

آنالیز ترمودینامیکی و زیست‌محیطی استفاده از سیستم تولید انرژی هم‌زمان خورشیدی-پیل سوختی در منازل مسکونی ایران

اسماعیل قاسمی کفرودی^۱، محمدرضا حبیبی^۱، حسین عباسعلی خمه^۲، زینب سبحانی^۲

۱. عضو هیئت علمی، پردیس پژوهش و توسعه انرژی و محیط‌زیست، پژوهشگاه صنعت نفت، تهران، ایران

۲. پژوهشگر پردیس پژوهش و توسعه انرژی و محیط‌زیست، پژوهشگاه صنعت نفت، تهران، ایران

آدرس پست الکترونیکی نویسنده مسئول مکاتبات: ghasemies@ripi.ir

مقاله علمی-پژوهشی

صفحه ۳۳ - ۴۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۳/۱۰

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۱/۲۰

چکیده

امروزه سیستم‌های تولید هم‌زمان برق و حرارت با توجه به کاهش تلفات، راندمان بالا و کمک به امنیت شبکه مورد توجه کشورهای توسعه‌یافته دنیا برای مصارف مسکونی قرار گرفته‌اند. در این پژوهش به آنالیز انرژی و انرژی و محیط‌زیستی سیستم تولید هم‌زمان توان و حرارت با استفاده از پیل خورشیدی و پیل سوختی پرداخته شده است. برای این کار از الگوی مصرف یک ساختمان مسکونی در شهر تهران و تابش ساعتی خورشید در این شهر به‌عنوان داده‌های ورودی استفاده شده است. در این بررسی نمودارهای مربوط به راندمان انرژی و انرژی پیل خورشیدی به‌صورت مجزا و در حالت یکپارچه با مجموعه استخراج گردیده است. نتایج نشان می‌دهد در مواقعی که پیل سوختی وارد مدار کار می‌شود راندمان سیستم به مقدار بیشینه خود می‌رسد. همچنین بررسی آلاینده‌های خروجی از این سیستم و مقایسه آن با حالت رایج یعنی استفاده از شبکه سراسری و بویلر نشان می‌دهد که استفاده از سیستم تولید هم‌زمان کاهش ۳۳ درصدی آلاینده‌های مخرب محیط‌زیست و گازهای آلاینده را به همراه دارد.

کلید واژه‌ها: تولید هم‌زمان برق و حرارت، آنالیز انرژی و انرژی، انرژی خورشیدی، آنالیز زیست‌محیطی

۱. مقدمه

نیاز به انرژی با توجه به رشد جمعیت و افزایش استانداردهای زندگی در سراسر جهان به‌طور پیوسته در حال افزایش است. این امر موجب شده است که جهان با فشارهای شدیدی در بازار انرژی مواجه شود. به‌عنوان مثال دهه‌ی گذشته شاهد یک افزایش چشم‌گیر در نیاز به الکتریسیته همراه با رشد قابل توجه مصرف آن و افزایش قیمت سوخت بود. برخی کشورها به علت کاهش ذخایر انرژی از این افزایش تقاضا رنج می‌بردند. محدودیت‌های موجود در سیستم تولید برق سنتی و عرضه و تحویل، رقابت‌های جهانی، نگرانی‌های پیرامون تغییر شرایط آب و هوایی، خرابی زیرساخت‌های شبکه‌ی برق‌رسانی و مسائل امنیتی از عوامل دیگر مؤثر بر زمینه‌ی تشدید فشار بر وضعیت انرژی هستند که بهداشت محیط‌زیست، سلامت انسان را تهدید کرده و پیامدهای اقتصادی متعددی به دنبال دارد؛ بنابراین باید بهینه‌سازی گسترده‌ای در مصرف انرژی با بهبود سیستم‌های مصرف‌کننده، بهبود طراحی ساختمان‌ها و پیشرفت منابع پایدار و تجدید پذیر صورت گیرد.

ساختمان‌ها، در بخش‌های مسکونی، عمومی، اقتصادی حدود ۳۲ درصد انرژی مصرفی را بر عهده‌دارند که این عدد برای کشورهای عضو آژانس بین‌المللی انرژی به ۴۰ درصد نیز





می‌رسد [۱] که این مصارف شامل برق، گرمایش، سرمایش و آب گرم مصرفی می‌باشد. این بارها معمولاً از طریق شبکه‌ی برق سراسری یا به کمک بویلرهای خانگی که از نفت و گاز تغذیه می‌شوند، تأمین می‌شوند؛ اما نیروگاه‌های حرارتی (با کمک موتورهای احتراقی یا توربین گاز و بخار) با بازده کم خود شناخته می‌شوند که در آن متوسط بهره‌وری برای تولید برق کمتر از ۴۰ درصد می‌باشد [۲]. همچنین برای بارهای حرارتی، بویلرهای رایج خانگی راندمانی در حدود ۷۰ درصد را دارند [۳]. علاوه بر این، استفاده از سوخت‌های فسیلی که پایه و اساس اکثر سیستم‌های رایج تولید قدرت است منتج به تولید مقدار قابل توجهی از آلاینده‌های مختلف از جمله گازهای گلخانه‌ای می‌گردد. از طرف دیگر ذخایر نفت جهانی شروع به کاهش بی‌سابقه‌ای کرده که نرخ تولید آن پاسخگوی بهره‌برداری و نیاز فعلی نیست. بنابراین بهینه‌سازی مصرف سوخت در بخش مسکونی لازم به نظر می‌رسد به همین جهت تولید جداگانه‌ی حرارت و الکتریسیته از نظر انرژی و محیط‌زیستی ناکارآمد بوده و تولید هر دو نوع انرژی در یک سیستم تولید انرژی قابلیت اطمینان بیشتری خواهد داشت. استفاده از حرارت اتلافی در فرآیند تولید قدرت می‌تواند یکی از راه‌های جلوگیری از اتلاف انرژی باشد که با نام فتاوری تولید هم‌زمان یا تولید سه‌گانه بکار گرفته می‌شود.

استفاده از سیستم تولید هم‌زمان برق و حرارت و برودت (CCHP) در بخش ساختمانی بخصوص برای کشورهای که هزینه‌ی انرژی در آن‌ها بالاست مقرون به‌صرفه است. در حال حاضر، یکی از جذاب‌ترین و در دسترس‌ترین روش‌های بهره‌وری انرژی، فتاوری CCHP است. کاهش تقاضای کل انرژی، مستقل بودن سوخت، افزایش رقابت در تجارت، کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و بهبود شبکه برق، برخی از مزایای این فناوری است [۴]. سیستم‌های تولید هم‌زمان انواع مختلفی داشته و با مکانیزم‌های متعددی از قبیل توربین گاز، توربین بخار، میکروتوربین‌ها، موتورهای احتراق داخلی و ... کار می‌کنند. یک ایده‌ی نو در این زمینه استفاده از سلول خورشیدی به همراه پیل سوختی برای تولید هم‌زمان توان و حرارت می‌باشد که با توجه به این تجهیزات کمترین آلاینده‌ی خروجی را با خود به همراه دارد.

در این زمینه مطالعات مختلفی در سطح جهان انجام گرفته که در ادامه بخشی از این مطالعات آورده شده است. لو و یانگ نتایج حاصل از تحلیل اقتصادی و محیط‌زیستی

استفاده از سیستم انرژی تجدید پذیر بر بام ساختمان‌های هنگ‌کنگ را در مطالعه‌ای گزارش دادند [۵]. این سیستم که شامل ۱۲۶ پنل خورشیدی به‌صورت سری و موازی بوده به شبکه برق سراسری متصل شده و توان خروجی سالانه‌ای معادل ۲۸۱۵۴ کیلووات ساعت دارد. ایشان دوره‌ی بازپرداخت انرژی و گازهای گلخانه‌ای این سیستم را به ترتیب ۷/۳ و ۵/۲ سال گزارش دادند. همچنین نتایج این مطالعه بیانگر این است که جهت‌گیری نصب و موقعیت مکانی بر پایداری سیستم فوتولتائیک تأثیر می‌گذارد. ازون اوگلو و همکارانش یک سیستم یکپارچه را برای برآورده کردن نیازهای یک ساختمان پیشنهاد دادند [۶]. این سیستم شامل یک بخش فوتولتائیک خورشیدی به همراه یک واحد الکترولیزر آب به همراه یک پیل سوختی برای تولید توان کمکی می‌باشد. تفاوت قدرت خروجی سیستم فوتولتائیک و بار موردنیاز به همراه نرخ هیدروژن مصرفی برای تأمین برق مازاد محاسبه شده است. همچنین رفتار دینامیک سیستم تحت شرایط تابشی مختلف و نیازهای بار متفاوت با داده‌های واقعی بررسی گردیده است. اتصال مستقیم الکترولیزر به سیستم فوتولتائیک برای تولید هیدروژن نیز در گزارشی توسط کلارک مطالعه شده است [۷]. با اتصال مستقیم و حذف برخی دستگاه‌ها، هزینه‌ی کلی کاهش می‌یابد. همچنین تنظیم تجربی به دنبال حداکثر قدرت تولیدشده توسط این سیستم است که به‌طور مستقیم به الکترولیزر منتقل می‌شود. بهره‌وری الکترولیزر PEM تحت تأثیر تغییرات سلولی به دلیل تغییرات بار تکراری و راندمان کلی الکترولیزر ۶۵ درصد گزارش شده است. سیستم هیدروژن-فوتولتائیک همچنین می‌تواند با یک پیل سوختی اکسید جامد به دلیل راندمان بالا و برای تولید توان مجزا یکپارچه شود. هاوک و همکارانش این سیستم یکپارچه را برای منازل مسکونی در انگلستان به کار برده‌اند [۸]. نیازهای حرارتی متفاوت به همراه بررسی‌های زیست‌محیطی و اقتصادی برای سیستم‌های تولید هم‌زمان صورت گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که این سیستم بهترین عملکرد خود را در نیازهای حرارتی پایین و پایا نشان می‌دهد. علاوه بر این، مرکز مطالعات کانادا برای فناوری‌های خانگی پیل سوختی اکسید جامد را در یک سیستم تولید هم‌زمان برق و قدرت برای مصارف خانگی مورد آزمون قرار داده است. این سیستم به مدت ۱۵۸۷ ساعت کار کرده و نیازهای حرارتی و الکتریکی را با راندمان ۵۲ درصد فراهم کرده است [۹]. بازیابی حرارتی گاز خروجی

از پیل سوختی اکسید جامد توسط حسینی و همکارانش مورد مطالعه قرار گرفته است [۱۰]. ایشان پیشنهاد دادند که می‌توان از این حرارت برای چیلر جذبی و تولید سرمایش نیز استفاده کرد.

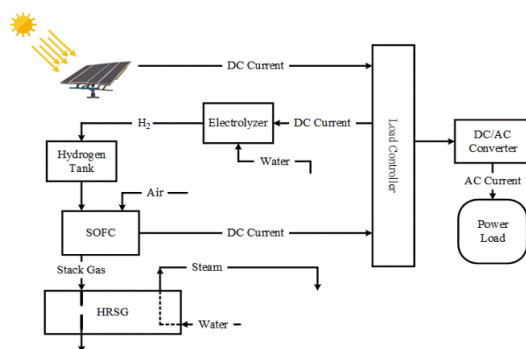
در کشور ما نیز مطالعاتی در این زمینه صورت گرفته است که برخی از این مطالعات در ادامه آورده شده است. پورمحمد و همکارانش به بررسی انرژی و انرژی و انرژی یک سیستم تولید هم‌زمان گرما و توان با استفاده از میکروتوربین پرداخته‌اند [۱۱]. نتایج این بررسی نشان می‌دهد که افزودن ریکوپراتور باعث افزایش قابل ملاحظه در بازده گرمایی چرخه و همچنین باعث کاهش مصرف سوخت به میزان ۴۵ درصد در محفظه‌ی احتراق می‌گردد. فرهنگ و همکارانش به طراحی و بهینه‌سازی یک سیستم تولید هم‌زمان توان، گرمایش و سرمایش برای استفاده از یک ساختمان مسکونی پرداختند [۱۲]. این سیستم که با استفاده از موتور احتراق داخلی کار کرده با توان ۱۲ کیلووات با ۳/۳ سال کمترین زمان بازگشت سرمایه و با توان ۵ کیلووات بیشترین نسبت صرفه‌جویی در هزینه‌ی سوخت مصرفی را دارا خواهد بود.

کرباسیون و همکارانش به مقایسه‌ی عملکرد محرک‌های اولیه مختلف در سیستم‌های تولید هم‌زمان برق، توان و سرمایش پرداختند [۱۳]. در این پژوهش چهار نوع تکنولوژی پیل سوختی، میکروتوربین، موتور رفت و برگشتی و استرلینگ در شرایط کاری مختلف مورد بررسی و مقایسه قرار گرفتند. نتایج نشان می‌دهد که صرفه‌جویی انرژی اولیه برای پیل سوختی بیشترین مقدار و برای موتور استرلینگ کمترین مقدار را دارا می‌باشد. همچنین غفوریان و همکارانش به برآورد کاهش انتشار آلاینده‌ها در عملکرد یک سیستم تولید هم‌زمان نسبت به سیستم معمولی برای مطالعه موردی (هتل) دارای آب‌شیرین‌کن پرداختند [۱۴]. نتایج این بررسی نشان می‌دهد که با استفاده از سیستم تولید هم‌زمان میزان آلاینده‌ها نسبت به سیستم معمولی به‌طور چشمگیری کاهش خواهد یافت.

با توجه به مطالعات انجام گرفته در این زمینه خلاء مطالعه در زمینه‌ی سیستم تولید هم‌زمان به کمک پنل خورشیدی و پیل سوختی احساس می‌شود. در این مطالعه به آنالیز انرژی و انرژی ساعتی و همچنین تحلیل محیط زیستی این سیستم‌ها پرداخته شده است. برای آشنایی با نحوه‌ی عملکرد این سیستم‌ها گام نخست بررسی راندمان انرژی و انرژی آن در ساعات مختلف شبانه‌روز و سپس بحث‌هایی پیرامون آلاینده‌های تولیدی این سیستم‌هاست.

۲. شرح سیستم

همان‌طور که در (شکل ۱) مشاهده می‌شود این سیستم از بخش‌های مختلفی تشکیل شده است. در این طرح سیستم فوتولتائیک خورشیدی بخش اصلی مدول تولید الکتریسیته به شمار می‌آید. همچنین یک الکتروولایزر برای تولید هیدروژن با استفاده از برق مازاد تولیدی توسط سیستم خورشیدی در نظر گرفته شده است. هیدروژن در طول روز که مصرف برق پایین است تولید شده و هنگام شب برای تولید برق به‌عنوان ورودی به پیل سوختی در نظر گرفته می‌شود. یک پیل سوختی اکسید جامد در شرایط اتمسفری برای این طرح در نظر گرفته شده است. گاز داغ خروجی از پیل سوختی (با دمایی در حدود ۹۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد) مستقیماً به مبدل حرارتی برای تولید بخار وارد شده و بخار تولیدی هم برای تهیه‌ی بار گرمایی موردنیاز مجموعه استفاده می‌گردد. لازم به ذکر است که مبدل حرارتی تنها در شرایطی که پیل سوختی در حال کار است وارد مدار سیستم می‌گردد.



شکل ۱: شماتیک سیستم تولید هم‌زمان

۳. معادلات حاکم

در این بخش معادلات حاکم در بخش‌های مختلف تحلیل به تفصیل آورده شده است.

۳-۱. تحلیل انرژی و انرژی سیستم

در بخش انرژی و انرژی سیستم واحدهای مختلف به‌صورت مجزا بررسی شده‌اند:

- سیستم فوتولتائیک

سیستم فوتولتائیک از تعدادی سلول خورشیدی که به‌صورت سری و موازی بسته‌شده‌اند تشکیل شده است. مشخصات ابتدایی این سیستم با استفاده از داده‌های موجود در مرجع [۱۵] در (شکل ۲) نشان داده شده است.



لازم به ذکر است که طراحی‌ها به نحوی انجام می‌گیرد که سیستم فوتوولتائیک در همین نقطه کار کند.

راندمان انرژی و اگزرژی سیستم فوتوولتائیک به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\eta_{PV} = \frac{P_{PV}}{\dot{E}n_{solar}} = \frac{I \times V}{G \times A_{cell}} \quad (5)$$

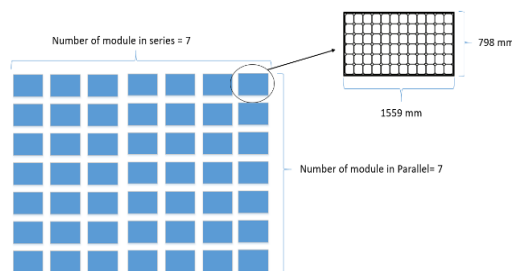
$$\psi_{PV} = \frac{P_{PV}}{\dot{E}x_{solar}} = \frac{I \times V}{G \times A_{cell} \left(1 - \frac{4T_0}{3T_{sun}} + \frac{1}{3} \left(\frac{T_0}{T_{sun}} \right)^4 \right)} \quad (6)$$

همچنین راندمان انرژی و اگزرژی سیستم در نقطه‌ی بیشینه را می‌توان با همین معادلات به دست آورد که با اندیس mp در ادامه استفاده شده است

لازم به ذکر است که پارامترهای موردنیاز با استفاده از مراجع مختلف در (جدول ۱) آورده شده است.

جدول ۱: مشخصات مدول فوتوولتائیک [۱۵]

مقدار	پارامتر (واحد)
۵/۷۵	جریان مدار کوتاه، $I_{sc}(A)$
۴۷/۷	ولتاژ مدار باز، $V_{oc}(V)$
۵/۲۵	جریان بیشینه، $I_{mp}(A)$
۴۰	ولتاژ بیشینه، $V_{mp}(V)$
۱/۲۴۴	مساحت هر آرایه، $A_{cell}(m^2)$
۷۲	تعداد سلول در هر مدول، NCS
۷	تعداد مدول‌های سری شده، NS
۷	تعداد مدول‌های موازی شده، NP
$۳/۵ \times ۱۰^{-۳}$	ضریب دمایی جریان مدار کوتاه، $(A^\circ C^{-1})$
$-۱/۳۶ \times ۱۰^{-۱}$	ضریب دمایی ولتاژ مدار باز، $(V^\circ C^{-1})$
شرایط مرجع	
۱۰۰۰	تابش کلی، $G_{ref}(m^2)$
۵	سرعت باد، $\dot{E}(m s^{-2})$
۲۵	دمای محیط، $T_a(^\circ C)$
سایر فرضیات	
$۱/۶۰۹ \times ۱۰^{-۱۹}$	شارژ الکترون، q
۰/۰۲۷۷	مقاومت‌های سری، $R_s(\Omega)$
$۱/۳۸۱ \times ۱۰^{-۲۳}$	ثابت بولتزمن، $k(J/K)$
۶۰۰۰	دمای خورشید، $T_{sun}(K)$



شکل ۲: شماتیک سیستم فوتوولتائیک

عملکرد این سیستم با منحنی غیرخطی ولتاژ - جریان نشان داده می‌شود. در مراجع معتبر این رابطه به صورت رابطه‌ی (۱) تعریف شده است [۱۶، ۱۷]:

$$I = I_L - I_0 \left[\exp\left(\frac{q(V + IR_s)}{\gamma k T_{cell}}\right) - 1 \right] \quad (1)$$

که در آن I_0 ، R_s ، k ، q ، به ترتیب شارژ الکترون، ثابت بولتزمن، مقاومت‌های سری و جریان اشباع معکوس بوده که مقادیر آن در (جدول ۱) آورده شده است. I_L جریان نور بوده که تابعی از تابش خورشید و دما بوده و به صورت رابطه‌ی (۲) تعریف می‌شود:

$$I_L = \left(\frac{G}{G_{ref}} \right) (I_{L,ref} + k_t(T_{cell} - T_{ref})) \quad (2)$$

که در آن G و G_{ref} به ترتیب تابش خورشیدی و تابش خورشیدی در شرایط طراحی هستند. همچنین $I_{L,ref}$ بر مبنای داده‌های سازنده برای مدار کوتاه و جریان نقطه‌ی بیشینه محاسبه شده و K_t نیز ضریب دمایی تولیدی برای جریان مدار کوتاه می‌باشد. T_{cell} نیز دمای سلول خورشیدی بوده که از رابطه‌ی (۳) به دست می‌آید.

$$T_{cell} = 0.943 T_0 + 0.028 G - 1.528 V_{wind} + 4.3 \quad (3)$$

که در آن V_{wind} سرعت متوسط باد می‌باشد. همچنین در روابط بالا γ فاکتور شکل نام دارد که از رابطه‌ی (۴) به دست می‌آید.

$$\gamma = a \times NS \times NCS \quad (4)$$

که در این رابطه a ، NS و NCS به ترتیب فاکتور تکمیل، تعداد سلول‌های متصل در هر مدول و تعداد مدول‌های متصل در هر سری می‌باشد.

قدرت خروجی سلول فوتوولتائیک بر اساس معادله‌ی غیرخطی رابطه‌ی (۱) از رابطه‌ی $V \times I$ به دست می‌آید. با رسم منحنی ولتاژ برحسب جریان نقطه‌ای وجود دارد که در آن توان بیشینه (P_{mp}) به دست می‌آید، به ولتاژ و جریان مرتبط با توان بیشینه به ترتیب V_{mp} و I_{mp} گفته می‌شود.

• واحد الکترو لایزر

برای برق مازاد تولید شده در سیستم فوتوولتائیک، راندمان انرژی واحد الکترو لایزر برای محاسبه مقدار هیدروژن تولیدی به صورت رابطه‌ی (۷) تعریف می‌شود:

$$\eta_{el} = \frac{\dot{m}_{H_2} LHV_{H_2}}{P_{in,el}} \quad (7)$$

که در آن LHV_{H_2} ارزش حرارتی پائین هیدروژن بوده که مقدار آن $33/33$ کیلووات ساعت بر کیلوگرم گزارش شده است. همچنین طبق مراجع یک الکترو لایزر دما پائین برای سیستم انتخاب شده که علت آن پاسخ سریع‌تر به تغییرات بار برای پیل سوختی می‌باشد. راندمان این واحد طبق مطالعات کلارک و همکارانش $0/65$ در نظر گرفته شده است [۷].

• پیل سوختی اکسید جامد

این واحد در مطالعه‌ی حاضر بر اساس طراحی لوله‌ای انجام گرفته و ابعاد و مواد سازنده‌ی پیل سوختی از داده‌های ارائه شده در مطالعه‌ی مطهر و همکارش برداشت شده است [۱۸]. لازم به ذکر است که الگوریتم حل و روند محاسبه‌ی هیدروژن مصرفی در پیل سوختی و قدرت خروجی بر اساس مدل دینسر و همکارانش انجام گرفته است [۱۹]. واحد پیل سوختی از هیدروژن تولیدی در واحد الکترو لایزر تغذیه شده و زمانی که برق مورد نیاز بیش از مقدار تولیدی در سیستم فوتوولتائیک باشد به عنوان واحد تولید قدرت ثانویه وارد مدار می‌شود. این هیدروژن تولیدی تحت عنوان یک کاتد، با یون‌های اکسیژن به عنوان آنود یک واکنش الکتروشیمیایی برقرار می‌کند. لازم به ذکر است نرخ مصرف هیدروژن به چگالی جریان در پیل سوختی بستگی دارد. قدرت الکتریکی خالص خروجی پیل سوختی به صورت رابطه‌ی (۸) محاسبه می‌شود:

$$\dot{W}_{net-SOFC} = \dot{W}_{SOFC} - \dot{W}_{FWP} - \dot{W}_{consumption} \quad (8)$$

که در آن \dot{W}_{SOFC} انرژی تولیدی، \dot{W}_{FWP} انرژی مصرفی توسط پمپ آب در مبدل حرارتی، $\dot{W}_{consumption}$ انرژی‌های مصرفی داخلی پیل سوختی شامل دمنده‌ی هوا و سیستم کنترلی و ... می‌باشد که طبق مرجع [۱۹] مجموعاً ۴ درصد کار کلی را تشکیل می‌دهد.

بازده انرژی و انرژی پیل سوختی از روابط زیر به دست می‌آید:

$$\eta_{PV} = \frac{\dot{W}_{net-SOFC}}{\dot{m}_{H_2,SOFC} LHV_{H_2}} \quad (9)$$

$$\psi_{PV} = \frac{\dot{W}_{net-SOFC}}{\dot{m}_{H_2,SOFC} ex_{H_2}} \quad (10)$$

لازم به ذکر است که داده‌های لازم برای انجام محاسبات واحد پیل سوختی در (جدول ۲) آورده شده است.

جدول ۲: مشخصات پیل سوختی [۱۹]

مقدار	پارامتر (واحد)
۲۵	دمای هوای ورودی، T_0 (°C)
۹۰۰	دمای خروجی از پیل، T_{evap} (°C)
۱۵	تعداد سلول‌ها، n_{solar}

• راندمان کلی سیستم

راندمان کلی سیستم با دو سناریوی مختلف به دست می‌آید. حالت اول زمانی است که برق مورد نیاز توسط سیستم فوتوولتائیک تأمین شده و برق مازاد به صورت هیدروژن تولیدی در الکترو لایزر ذخیره شود. ex_{H_2} انرژی ویژه هیدروژن و $\dot{E}x_{solar}$ شدت جریان انرژی می‌باشد. در این حالت راندمان کلی انرژی و انرژی سیستم برابر است با:

$$\eta_{total} = \frac{P_{demand} + \dot{m}_{H_2} LHV}{\dot{E}n_{solar}} \quad (11)$$

$$\psi_{total} = \frac{P_{demand} + \dot{m}_{H_2} ex_{H_2}}{\dot{E}x_{solar}} \quad (12)$$

در ساعاتی از شب و زمان‌هایی که سیستم فوتوولتائیک کار نمی‌کند راندمان کلی انرژی و انرژی سیستم برابر است با:

$$\eta_{PV} = \frac{\dot{W}_{SOFC} + \dot{Q}_{evap}}{\dot{m}_{fuel} LHV} \quad (13)$$

$$\psi_{PV} = \frac{\dot{W}_{SOFC} + \dot{Q}_{evap} (1 - T_0 / T_{evap})}{\dot{m}_{H_2,SOFC} ex_{H_2}} \quad (14)$$

۲-۳. فرضیات و الگوریتم حل

در مطالعه‌ی حاضر برای تحلیل انرژی و انرژی فرضیات زیر در نظر گرفته شده است:

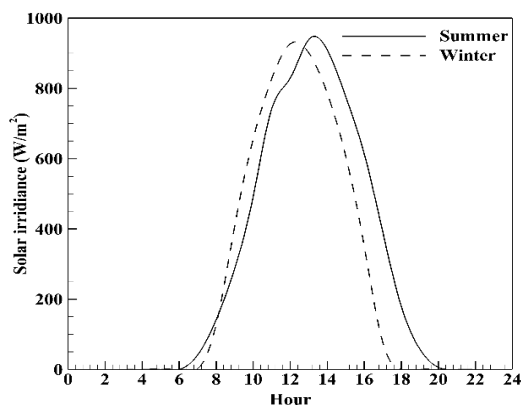
- سیستم ترکیبی در شرایط پایا عمل می‌کند.
- داده‌های ارائه شده برای تابش خورشیدی و مصرف

ساعتی برق از طریق پژوهشگاه نفت استخراج شده است.

- نویزها و تغییرات ناگهانی در منحنی‌های تابش خورشیدی و برق مصرفی در این مطالعه لحاظ نشده و مقادیر متوسط استفاده شده است.
- گرمای خروجی از مرزهای سیستم ناچیز فرض شده است.

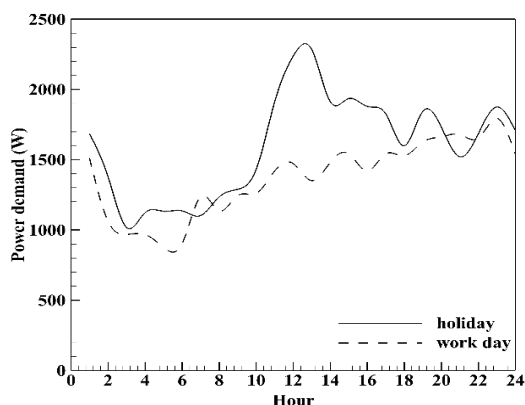
در این مطالعه از مدول فوتوولتائیک کربن-سیلیس ساخته شده توسط شرکت سان پاور با مشخصات ارائه شده در (جدول ۱) استفاده شده است. الکترولیت پیل سوختی با اکسید جامد استیلایز شده با زیرکونیا ساخته شده است که آند آن از جنس نیکل می‌باشد. همچنین مشخصات مهم پیل سوختی در (جدول ۲) آورده شده است. مصارف داخلی این پیل سوختی در حدود ۴ درصد کار کلی این سیستم نظر گرفته شده که این مقدار در محاسبه‌ی راندمان سیستم لحاظ شده است.

در (شکل ۳) داده‌های مربوط به منحنی ساعتی تابش خورشید در شهر تهران آورده شده است. لازم به ذکر است که در این مطالعه از داده‌های ارائه شده توسط پژوهشگاه صنعت نفت اندازه‌گیری شده برای شهر تهران در سال ۲۰۱۳ استفاده شده است [۲۰]. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود در تابستان بین ساعت ۲۰ تا ۵ صبح تابشی وجود نداشته و این بازه برای زمستان به ۱۸ تا ۷ صبح نیز می‌رسد. سیستم فوتوولتائیک بستگی زیادی به تابش خورشیدی داشته به همین دلیل برای شهر تهران بیشترین برق تولیدی بین ساعات ۱۱ تا ۱۳ ظهر در تابستان و بین ساعات ۱۲ تا ۱۴ در زمستان خواهد بود. همچنین مشاهده می‌شود که مطابق انتظار تابش کلی در تابستان بیشتر از زمستان است.



شکل ۳: منحنی ساعتی تابش خورشید برای فصل تابستان و زمستان در شهر تهران [۲۰]

همچنین تحلیل ذکر شده نیازمند داشتن مصارف ساعتی برق مسکونی است. به همین منظور در (شکل ۴) مصرف برق ساعتی برای یک ساختمان در روزهای کاری و تعطیل در شهر تهران آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود اوج مصرف برای این ساختمان بین ساعات ۱۲ تا ۱۳ ظهر در روز و حوالی ساعت ۲۲ در شب می‌باشد. لازم به ذکر است که متراژ این ساختمان در حدود ۱۳۰ مترمربع بوده است.



شکل ۴: منحنی ساعتی مصرف برق در روزهای کاری و تعطیل در شهر تهران [۲۰]

روند تحلیل این سیستم و مراحل کد نوشته شده در نرم‌افزار فترن (که بر روی رایانه ۹ هسته‌ای با رم ۸ مدل شده است) به شرح زیر می‌باشد:

(۱) به دست آوردن نمودار ولتاژ-جریان با استفاده از روابط (۱) تا (۴)

(۲) محاسبه‌ی راندمان انرژی و اگزرژی با استفاده از روابط (۵) و (۶)

(۳) به دست آوردن مقدار هیدروژن تولیدی توسط الکترولایزر با استفاده از رابطه‌ی (۷)

(۴) محاسبه‌ی راندمان انرژی کلی سیستم

(الف) در ساعات استفاده از سیستم فوتوولتائیک با رابطه‌ی (۱۱)

(ب) در ساعات استفاده از واحد پیل سوختی با کمک رابطه‌ی (۱۳)

(۵) محاسبه‌ی راندمان اگزرژی کلی سیستم

(الف) در ساعات استفاده از سیستم فوتوولتائیک با رابطه‌ی (۱۲)

(ب) در ساعات استفاده از واحد پیل سوختی با رابطه‌ی (۱۴)

۳-۳. تحلیل زیست‌محیطی

در کنار بحث‌های اقتصادی، تأثیرات زیست‌محیطی یک سیستم نیز در ارزیابی استفاده از آن نقش مهمی را ایفا می‌کند. به همین منظور در ادامه روابط حاکم برای به دست آوردن میزان آلاینده‌های منتشرشده از هر دو سیستم رایج استفاده‌شده در ساختمان‌ها (خرید برق از شبکه سراسری و استفاده از بویلر) و سامانه‌ی تولید هم‌زمان برق و حرارت معرفی شده‌اند.

$$Em_{CON} = Em_{CON}^{Ele} + Em_{CON}^{Gas} \quad (15)$$

$$Em_{CHP} = Em_{PV-FC}^{Ele} + Em_{PV-FC}^{Gas} \quad (16)$$

که در آن Em_{CHP} و Em_{CON} میزان آلاینده‌های منتشرشده توسط سیستم رایج و سیستم فوتولتائیک-پیل سوختی است که برابر با مجموع آلاینده‌های ناشی از تولید برق و گاز می‌باشد. برای مشخص شدن میزان تولید هر یک از آلاینده‌ها در طی فرآیند از روابط زیر استفاده می‌شود:

$$Em_{CON}^{Ele} = E_{ele} \times EmI_{ele} \quad (17)$$

$$Em_{CON}^{Gas} = E_{CON}^{gas} \times EmI_{gas} \quad (18)$$

$$Em_{PVFC}^{Ele} = (E_{ele} - E_{ele-PVFC}) \times EmI_{ele} \quad (19)$$

$$Em_{PVFC}^{Gas} = E_{PVFC}^{gas} \times EmI_{gas} \quad (20)$$

که در آن E_{ele} و $E_{ele-PVFC}$ به ترتیب برق موردنیاز سالانه و برق تولیدی توسط سیستم تولید هم‌زمان، E_{CON}^{gas} و E_{PVFC}^{gas} مقدار گاز موردنیاز سالانه به ترتیب در سیستم رایج و EmI_{gas} و EmI_{ele} نیز به ترتیب شدت تولید آلاینده‌ها برای تولید برق و احتراق گاز هستند که مقادیر آن در (جدول ۳) نشان داده شده است. لازم به ذکر است که این مقادیر از مراجع ذکرشده و با استفاده از روش موازنه‌ی جرم بر اساس میزان مصرف سوخت محاسبه شده‌اند. همچنین برای مقایسه‌ی دو سیستم مذکور از پارامتری با عنوان نسبت کاهش آلاینده‌ها استفاده شده است که به صورت زیر نوشته می‌شود.

$$ERR = \frac{Em_{CON} - Em_{PV-FC}}{Em_{CON}} \times 100 \quad (21)$$

جدول ۳. میزان تولید معادل گازهای گلخانه‌ای و آلاینده‌های مختلف در فرایند احتراق گاز و تولید برق

$EmI_{ele} \left(\frac{kg}{kwh} \right)$	$EmI_{gas} \left(\frac{kg}{m^3} \right)$	کمیت آلاینده
[۲۳]	[۲۲, ۲۱]	
۰/۷۱۵	۱/۹۹۸	CO_2
۰/۰۰۰۴	۰/۰۰۱۲	CO
۰/۰۰۰۵	۰/۰۰۴۲	NO_X
۰/۰۰۳۳	-	SO_X

۴. نتایج و بحث

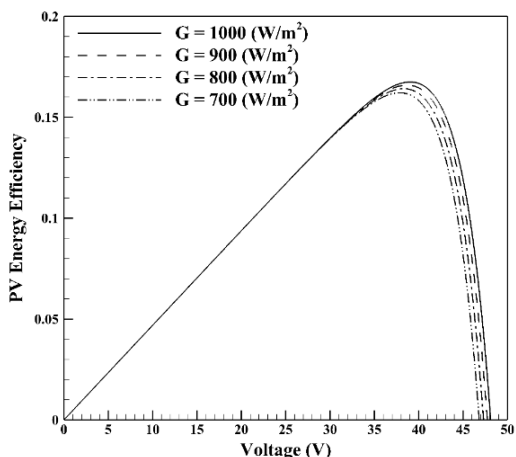
۴-۱. اعتبار سنجی

برای حصول اطمینان از صحت کد نوشته شده در (شکل ۵) نمودار جریان-ولتاژ ارائه‌شده در برگ داده با کد نوشته شده در مطالعه‌ی حاضر مقایسه شده است. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود نمودار غیرخطی ولتاژ جریان که بر اساس رابطه‌ی (۱) به دست آمده از دو بخش تشکیل شده که در ولتاژهای پایین جریان ثابتی به دست می‌دهد اما در بخش پایانی با افزایش ولتاژ مقدار جریان به شدت کاهش یافته و به صفر می‌رسد. همچنین مطابق انتظار با افزایش تابش خورشید (G) میزان جریان در ولتاژهای مشابه افزایش می‌یابد. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود نمودارهای جریان ولتاژ رسم شده در مطالعه‌ی حاضر تطابق قابل قبولی با داده‌های ارائه‌شده توسط شرکت سان پاور دارد.

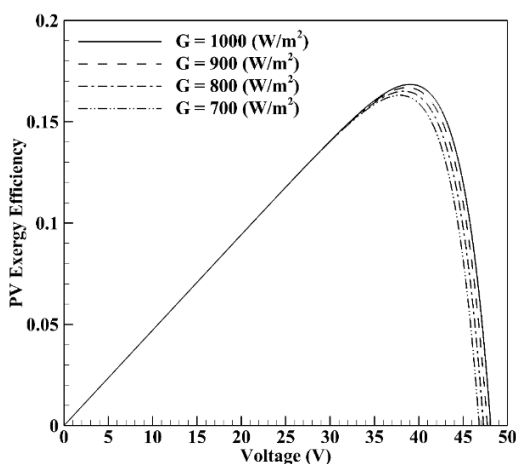
۴-۲. انرژی و انرژی

در این بخش ابتدا نتایج تحلیل برای پنل خورشیدی آورده شده است و در ادامه مباحثی پیرامون راندمان کلی سیستم انجام گرفته است. در (شکل ۶) منحنی توان برحسب ولتاژ برای مقادیر تابش خورشیدی مختلف آورده شده است. با توجه به شکل می‌توان گفت که سیستم فوتولتائیک یک نقطه‌ی کار بیشینه داشته که بعد از آن با تغییر ولتاژ توان خروجی به شدت کاهش می‌یابد. لازم به ذکر است که سیستم‌های خورشیدی پیشرفته در شرایطی طراحی می‌شوند که تحت تابش‌های خورشیدی متفاوت در همان نقطه‌ی بیشینه کار کنند. لازم به ذکر است که نتایج به دست آمده در این بخش نیز با داده‌های ارائه‌شده توسط شرکت سان پاور مقایسه شده و نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که در شرایط استاندارد آزمون برای تابش





شکل ۷: نمودار راندمان انرژی بر حسب ولتاژ برای انرژی‌های تابشی مختلف

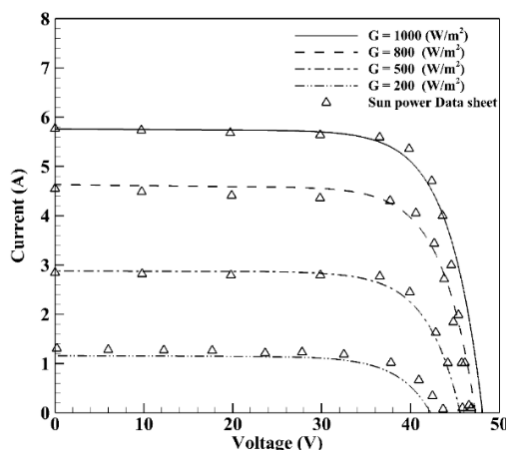


شکل ۸: نمودار راندمان انرژی بر حسب ولتاژ برای انرژی‌های تابشی مختلف

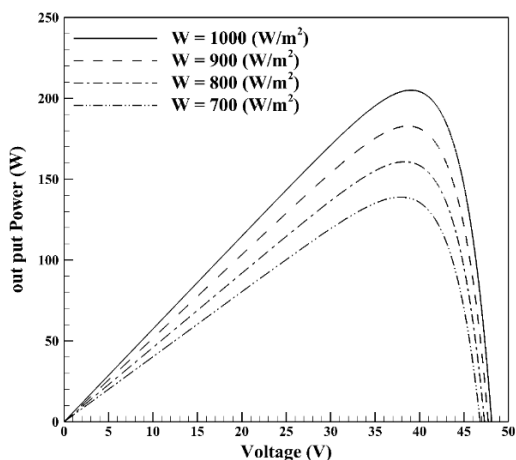
همان‌طور که اشاره شد برای استفاده از منحنی تابش خورشید بر حسب ساعات شبانه‌روز از داده‌های موجود برای شهر تهران در دو فصل تابستان و زمستان استفاده شده تا به‌نوعی بیشترین و کمترین تابش خورشید در محاسبات لحاظ گردد. در (شکل ۹) تفاضل برق تولیدی توسط سیستم خورشیدی از برق موردنیاز ساختمان‌ها در شهر تهران آورده شده است. مطابق انتظار همان‌طور که در شکل نیز مشاهده می‌شود میزان برق مازاد بر نیاز در حوالی ظهر به میزان بیشینه‌ی خود رسیده و در اوایل صبح و اواخر شب نیز مقدار نیاز بیشتر از برق تولیدی می‌باشد چون در این ساعات تابشی وجود ندارد. به همین دلیل در مواقعی که تابش مازاد وجود دارد این انرژی به‌عنوان ورودی به همراه آب به الکتروولایزر منتقل شده و هیدروژن تولید می‌شود تا در مواقعی که به برق نیاز است و تابش خورشید در دسترس نیست با انتقال

خورشیدی ۱۰۰۰ وات بر مترمربع توان بیشینه در حدود ۳ درصد تفاوت با داده‌های شرکت داشته که برای مدل‌سازی حاضر قابل قبول است.

همچنین در (شکل ۷) و (شکل ۸) به ترتیب راندمان انرژی و انرژی سیستم فوتوولتائیک برای تابش‌های خورشیدی مختلف آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود روند هر دو نمودار مشابه روند منحنی توان-ولتاژ است. همچنین با افزایش تابش خورشیدی راندمان افزایش می‌یابد؛ و نیز راندمان انرژی در مقدار بیشینه‌ی خود مقدار بالاتری را از راندمان انرژی دارد. این روند را می‌توان با معادلات (۵) و (۶) توضیح داد؛ جایی که تنها تفاوت دو رابطه وجود تأثیر دمای خورشید در معادله‌ی انرژی است که باعث افزایش آن در مقایسه با راندمان انرژی می‌شود.

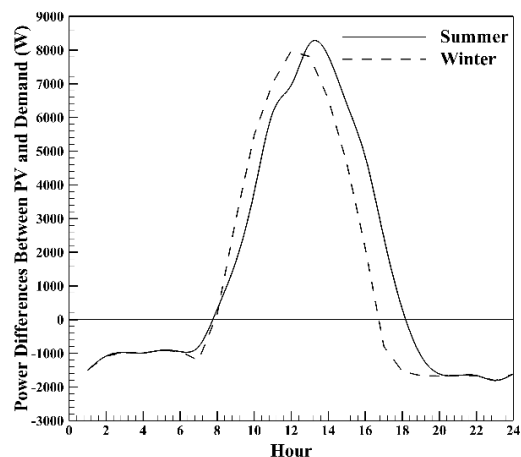


شکل ۵: اعتبارسنجی سیستم خورشیدی با مقایسه‌ی نمودار ولتاژ-جریان با داده‌های موجود در برگ‌داده‌ی شرکت سان‌پاور [۱۵]

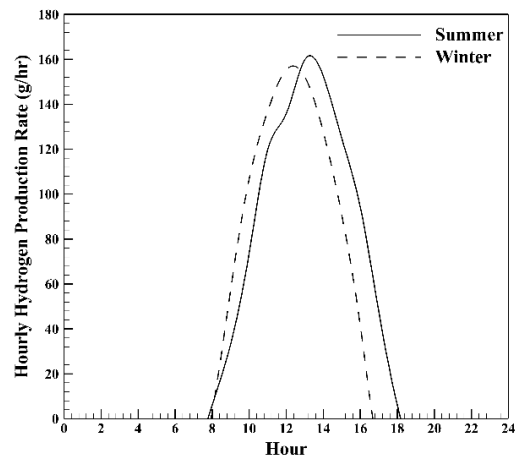


شکل ۶: تأثیر تابش خورشید در منحنی توان-ولتاژ

هیدروژن به پیل سوختی برق مورد نیاز ساختمان تأمین گردد در (شکل ۱۰) نرخ هیدروژن تولیدی توسط الکترو لایزر در ساعات مختلف شبانه روز در شهر تهران نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود روند این نمودار مطابق روند (شکل ۹) بوده و بیشینه ی نرخ تولید هیدروژن مربوط به زمانی است که تفاضل انرژی تابشی با برق مورد نیاز بیشینه است. همچنین واضح است که هیدروژن بیشتری در فصل تابستان تولید می شود که با محاسبه ی سطح زیر منحنی در (شکل ۱۰) به دست می آید.



شکل ۹: تفاوت برق تولیدی توسط سیستم خورشیدی و برق مورد نیاز ساختمان در دو فصل تابستان و زمستان برای شهر تهران

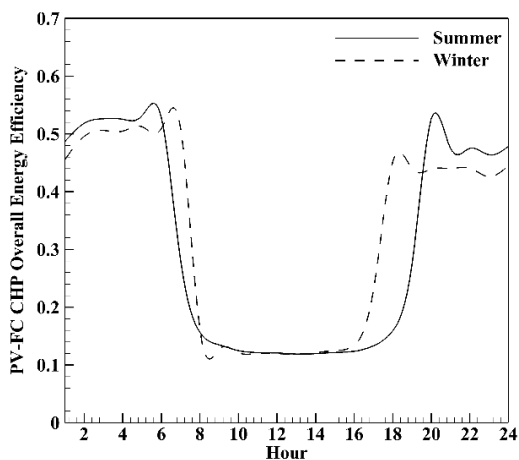


شکل ۱۰: نرخ هیدروژن تولیدی توسط الکترو لایزر در دو فصل تابستان و زمستان برای شهر تهران

راندمان کلی انرژی و انرژی سیستم با استفاده از روابط (۱۱) تا (۱۴) محاسبه شده و در (شکل های ۱۱ و ۱۲) نشان داده شده است. با وجودی که هر دو بازه در فصول مورد مطالعه روند یکسانی دارند، همان طور که مشاهده می شود بازدهی

انرژی از انرژی بیشتر است. گراف های راندمانی نشان می دهند که ساعات کار پیل سوختی در زمستان بیشتر است که علت آن کمتر بودن تابش در دسترس در این فصول است. همچنین کمترین راندمان زمانی به دست می آید که مقدار برق مازاد بیشینه است. این دو شکل در تابستان بین ساعات ۷ تا ۱۹ کمترین راندمان انرژی و انرژی کل را نشان می دهند که علت آن این است که در این زمان برق مازاد صرف تولید هیدروژن در الکترو لایزر شده و ذخیره می گردد. همچنین در زمستان این مقدار کمینه به محدوده ساعت ۸ صبح تا ۱۷ منتقل می شود.

با توجه به (شکل ۷) مقدار بیشینه ی راندمان انرژی سلول خورشیدی در حدود ۱۷ درصد است، همچنین تابش خورشیدی ۱۰۰۰ وات بر مترمربع در نظر گرفته شده است. این بدین معنی است که تنها ۱۷ درصد انرژی خورشیدی جذب شده در سلول های فوتوولتائیک به انرژی الکتریکی تبدیل می شود. در ساعاتی که میزان برق تولیدی توسط انرژی خورشیدی بیشتر از برق مورد نیاز مصرفی است (شکل ۹) برق مازاد تولیدی با ورود به الکترو لایزر (که بازدهی در حدود ۶۵ درصد دارد) و صرف تولید هیدروژن گشته بنابراین در این ساعات ورودی سیستم که تابش خورشید بوده به میزان بیشینه ی خود رسیده اما خروجی سیستم تنها برق مصرفی مورد نیاز و هیدروژن تولید شده در الکترو لایزر است، به همین دلیل در این ساعات بازدهی انرژی و انرژی به میزان کمینه ی خود می رسد. به همین ترتیب تبدیل هیدروژن تولیدی در الکترو لایزر به برق مصرفی در ساعات اولیه و آخرین شبانه روز که تابش خورشید به عنوان ورودی سیستم وجود ندارد باعث افزایش چشمگیر انرژی و انرژی سیستم گردیده که این افزایش در اشکال زیر به درستی دیده می شود.



شکل ۱۱: راندمان کلی انرژی سیستم

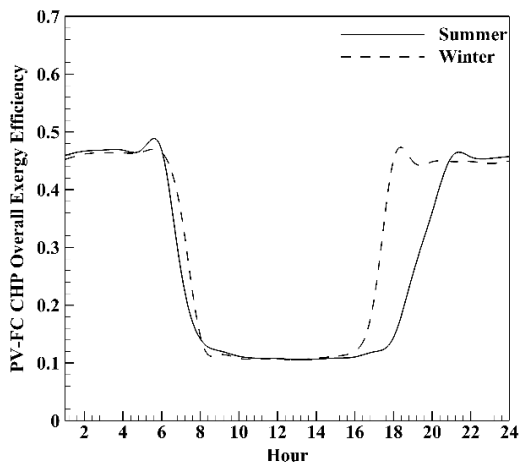
جدول ۴: میزان آلاینده‌های منتشر شده برای دو سیستم مورد بحث

آلاینده	کیلوگرم آلاینده‌ی تولیدشده از طریق گاز		کیلوگرم آلاینده‌ی تولیدشده در نیروگاه برق		ERR (%)
	PVFC	Con	PVFC	Con	
CO_2	۲۹۱۴۷	۳۳۷۷۰	۶۸۰	۱۰۷۹۰	۳۳
CO	۱۷	۲۰	۰/۳	۶	۳۲
NO_x	۶۱	۷۱	۰/۵	۷	۲۱
SO_x	۰	۰	۳	۵۰	۹۳

۵. جمع‌بندی

در این مطالعه به تحلیل انرژی و اگزرژی، تحلیل اقتصادی و محیط‌زیستی سامانه‌ی تولید هم‌زمان برق و حرارت به کمک پیل سوختی و سلول خورشیدی پرداخته شده است. لازم به ذکر است که در بخش تحلیل اقتصادی از دو ساختمان نمونه در شهر تورنتوی کانادا و تهران استفاده شد.

در بخش تحلیل انرژی و اگزرژی سیستم نمودارهای مرتبط به واحدهای مختلف تشکیل‌دهنده‌ی آن برحسب ساعات کارکرد آورده شده است. نتایج نشان می‌دهند که بیشینه‌ی راندمان انرژی و اگزرژی سلول خورشیدی در حدود ۱۵ درصد و در حوالی ولتاژ ۴۰ ولت می‌باشد. همچنین نرخ تولیدی هیدروژن در اواسط روز و زمانی که تابش بیشینه است به مقدار بیشینه‌ی خود می‌رسد و مطابق انتظار این نرخ در روزهای تابستان بیشتر از روزهای زمستانی است. همچنین نتایج نشان می‌دهد که راندمان کلی دستگاه در حوالی ظهر و زمانی که سیستم پیل سوختی وارد مدار نشده در حالت کمینه‌ی خود قرار دارد که علت آن ذخیره‌ی هیدروژن تولیدی در واحد الکترولیزر است با ورود پیل سوختی به مدار در حوالی ساعت ۱۸ تا ۶ صبح راندمان به صورت چشمگیری افزایش می‌یابد. لازم به ذکر است که راندمان کلی دستگاه در حدود ۵۵ درصد به دست آمده که نسبت به راندمان سیستم رایج (حدود ۳۰ تا ۴۰ درصد) بالاتر می‌باشد؛ اما در بخش تحلیل زیست‌محیطی کفای ترازو کاملاً به سمت سیستم تولید هم‌زمان سنگینی می‌کند. به طوری که استفاده از این سیستم‌ها کاهش ۳۳ درصدی آلاینده‌های مخرب محیط‌زیست و گازهای آلاینده را به همراه دارد.



شکل ۱۲: راندمان کلی انرژی سیستم

۳-۴. زیست‌محیطی

با توجه به پروتکل‌ها و استانداردهای بین‌المللی محیط زیستی، انتشار گازهای گلخانه‌ای و آلاینده‌ها نیز می‌تواند در انتخاب و اجرای یک سیستم نقش جذاب و مهمی را ایفا کند. از این رو در (جدول ۴) مقادیر معادل گازهای گلخانه‌ای و آلاینده‌های منتشر شده توسط هر دو سیستم مورد بحث و نسبت کاهش گازهای گلخانه‌ای و آلاینده‌ها برای ساختمان مفروض ارائه شده است. لازم به ذکر است که سیستم تولید هم‌زمان توانایی تأمین تمام برق و حرارت موردنیاز برای این واحد مسکونی را نداشته و مقدار مازاد موردنیاز از شبکه گرفته شده بنابراین مقدار آلاینده‌های تولیدی از آن هم برای سیستم تولید هم‌زمان لحاظ گردیده است. همان‌طور که مشخص است سیستم تولید هم‌زمان نسبت به سیستم رایج، به گاز طبیعی و برق مصرفی کمتری نیاز دارد، به همین ترتیب گاز گلخانه‌ای و آلاینده‌ی کمتری تولید می‌کند. همان‌طور که در (جدول ۴) مشاهده می‌شود مقادیر CO_2 ، CO ، NO_x و SO_x در سیستم رایج به ترتیب ۳۳، ۳۲، ۲۱ و ۹۳ درصد بیشتر از آلاینده‌های تولیدی توسط سیستم تولید هم‌زمان می‌باشد. علت تولید آلاینده‌ی SO_x در نیروگاه‌های تولید برق، مصرف سوخت‌های مختلف مانند مازوت است که تا حدودی حاوی H_2S می‌باشد.

به‌طور کلی می‌توان گفت استفاده از سیستم تولید هم‌زمان منجر به کاهش چشمگیر انتشار گازهای گلخانه‌ای و آلاینده‌ها به محیط در حدود ۳۳ درصد می‌گردد.

علائم

T	دما [K]
T_0	دما در شرایط استاندارد [K]
t	زمان [s]
U	عدم قطعیت بسط یافته
u	عدم قطعیت استاندارد
V	حجم [m ³]
Z	ضریب تراکم‌پذیری در شرایط خط
Z_0	ضریب تراکم‌پذیری در شرایط استاندارد

حروف یونانی

ρ	چگالی [kg/m ³]
ρ_0	چگالی در شرایط استاندارد [kg/m ³]
A	سطح مقطع [m ²]
c_i	ضریب حساسیت
m	جرم [kg]
P	فشار در شرایط خط [Pa]
P_0	فشار در شرایط استاندارد [Pa]
Q	دبی [h/m ³]
Q_0	دبی در شرایط استاندارد [h/m ³]
q	دبی جرمی [kg/s]

زیرونیس

e	خروجی
m	جرمی
0	شرایط استاندارد

مراجع:

- [3]. Parliamentary Office of Science and Technology. Household energy efficiency. Post; October 2005.
- [4]. Chicco, G. and P. Mancarella, Distributed multi-generation: a comprehensive view. Renewable and sustainable energy reviews, Vol.1, No.3, pp. 535-551, 2009.
- [5]. Lu, L. and H. Yang, Environmental payback time analysis of a roof-mounted building-integrated photovoltaic (BIPV) system in Hong Kong. Applied Energy, Vol. 87, No.12, pp. 3625-3631, 2010.
- [6]. Uzunoglu, M., O. Onar, and M. Alam, Modeling, control and simulation of a PV/FC/UC based hybrid power generation system for stand-alone applications. Renewable energy, Vol. 34, No.3, pp. 509-520, 2009.
- [7]. Clarke, R., et al., Direct coupling of an electrolyser to a solar PV system for generating hydrogen. International Journal of Hydrogen Energy, Vol.34, No.6, pp. 2531-2542, 2009.
- [8]. Hawkes, A., et al., Solid oxide fuel cell micro combined heat and power system operating strategy: Options for provision of residential space and water heating. Journal of Power Sources, Vol.164, No.1, pp. 260-271, 2007.
- [9]. Bell, M., et al., Development of micro combined heat and power technology assessment capability at the Canadian Centre for Housing Technology, 2003.
- [10]. Hosseini, M., et al., Thermodynamic modelling of an integrated solid oxide fuel cell and micro gas turbine system for desalination purposes. International Journal of Energy Research, Vol.37, No.5, pp. 426-434, 2013.
- [1]. International energy Agency. Energy efficiency.
- [2]. Al-Sulaiman, F.A., I. Dincer, and F. Hamdullahpur, Energy analysis of a trigeneration plant based on solid oxide fuel cell and organic Rankine cycle. International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 35, No.10, pp. 5104-5113, 2010.

- based performance analysis of a solid oxide fuel cell and steam injected gas turbine hybrid power system. *international journal of hydrogen energy*, Vol.34, No.5, pp. 2396-2407, 2009.
- [19]. Hosseini, M., I. Dincer, and M.A. Rosen, Hybrid solar-fuel cell combined heat and power systems for residential applications: Energy and exergy analyses. *Journal of Power Sources*, Vol.221, pp. 372-380, 2013.
- [20]. Research Institute of Petroleum Industry Data sheet, 2017.
- [21]. American Petroleum institute (API), Compendium of Greenhouse Gas Emission Methodologies for the Oil and Natural Gas Industry, August 2009.
- [22]. US Environmental Protection Agency, Complication of Air Pollutant Emission Factors, Volume I: Stationary Point and Area Sources, Ap-42, (GPO 055-000-005-001), 2006.
- [23]. Validation Report, Flare Gas Recovery in Sarkhoon and Qeshm Gas Treating Company, 2015.
- [24]. Kiran K Chedella¹, Lin Zhao² and Zhihao Zhang³ Modeling of a Small Stand-Alone AC System with the Dynamic Models of Fuel Cells and Solar Panels,
- [۱۱]. پورمحمد م. اشجاری م. و خسروشاهی ع.، بررسی انرژی و انرژی ریکوپراتور در کاربرد میکروتوربین برای سیستم‌های تولید هم‌زمان گرما و توان. *مجله مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز*، د. ۴۶، ش. ۳، ص ۵۵-۶۶، ۱۳۹۵.
- [۱۲]. فرهنگ م. فرزانه گرد م. و دشت بیاض م.، الگوریتم بهینه‌سازی فنی - اقتصادی سیستم تولید هم‌زمان سرمایش، گرمایش و برق با موتور احتراق داخلی در یک ساختمان خانگی نمونه. *مجله مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز*، د. ۴۷، ش. ۲، ص ۱۷۹-۱۸۸، ۱۳۹۶.
- [۱۳]. کرباسیون م. داناییان م. و محسنی م.، مقایسه‌ی عملکرد محرک‌های اولیه مختلف در سیستم‌های تولید سه‌گانه توان، حرارت و برودت در مقیاس میکرو برای دو حالت بار پایه و حرارت پایه. *مجله مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز*، د. ۴۷، ش. ۲، ص ۲۰۳-۲۱۱، ۱۳۹۶.
- [۱۴]. غفوریان م.م. و نیازمند ج.، برآورد کاهش انتشار آلاینده‌ها در عملکرد یک سیستم تولید هم‌زمان نسبت به یک سیستم معمولی برای مطالعه موردی (هتل) دارای آب شیرین کن. *مجله مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز*، انتشار آنلاین از تاریخ ۰۸ آذر ۱۳۹۶.
- [15]. Document #001-42023, 210 Solar Panel, SunPower Corporation. Web link: www.prevalingwindpower.com/sunpower.pdf, (accessed 26.06.12.).
- [16]. Masoum, M.A., H. Dehbonei, and E.F. Fuchs, Theoretical and experimental analyses of photovoltaic systems with voltage and current-based maximum power-point tracking. *IEEE Transactions on energy conversion*, Vol.17, No.4, pp. 514-522, 2002.
- [17]. Veerachary, M., T. Senjyu, and K. Uezato, Voltage-based maximum power point tracking control of PV system. *IEEE Transactions on aerospace and electronic systems*, Vol.38, No.1, pp. 262-270, 2002.
- [18]. Motahar, S. and A.A. Alemrajabi, Exergy



Thermodynamic and Environmental Analysis of Using Solar-Fuel Cell CHP Systems in Residential House of Iran

Esmaeil GhasemiKafrudi^{1*}, MohammadReza Habibi¹, Hossein Abbasali Khomeh², Zeynab Sobhani²

1. Scientific faculty member of Energy and Environment Research Center, Research Institute of Petroleum Industry, Tehran, Iran
2. Researcher of Energy and Environment Research Center, Research Institute of Petroleum Industry, Tehran, Iran

ARTICLE INFO

ORIGINAL RESEARCH

Article History:

Received: 08 April 2024

Revised: 05 May 2024

Accepted: 30 May 2024

Keywords:

Combined heat and power (CHP)

Energy and exergy analysis

Solar energy

Environmental analysis

ABSTRACT

Combined heat and power (CHP) systems are increasingly being considered for residential use in developed countries due to their reduced losses, high efficiency and ability to enhance grid security. This research investigates the energy, exergy and environmental analysis of a CHP system that uses both solar panels and fuel cells. Input data was obtained by analyzing the consumption pattern of a residential building in Tehran and the solar irradiance of the city. The study includes the extraction of individual energy and exergy efficiency diagrams for the solar panel, as well as their integration with the overall system. The results indicate that the system's efficiency is at its maximum when the fuel cell is introduced into the operating circuit. Additionally, the study examines exhaust emissions from the CHP system and compares them with the current practice of using the grid network and boiler. The findings reveal that the use of CHP systems can reduce environmental pollutants and pollutant emissions by up to 33 percent.

DOR: [20.1001.1.25885251.1403.00.0.0](https://doi.org/10.1001.1.25885251.1403.00.0.0)

How to cite this article

E. Ghasemi Kafrudi, M.R. Habibi, H. Abbasali Khomeh, Z. Sobhani, Thermodynamic and Environmental Analysis of Using Solar-Fuel Cell CHP Systems in Residential House of Iran. *Iranian Journal of Gas Engineering*. 2024; 11(1): 33 -45. (https://www.ijge.irangi.org/article_712576.html)

* Corresponding Author.

E-mail address: ghasemies@ripi.ir, (E. Ghasemi Kafrudi).

Available online 10 September 2024

25885-5251/© 2014 The Authors. Published by Iranian Gas Institute.

This is an open access article under the CC BY license. (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>)

