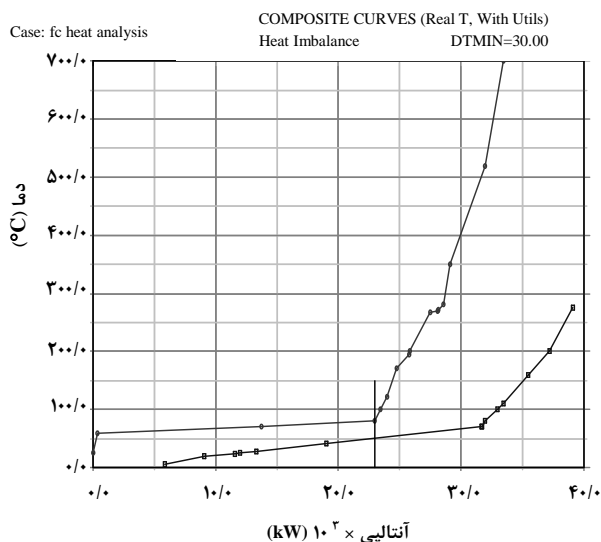
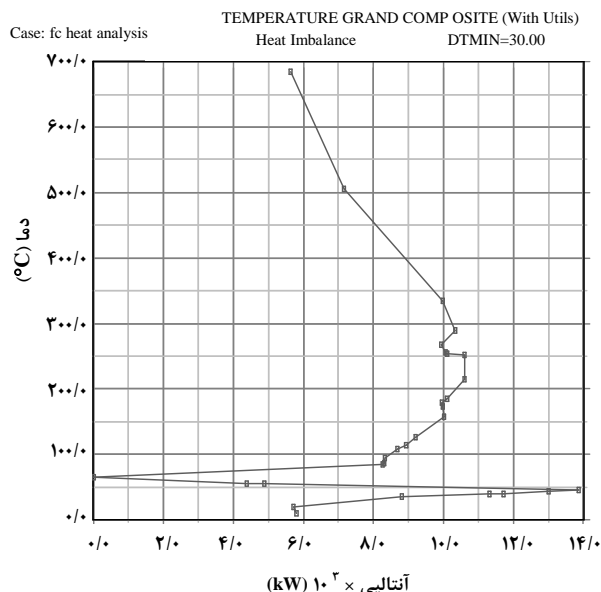
L = طول عمر سیستم

برای محاسبه اقتصادی سیستم ریز تولید پیل سوختی دو بخش سیستم به طور جداگانه مورد بررسی قرار گرفته‌اند. یکی هزینه تجهیزات مجموعه پیل سوختی C_{st} و دیگری هزینه موازنه واحدها (BOP) و سیستم‌های جانبی مربوط به مدیریت حرارت و آب در سیستم است.

بر این اساس هزینه اولیه سیستم ریز تولید پیل سوختی بر اساس رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$IC = C_{st} + C_{BOP} \quad (4)$$

بر اساس تحقیق انجام گرفته در مورد بازار جهانی سیستم‌های تجاری پیل سوختی در سال ۲۰۱۰، هزینه‌های مربوط به سیستم پیل سوختی و موازنه اجزای سیستم به صورت جدول‌های (۶) و (۷) ارائه شده است.



شکل ۷- نمودار ترکیبی جریان‌های سرد و گرم

جدول ۵- نتایج حاصل از تحلیل پینچ توسط

نرم‌افزار Aspen Pinch

۳۰ °C	ΔT min
۶۵ °C	دمای پینچ
۵۰ °C	دمای پینچ سرد
۸۰ °C	دمای پینچ گرم
۵۱۲۱/۹ W	حداقل نیاز بخش گرم
۵۲۸۷/۹ W	حداقل نیاز بخش سرد

جدول ۶- هزینه‌های مربوط به سیستم ریز

تولید پیل سوختی [۱۹]

هزینه	شرح هزینه
$4500 \left(\frac{\$}{kW} \right)$	سرمایه ثابت
$800 \left(\frac{\$}{kW} \right)$	هزینه نصب
$200 \left(\frac{\$}{kW} \right)$	نگهداری و تعمیر مجموعه پیل سوختی
$22/22 \left(\frac{\$}{kW} \right)$	هزینه ثابت
$88/89 \left(\frac{\$}{kW} \right)$	هزینه متغیر

در مدل ارائه شده در این تحقیق علاوه بر سیستم‌های فوق سیستم‌های جانبی دیگری نیز اضافه شده‌اند. این سیستم‌ها شامل ۳ عدد مبدل پیش گرم کن سوخت و هوا، یک مبدل اکتونومایزر برای تأمین هوای گرم، یک مبدل دو لوله‌ای تولید بخار برای رطوبت زنی هوا و ۲ عدد مخزن ذخیره آب گرم می‌باشند.

هزینه مبدل‌های پیش گرم کن سوخت مشعل، آب و هوا و مبدل اکتونومایزر، به وسیله نرم افزار B-JAC محاسبه شده‌اند.

هزینه مخزن ذخیره آب گرم نیز در بازار بین المللی بر اساس مشخصات آن شامل، حجم مخزن، جنس دیواره مخزن و نوع گرم کننده کمکی آب، موجود می‌باشد.

لذا هزینه سیستم‌های جانبی به شرح جدول (۸) محاسبه می‌شوند:

جدول ۸- هزینه مربوط به سیستم‌های جانبی

سیستم ریز تولید پیل سوختی

هزینه	شرح هزینه
$10827 \left(\frac{\$}{kW} \right)$	سرمایه ثابت
$60 \left(\frac{\$}{kW} \right)$	هزینه نصب
$54 \left(\frac{\$}{kW} \right)$	نگهداری و تعمیر
$5/4 \left(\frac{\$}{kW} \right)$	هزینه ثابت
$20/8 \left(\frac{\$}{kW} \right)$	هزینه متغیر

با در نظر گرفتن ضریب عملکرد ۰.۹۵٪ در سال، مدت کارکرد سیستم در یک سال برابر است با:

$$t_{operatin} = 0.95 \times (365 \times 24) (hr) = 8322 (hr)$$

بر اساس روابط فوق و در نظر گرفتن قیمت داخلی ایران (بدون یارانه) برای مصارف حامل‌های انرژی، هزینه طول عمر دو سیستم به شرح زیر محاسبه گردیده است:

IC = هزینه اولیه سیستم برابر است با:

جدول ۷- هزینه‌های مربوط به موازنه اجزای

سیستم ریز تولید پیل سوختی [۱۹]

هزینه	موازنه واحد
$87 \left(\frac{\$}{kW} \right)$	راه اندازی و آزمایش
$1/4 \left(\frac{\$}{kW} \right)$	بازیافت گازهای خروجی
$2/5 \left(\frac{\$}{kW} \right)$	حسگرهای هیدروژن
$2/5 \left(\frac{\$}{kW} \right)$	سیستم کنترل
$3/5 \left(\frac{\$}{kW} \right)$	رطوبت زنی
$4/2 \left(\frac{\$}{kW} \right)$	خنک‌سازی مجموعه پیل سوختی
$5/8 \left(\frac{\$}{kW} \right)$	سیستم سوخت رسانی
$10 \left(\frac{\$}{kW} \right)$	سیستم تأمین هوا
$38/6 \left(\frac{\$}{kW} \right)$	جمع

$$LCC_{\text{current system}} = 30866.3(\$)$$

لذا نسبت هزینه طول عمر دو سیستم برابر است با:

$$\text{Ratio LCC} = \frac{LCC(\text{MCHP})}{LCC(\text{CURRENT})} = \frac{132918.5(\$)}{30866.3(\$)} = 4.3$$

یعنی سیستم ریز تولید پیل سوختی برای کاربرد در یک ساختمان مسکونی چند واحدی در ایران ۴۳۰٪ گرانتر از سیستم‌های متداول (شامل شبکه سراسری برق و گاز و تجهیزات تبدیل) است.

۴- تحلیل زیست محیطی

میزان انتشارات گازهای آلاینده برای سیستم ریز تولید پیل سوختی به وسیله معادلات تراز جرم و انرژی مدل سیستم ریز تولید در شرایط پایا محاسبه گردیده است (جدول ۹)، اما برای سیستم‌های متداول بر اساس میزان مصارف انرژی الکتریکی و حرارتی در ساختمان و استفاده از داده‌های مرجع وزارت نیرو بر حسب مصارف انرژی الکتریکی و گاز طبیعی، محاسبه شده است، (جدول ۱۰)، [۲۰].

جدول ۹- میزان آلاینده‌های زیست محیطی در سیستم

ریز تولید پیل سوختی

نوع آلاینده	کیلوگرم در سال
CO ₂	۳۶۰۰۲
CO	۵۱۲
SO ₂	ناچیز
NO _x	۱۱۷

جدول ۱۰- میزان آلاینده‌های زیست محیطی در سیستم متداول

نوع آلاینده	کیلوگرم در سال
CO ₂	۴۶۶۱۸/۶
CO	۲۹۳۹/۲
SO ₂	۹/۰۵
NO _x	۵۸۷/۹۱۳

$$IC = 4500\left(\frac{\$}{kW}\right) + 800\left(\frac{\$}{kW}\right) + 38.6\left(\frac{\$}{kW}\right) + 1082.7\left(\frac{\$}{kW}\right) + 60\left(\frac{\$}{kW}\right) = 6481\left(\frac{\$}{kW}\right)$$

MC = هزینه تعمیر و نگهداری، برابر است با:

$$MC = 200\left(\frac{\$}{kW}\right) + 54\left(\frac{\$}{kW}\right) = 254\left(\frac{\$}{kW}\right)$$

AC = هزینه سالیانه شامل هزینه متغیر و ثابت سالیانه و سرمایه در گردش سیستم است.

$$AC = 137.3\left(\frac{\$}{kW}\right)$$

AEU = هزینه مصرف انرژی سالیانه که بر اساس مصرف گاز طبیعی در سیستم در شرایط عملیاتی ($\frac{m^3}{\text{annual}}$) ۲۷۱۰۳ محاسبه شده است.

r = نرخ بهره، ۱۰ درصد در نظر گرفته شده است.

L = طول عمر سیستم، ۵ سال در نظر گرفته شده است.

برای ظرفیت اسمی ۲۰ kW در حالت پایا هزینه طول عمر سیستم ریز تولید برابر است با:

$$LCC_{\text{MCHP}} = 6481\left(\frac{\$}{kW}\right) \times 20(kW) + \sum_{l=1}^5 \frac{18701070\left(\frac{\text{Rial}}{\text{year}}\right) \times \frac{1\$}{10000(\text{Rial})}}{(1+0.1)^l} + \sum_{l=1}^5 \frac{137.3\left(\frac{\$}{kW}\right) \times 20(kW)}{(1+0.1)^l} + \sum_{l=1}^5 \frac{254\left(\frac{\$}{kW}\right) \times 20(kW)}{(1+0.1)^l} = 132918.5(\$)$$

مشابه روش فوق هزینه طول عمر سیستم‌های متداول در ساختمان مبنا که شامل مصارف حامل‌های انرژی حرارتی و الکتریکی و تجهیزات مربوطه است، محاسبه شده که هزینه طول عمر این سیستم‌ها برابر است با:

۵- نتیجه گیری

ایران به همراه تجهیزات متداول تبدیل انرژی هستند، در جدول (۱۱) داده شده‌اند.

نتایج ارزیابی فنی، اقتصادی و زیست محیطی سیستم ریز تولید پیل سوختی و سیستم‌های متداول که شبکه سراسری برق و گاز در

جدول ۱۱- نتایج مقایسه سیستم ریز تولید پیل سوختی و سیستم‌های متداول تأمین انرژی در ساختمان مسکونی

سیستم ترجیحی	سیستم ریز تولید پیل سوختی	سیستم متداول	مورد ارزیابی	
سیستم ریز تولید پیل سوختی	٪۳۷	٪۲۱	بازدهی الکتریکی	عملکرد
سیستم ریز تولید پیل سوختی	بازدهی حرارتی ٪۴۲ بازدهی کلی ٪۷۹	٪۷۵	بازدهی حرارتی	
سیستم ریز تولید پیل سوختی	$27103 \frac{m^3}{سال}$	$28647 \frac{m^3}{سال}$	مصرف گاز طبیعی	
سیستم متداول	۳۰۸۶۶/۳ (\$)	۱۳۲۹۱۸/۵ (\$)	LCC	اقتصادی
سیستم ریز تولید پیل سوختی	$36002 \frac{kg}{سال}$	$46619 \frac{kg}{سال}$	CO ₂	زیست- محیطی
سیستم ریز تولید پیل سوختی	$512 \frac{kg}{سال}$	$2939 \frac{kg}{سال}$	CO	
سیستم ریز تولید پیل سوختی	$117 \frac{kg}{سال}$	$588 \frac{kg}{سال}$	NO _x	
سیستم ریز تولید پیل سوختی	ناچیز	$9 \frac{kg}{سال}$	SO ₂	

مراجع

[۴] شرکت توزیع نیروی برق شمال شرق تهران، پژوهشکده

محیط زیست و انرژی " تعیین نرم و محاسبه مصرف واقعی انرژی الکتریکی مشترکین خانگی"، (۱۳۸۶).

[5] Knight, J., Ugursal, I., "Residential Cogeneration Systems: A Review of The Current Technologies", Annex 42 of the International Energy Agency, First published, (2005).

[6] Muth, P., Jonsson, E., Eriksson, J., "House energy reduction project in Tehran", Iranian fuel conservation organization, (2004).

[7] Laurencelle, F., Chahine, R., Hamelin, J., Agbossou, K., Fournier, M., Bose, T. K. and Laperriere, A., "Characterization of a Ballard MK5-E Proton Exchange Membrane Fuel Cell Stack", Fuel cells, 166-71, (2001).

[8] Spiegel, C., "PEM Fuel Cell Modelling and Simulation Using MATLAB", Published, (2008).

[۱] س.روشن ضمیر، م. امیری نژاد، م. ایکانی، "سیستم‌های تولید غیر متمرکز قدرت پیل سوختی برای مصارف خانگی" پژوهشکده سبز، دانشگاه علم و صنعت، همایش بهینه سازی مصرف سوخت در ساختمان، (۱۳۸۳).

[۲] ف. سنندجی، ح. مولوی، " طراحی و بهینه‌سازی فرایندها با Aspen plus, B-Jac, Pinch، انتشارات کاروان حله، پاییز (۱۳۸۳).

[۳] سازمان استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران، استاندارد ملی ۱۹۳۷-۱، " تاسیسات الکتریکی ساختمان‌ها- قسمت ۱: اصول اساسی ارزیابی مشخصه‌های کلی و اصطلاحات و تعاریف"، (۱۳۸۴).

- [9] Doref, R. C., "PEM Fuel cells: Theory and practice", University of California, (2005).
- [10] Dorer, V., "Review of Existing Residential Cogeneration Systems Performance Assessments and Evaluations- A Report of Subtask of FC+COGEN-SIM The Simulation of Building-Integrated Fuel Cell and Other Cogeneration Systems", Annex 42, International Energy Agency Energy Conservation in Buildings and Community Systems Program, First published, (2007).
- [11] Dorer, V., and Weber, A., "Methodologies for the Performance Assessment of Residential Cogeneration Systems- A Report of Subtask of FC+COGEN-SIM The Simulation of Building-Integrated Fuel Cell and Other Cogeneration Systems" Annex 42, International Energy Agency Energy Conservation in Buildings and Community Systems Program, First published, (2007).
- [12] Dash, G. H., "Investigation of a combined heat and power fuel cell system for small scale residential application", North Carolina State University, Thesis Master of Science, (2003).
- [13] Ferguson, A., Ismet Ugursal, V., "Fuel cell modeling for building cogeneration application", J. of Power Sources No. 137, 30-42, (2004).
- [14] Zabalza, I., Aranda, A., Dolores de Gracia, M., "Feasibility analysis of fuel cells for combined heat and power systems in the tertiary sector "Hydrogen Energy Journal, No. 321, 396-1403, (2007).
- [15] Heinzl, A., Vogel, B., Hubner, P., "Reforming of natural gas-hydrogen generation for small scale stationary fuel cell systems", Journal power sources, No.105, 202-207, (2002).
- [16] Standard ANSI/ASHRAE, "Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality", No. 62, (2001).
- [17] Standard DIN 1946-2, "Ventilation and air conditioning; technical health requirements (VDI ventilation rules), (1994).
- [18] Panjeshahi, M. H., "Pinch Analysis", Department of Chemical Engineering University of Tehran, (2005).
- [19] Wright, P., "Nnotechnology Market Review: Fuel Cells Technologies", Tradition Equities Report, (2010).
- [20] www.saba.org.ir.