نشریه علمی (فصلنامه) «انرژی ایران»
دوره ۲۶، شماره۳، پاییز ۱۴۰۲، صفحه ۶۹-۸۴

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

اسماعیل قاسمی کفرودی[۱] ، محمدرضا حبیبی[۲]، حسین عباسعلی خمه[۳]، زینب سبحانی[۴]

تاریخ دریافت:
۱۴۰۱/۰۹/۰۶
تاریخ پذیرش:
۱۴۰۲/۰۲/۰۴
کلمات کلیدی:
تولید همزمان برق و حرارت
آنالیز انرژی و اگزرژی
آنالیز محیط زیستی
مدلسازی ترمودینامیکی
پیل سوختی

چکیده

امروزه سیستم‌های تولید همزمان برق و حرارت با توجه به کاهش تلفات، راندمان بالا و کمک به امنیت شبکه مورد توجه کشورهای توسعه‌یافته‌ی دنیا برای مصارف مسکونی قرار گرفته‌اند. در این پژوهش به آنالیز انرژی و اگزرژی و محیط زیستی سیستم تولید همزمان توان و حرارت با استفاده از پنل خورشیدی و پیل سوختی پرداخته شده است. برای این‌کار از الگوی مصرف یک ساختمان مسکونی در شهر تهران و تابش ساعتی خورشید در این شهر بعنوان داده‌های ورودی استفاده شده است. در این بررسی نمودارهای مربوط به راندمان انرژی و اگزرژی پنل خورشیدی بصورت 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 بیشینه‌ی خود می‌رسد. همچنین بررسی آلاینده‌های خروجی از این سیستم و مقایسه‌ی 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.

۱. کارشناسی ارشد، پردیس انرژی و محیط زیست ، پژوهشگاه صنعت نفت Sm.ghasemi89@gmail.com
۲. استادیار، پردیس انرژی و محیط زیست، پژوهشکده توسعه و بهینه‌سازی فناوری‌های انرژی، پژوهشگاه صنعت نفت
۳. کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد، واحد تهران غرب
۴. کارشناسی ارشد، پردیس انرژی و محیط زیست ، پژوهشگاه صنعت نفت

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

۱. مقدمه

نیاز به انرژی با توجه به رشد جمعیت و افزایش استانداردهای زندگی در سراسر جهان به طور پیوسته در حال افزایش است. این امر موجب شده است که جهان با فشارهای شدیدی در بازار انرژی مواجه شود. به‌عنوان مثال دهه 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، و 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 عهده دارند 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 براین، استفاده از سوخت‌های فسیلی که پایه و اساس اکثر سیستم‌های رایج تولید قدرت است منتج به تولید مقدار قابل‌توجهی از آلاینده‌های مختلف ازجمله 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 بسیار قابل اتکاتر خواهد بود. استفاده از حرارت اتلافی در فرآیند تولید قدرت می‌تواند یکی از راه‌های جلوگیری از اتلاف انرژی باشد که با نام فنّاوری تولید هم‌زمان یا تولید سه‌گانه بکار گرفته می‌شود.

استفاده از سیستم تولید هم‌زمان برق و حرارت و برودت در بخش ساختمانی بخصوص برای کشورهایی که هزینه‌ی انرژی در آن‌ها بالاست مقرون‌به‌صرفه است. در حال حاضر، یکی از جذاب‌ترین و در دسترس ترین روش‌های بهره‌وری انرژی، فنّاوری 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 فن‌آوری 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 نشان می‌دهد که جهت‌گیری نصب و موقعیت مکانی بر پایداری سیستم PV تأثیر می‌گذارد. ازون اوگلو و همکارانش یک سیستم یکپارچه را برای برآورده کردن نیازهای یک ساختمان پیشنهاد دادند [۶]. این سیستم شامل یک بخش فوتوولتائیک خورشیدی به همراه یک واحد الکترولایزر آب به همراه یک پیل سوختی برای تولید توان کمکی می‌باشد. تفاوت قدرت خروجی سیستم فوتوولتائیک و بار

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

موردنیاز به همراه نرخ هیدروژن مصرفی برای تأمین برق مازاد محاسبه‌شده است. همچنین رفتار دینامیک سیستم تحت شرایط تابشی مختلف و نیازهای بار متفاوت با داده‌های واقعی بررسی گردیده است. اتصال مستقیم الکترولایزر به سیستم فوتوولتائیک 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 الکترولیز ۶۵ ٪ گزارش‌شده است. سیستم هیدروژن–فوتوولتائیک 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 به‌کاربرده‌اند[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 کارکرده و نیازهای حرارتی و الکتریکی را با راندمان ۵۲ ٪ فراهم کرده است[۹]. بازیابی حرارتی گاز خروجی از پیل سوختی اکسید جامد توسط حسینی و همکارانش مورد مطالعه قرارگرفته 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 اگزرژی 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. فرهناک 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 کیلوولت بیشترین نسبت صرفه جویی 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 انتشارآلاینده‌ها در عملکرد یک سیستم تولید همزمان نسبت به سیستم معمولی برای مطالعه موردی (هتل) دارای آب شیرین کن پرداختند [۱۴]. نتایج این بررسی نشان می‌دهد با استفاده از سیستم تولید همزمان میزان آلاینده‌ها نسبت به سیستم معمولی به طور چشمگیری کاهش خواهد یافت.

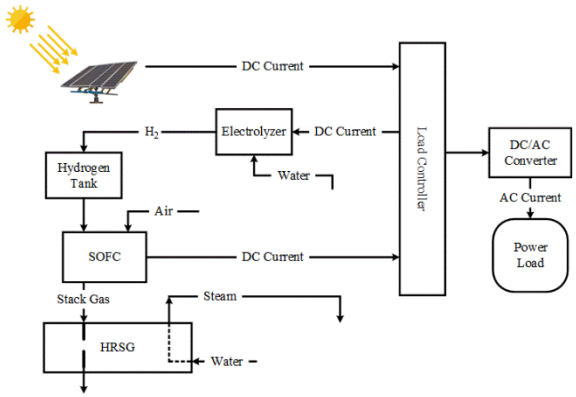
با توجه به مطالعات انجام گرفته در این زمینه خلاء مطالعه در زمینه‌ی سیستم تولید همزمان به کمک پنل خورشیدی و پیل سوختی احساس می‌شود. در این مطالعه به آنالیز انرژی و اگزرژی ساعتی و همچنین تحلیل محیط زیستی این سیستم‌ها پرداخته شده است. برای آشنایی با نحوه‌ی عملکرد این سیستم‌ها گام نخست بررسی راندمان انرژی و اگزرژی 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 تشکیل‌شده است. در این طرح سیستم فوتوولتائیک خورشیدی بخش اصلی مدول تولید الکتریسیته به شمار می‌آید. همچنین یک الکترولایزر برای تولید هیدروژن با استفاده از برق مازاد تولیدی

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

توسط سیستم خورشیدی در نظر گرفته‌شده است. هیدروژن در طول روز که مصرف برق پایین است تولیدشده 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 نظرگرفته‌شده 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 مورد نیاز 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

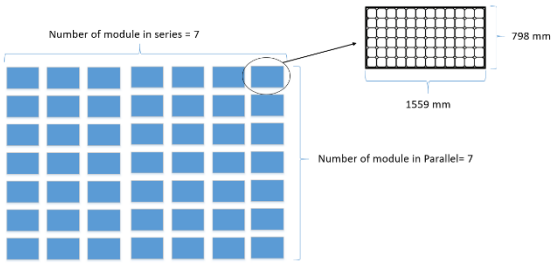
در این بخش معادلات حاکم در بخش‌های مختلف تحلیل به تفصیل آورده شده است.

➢ تحلیل انرژی و اگزرژی سیستم

در بخش انرژی و اگزرژی سیستم واحدهای مختلف بصورت مجزا بررسی شده‌اند:

- سیستم فوتوولتائیک

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



شکل ۲- شماتیک سیستم فوتوولتائیک

عملکرد این سیستم با منحنی غیرخطی ولتاژ – جریان نشان داده می‌شود. در مراجع معتبر این رابطه به‌صورت رابطه‌ی (۱) تعریف‌شده است [۱۶, ۱۷] :

$$I = I_L - I_0\left[exp\left(\frac{q(V+IR_s)}{\gamma kT_{cell}}\right)-1\right] \quad (۱)$$

که در آن q ، k ، R_s و I_0 به ترتیب شارژ الکترون، ثابت بولتزمن، مقاومت‌های سری و جریان اشباع معکوس بوده که مقادیر آن در

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

جدول (۱) آورده شده است. I_L جریان نور بوده که تابعی از تابش خورشید و دما بوده و به‌صورت رابطه‌ی (۲) تعریف می‌شود:

$$I_L = \left(\frac{G}{G_{ref}}\right)(I_{L,ref} + k_t(T_{cell} - T_{ref})) \quad (۲)$$

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 محاسبه‌شده و k_t نیز ضریب دمایی تولیدی برای جریان مدار کوتاه می‌باشد. T_{cell} نیز دمای سلول خورشیدی بوده که از رابطه‌ی (۳) بدست می‌آید.

$$T_{cell} = 0.943T_0 + 0.028G - 1.528V_{w\,in\,d} + 4.3 \quad (۳)$$

که در آن $V_{w\,in\,d}$ سرعت متوسط باد می‌باشد. همچنین در روابط بالا γ فاکتور شکل نام دارد که از رابطه‌ی (۴) بدست می‌آید.

$$\gamma = a \times NS \times NCS \quad (۴)$$

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 $V \times I$ بدست می‌آید. با رسم منحنی ولتاژ برحسب جریان نقطه‌ای وجود دارد که در آن توان بیشینه (P_{mp}) بدست می‌آید، به ولتاژ و جریان مرتبط با توان بیشینه به ترتیب V_{mp} و I_{mp} گفته می‌شود. لازم به ذکر است که طراحی‌ها به نحوی انجام می‌گیرد که سیستم فوتوولتائیک در همین نقطه کار کند.

راندمان انرژی و اگزرژی سیستم فوتوولتائیک به‌صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\eta_{PV} = \frac{P_{PV}}{\dot{E}n_{solar}} = \frac{I \times V}{G \times A_{cell}} \quad (۵)$$

$$\psi_{PV} = \frac{P_{PV}}{\dot{E}x_{solar}} = \frac{I \times V}{G \times A_{cell}\left(1 - \frac{4T_0}{3T_{sun}} + \frac{1}{3}\left(\frac{T_0}{T_{sun}}\right)^4\right)} \quad (۶)$$

همچنین راندمان انرژی و اگزرژی سیستم در نقطه‌ی بیشینه را می‌توان از روابط زیر بدست آورد:

$$\eta_{PV} = \frac{P_{mp}}{\dot{E}n_{solar}} = \frac{I_{mp} \times V_{mp}}{G \times A_{cell}} \quad (۷)$$

$$\psi_{PV} = \frac{P_{mp}}{\dot{E}x_{solar}} = \frac{I_{mp} \times V_{mp}}{G \times A_{cell}\left(1 - \frac{4T_0}{3T_{sun}} + \frac{1}{3}\left(\frac{T_0}{T_{sun}}\right)^4\right)} \quad (۸)$$

لازم به ذکر است که پارامترهای موردنیاز در جدول (۱) آورده شده است.

- واحد الکترولایزر

برای برق مازاد تولیدشده در سیستم فوتوولتائیک، $P_{in,el}$ راندمان انرژی واحد الکترولایزر برای محاسبه‌ی مقدار هیدروژن تولیدی به‌صورت رابطه‌ی (۹) تعریف می‌شود:

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

جدول ۱- مشخصات مدول فتوولتائیک [۱۵]

پارامتر (واحد)	مقدار
جریان مدار کوتاه، $I_{SC}(A)$	۵/۷۵
ولتاژ مدار باز، $V_{OC}(V)$	۴۷/۷
جریان بیشینه، $I_{mp}(A)$	۵/۲۵
ولتاژ بیشینه، $V_{mp}(V)$	۴۰
مساحت هر آرایه، (m^2)	۱/۲۴۴
تعداد سلول در هر مدول، NCS	۷۲
تعداد مدول‌های سری شده، NS	۷
تعداد مدول‌های موازی شده، NP	۷
ضریب دمایی جریان مدار کوتاه، $(A^{\circ}C^{-1})$	۳.۵*۱۰-۳
ضریب دمایی ولتاژ مدار باز، $(V^{\circ}C^{-1})$	-۱.۳۶*-۱۰
شرایط مرجع	
تابش کلی، $G_{ref}(m^{-2})$	۱۰۰۰
سرعت باد، $(m\ s^{-2})$	۵
دمای محیط،$T_a(°C)$	۲۵
سایر فرضیات	
شارژ الکترون،q	۱.۶۰۹*۱۰-۱۹
مقاومت‌های سری،$R_s(\Omega)$	۰/۰۲۷۷
ثابت بولتزمن، $k(J/K)$	۱.۳۸۱*۱۰-۲۳
دمای خورشید، $T_{sun}(K)$	۶۰۰۰

$$\eta_{el} = \frac{\dot{m}_{H_2} LHV_{H_2}}{P_{in,el}} \quad (۹)$$

که در آن LHV_{H_2} ارزش حرارتی پائین هیدروژن بوده که مقدار آن ۳۳/۳۳ کیلووات ساعت بر کیلوگرم گزارش‌شده است. همچنین طبق مراجع یک الکترولایزر دما پائین برای سیستم انتخاب‌شده که علت آن پاسخ سریع‌تر به تغییرات بار برای پیل سوختی می‌باشد. راندمان این واحد طبق مطالعات کلارک و همکارانش ۰/۶۵ در نظر گرفته‌شده است [۷].

- پیل سوختی اکسید جامد

این واحد در مطالعه‌ی حاضر بر اساس طراحی لوله‌ای انجام‌گرفته و ابعاد و مواد سازنده‌ی پیل سوختی از داده‌های ارائه‌شده 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 انجام‌گرفته است [۱۹]. واحد پیل سوختی از هیدروژن تولیدی در واحد الکترولایزر تغذیه‌شده و

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

زمانی که برق موردنیاز بیش از مقدار تولیدی در سیستم فوتوولتائیک باشد به‌عنوان واحد تولید قدرت ثانویه وارد مدار می‌شود. این هیدروژن تولیدی تحت عنوان یک آنود، با یون‌های اکسیژن به‌عنوان آند 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 به‌صورت رابطه‌ی (۱۰) محاسبه می‌شود:

$$\dot{W}_{net-SOFC} = \dot{W}_{SOFC} - \dot{W}_{FWP} - \dot{W}_{consumption} \quad (۱۰)$$

که در آن کار مصرفی توسط پمپ آب در مبدل حرارتی، کارهای 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 اگزرژی پیل سوختی از روابط زیر بدست می‌آید:

$$\eta_{PV} = \frac{\dot{W}_{net-SOFC}}{\dot{m}_{H_2,SOFC} LHV_{H_2}} \quad (۱۱)$$

$$\psi_{PV} = \frac{\dot{W}_{net-SOFC}}{\dot{m}_{H_2,SOFC} ex_{H_2}} \quad (۱۲)$$

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]

پارامتر (واحد)	مقدار
دمای هوای ورودی، $(°C)$	۲۵
دمای خروجی از پیل، $(°C)$	۹۰۰
مساحت سطح واکنش، (cm^2)	۸۳۴
چگالی جریان سلول، (A/cm^2)	۰/۳
ضریب استفاده از سوخت	۰/۸۵
تعداد سلول‌ها	۱۵

- راندمان کلی سیستم

راندمان کلی سیستم با دو سناریوی مختلف بدست می‌آید. حالت اول زمانی است که برق موردنیاز توسط سیستم فوتوولتائیک تأمین‌شده و برق مازاد به‌صورت هیدروژن تولیدی در الکترولایزر ذخیره شود. در این حالت راندمان کلی انرژی و اگزرژی سیستم برابر است با :

$$\eta_{total} = \frac{P_{demand} + \dot{m}_{H_2} LHV}{\dot{E}n_{solar}} \quad (۱۳)$$

$$\psi_{total} = \frac{P_{demand} + \dot{m}_{H_2} ex_{H_2}}{\dot{E}x_{solar}} \quad (۱۴)$$

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

$$\eta_{PV} = \frac{\dot{W}_{SOFC} + \dot{Q}_{evap}}{\dot{m}_{fuel} LHV} \quad (۱۵)$$

$$\psi_{PV} = \frac{\dot{W}_{SOFC} + \dot{Q}_{evap}\left(1 - T_0/T_{evap}\right)}{\dot{m}_{H_2,SOFC} ex_{H_2}} \quad (۱۶)$$

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

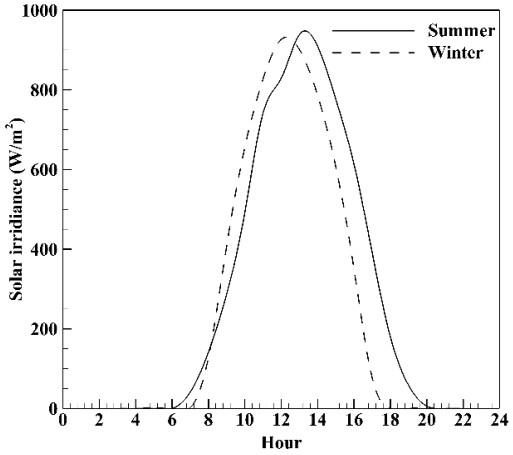
➢ فرضیات و الگوریتم حل

در مطالعه‌ی حاضر برای تحلیل انرژی و اگزرژی فرضیات زیر در نظر گرفته‌شده است [۲۰]:

- سیستم ترکیبی در شرایط پایا عمل می‌کند.
- داده‌های ارائه‌شده 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 ارائه‌شده در جدول (۱) استفاده‌شده است. الکترولیت پیل سوختی با اکسید جامد استبلایز شده با زیرکونیا ساخته‌شده 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 در نظر گرفته شده که این مقدار در محاسبه‌ی راندمان سیستم لحاظ شده است.

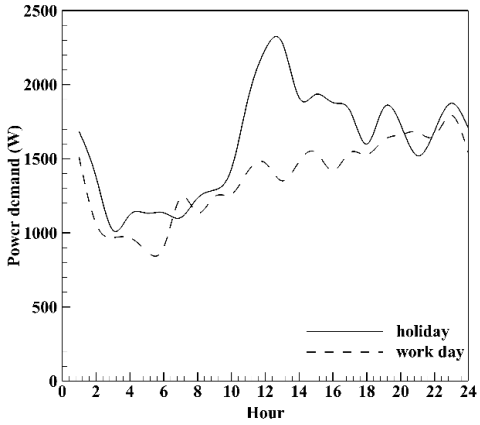
در شکل (۳) داده‌های مربوط به منحنی ساعتی تابش خورشید در شهر تهران آورده شده است. لازم به ذکر است که در این مطالعه از داده‌های ارائه شده توسط پژوهشگاه صنعت نفت اندازه‌گیری شده برای شهر تهران در سال ۲۰۱۳ استفاده شده است [۲۰]. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود در تابستان بین ساعت ۲۰ تا ۵ صبح تابشی وجود نداشته 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 **Error! Reference source not found.** مصرف برق ساعتی برای یک ساختمان مسکونی 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.

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



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 فرترن به شرح زیر است:

۱- بدست 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- بدست آوردن مقدار هیدروژن تولیدی توسط الکترولایزر با استفاده از رابطه‌ی (۹)

۴- محاسبه‌ی راندمان انرژی کلی سیستم

الف) در ساعات استفاده از سیستم فوتوولتائیک با رابطه‌ی (۱۳)

ب) در ساعات استفاده از واحد پیل سوختی با کمک رابطه‌ی (۱۵)

۵- محاسبه‌ی راندمان اگزرژی کلی سیستم

الف) در ساعات استفاده از سیستم فوتوولتائیک با رابطه‌ی (۱۴)

ب) در ساعات استفاده از واحد پیل سوختی با رابطه‌ی (۱۶)

- **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 بدست 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 معرفی‌شده‌اند.

$$Em_{CON} = Em_{CON}^{Ele} + Em_{CON}^{Gas} \quad (۱۷)$$

$$Em_{CHP} = Em_{PV-FC}^{Ele} + Em_{PV-FC}^{Gas} \quad (۱۸)$$

که در آن EmCON و EmCHP میزان آلاینده‌های منتشرشده توسط سیستم رایج و سیستم فوتوولتائیک-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:

$$Em_{CON}^{Ele} = E_{ele} \times EmI_{ele} \quad (۱۹)$$

$$Em_{CON}^{Gas} = E_{CON}^{gas} \times EmI_{gas} \quad (۲۰)$$

$$Em_{PVFC}^{Ele} = (E_{ele} - E_{ele-PVFC}) \times EmI_{ele} \quad (۲۱)$$

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

$$Em_{PVFC}^{Gas} = E_{PVFC}^{gas} \times EmI_{gas} \quad (۲۲)$$

در این معادلات 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 تولید هم‌زمان و EmI_{ele} و EmI_{gas} 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 بصورت زیر نوشته می‌شود.

$$ERR = \frac{Em_{CON} - Em_{PV-FC}}{Em_{CON}} \times 100 \quad (۲۳)$$

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

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

٤. نتایج و بحث

➢ اعتبارسنجی

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) بدست 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 کاهش‌یافته 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 سان‌پاور دارد.

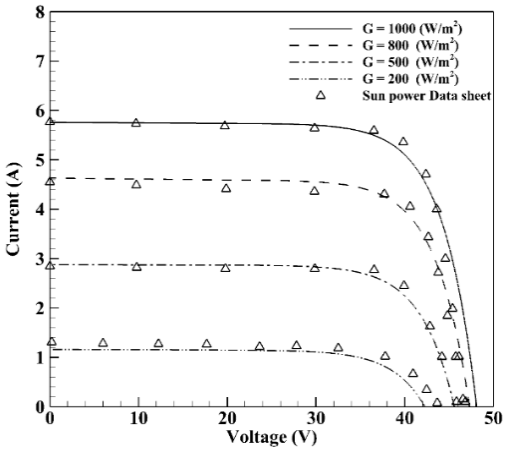
➢ انرژی و اگزرژی

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 فوتوولتائیک یک نقطه‌ی کار بیشینه داشته که بعد از آن با تغییر ولتاژ توان خروجی به‌شدت 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 بدست آمده در این بخش نیز با داده‌های ارائه‌شده توسط شرکت سان پاور مقایسه شده و نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که در

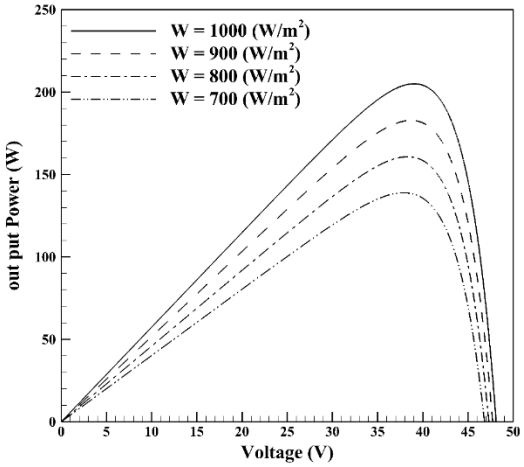
[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-12]

شرایط استاندارد آزمون برای تابش خورشیدی ۱۰۰۰ وات بر متر مربع توان بیشینه در حدود ۳ درصد تفاوت با داده‌های شرکت داشته که برای مدل‌سازی حاضر قابل‌قبول است.

همچنین در شکل (۷) و شکل (۸) به ترتیب راندمان انرژی و اگزرژی 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 اگزرژی در مقدار بیشینه‌ی خود مقدار بالاتری را از راندمان انرژی دارد. این روند را می‌توان با معادلات (۷) و (۸) توضیح داد؛ جایی که تنها تفاوت دو رابطه وجود تأثیر دمای خورشید در معادله‌ی اگزرژی است که باعث افزایش آن در مقایسه با راندمان انرژی می‌شود.

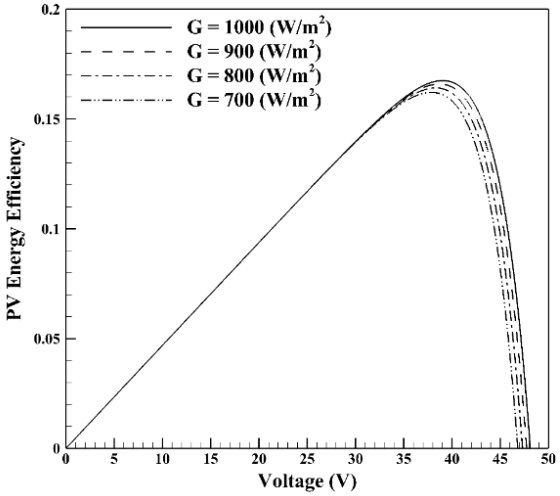


شکل ۵- اعتبارسنجی سیستم خورشیدی با مقایسه‌ی نمودار ولتاژ-جریان با داده‌های موجود در برگ‌داده‌ی شرکت سان‌پاور [۱۵]

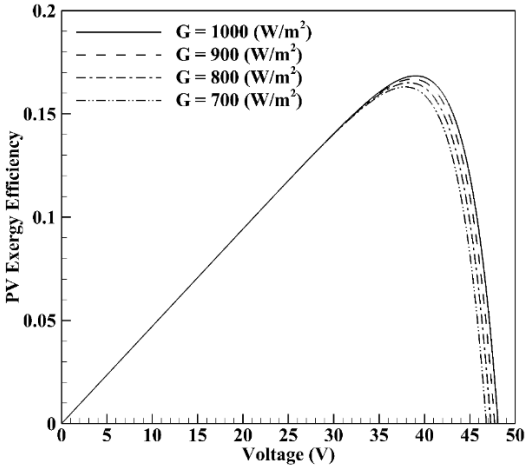


شکل ۶- تاثیر تابش خورشید در منحنی توان- ولتاژ

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



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

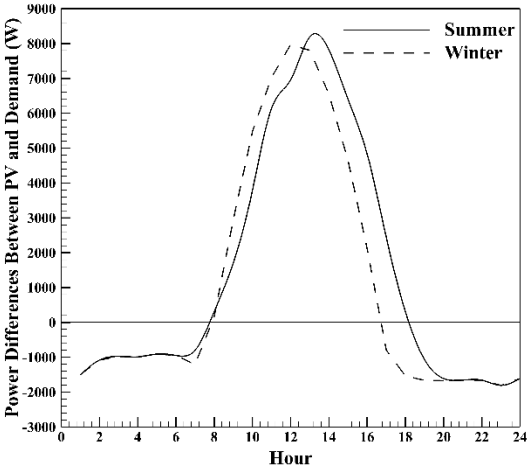


شکل ۸- نمودار راندمان اگزرژی بر حسب ولتاژ برای انرژی‌های تابشی مختلف

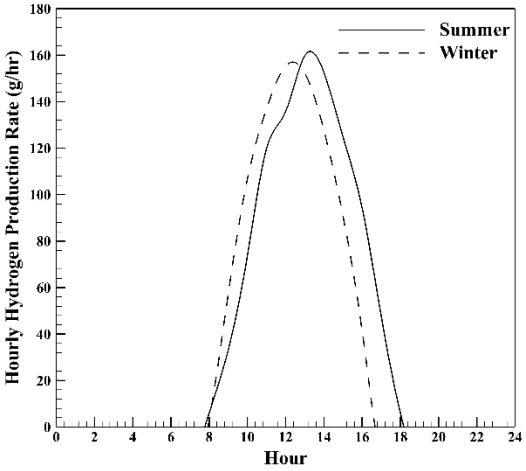
همان‌طور که اشاره شد برای استفاده از منحنی تابش خورشید برحسب ساعات شبانه‌روز از داده‌های موجود برای شهر تهران در دو فصل تابستان و زمستان استفاده شده تا به نوعی بیشترین و کمترین تابش خورشید در محاسبات لحاظ گردد. در شکل (۹) تفاضل برق تولیدی توسط سیستم خورشیدی از برق موردنیاز ساختمان‌ها در شهر تهران آورده 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 اوقاتی که تابش مازاد وجود دارد این انرژی به‌عنوان ورودی به همراه آب به الکترولایزر منتقل‌شده و هیدروژن تولید می‌شود، تا در مواقعی که به برق نیاز است و تابش خورشید در دسترس نیست با انتقال هیدروژن به پیل سوختی برق موردنیاز ساختمان تأمین گردد.

در شکل (۱۰) نرخ هیدروژن تولیدی توسط الکترولایزر در ساعات مختلف شبانه‌روز در شهر تهران نشان داده‌شده است. همانطورکه مشاهده می‌شود روند این نمودار مطابقت روند **Error! Reference source not found.**) بوده و بیشینه‌ی نرخ تولید هیدروژن مربوط به زمانی است که تفاضل انرژی تابشی با برق موردنیاز بیشینه است. همچنین واضح است که هیدروژن بیشتری در فصل تابستان تولید می‌شود که با محاسبه‌ی سطح زیر منحنی در شکل (۱۰) بدست می‌آید.

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



شکل ۹- تفاوت برق تولیدی توسط سیستم خورشیدی و برق موردنیاز ساختمان در دو فصل تابستان و زمستان برای شهر تهران



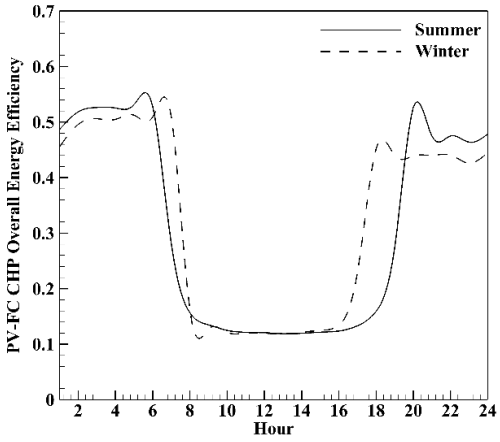
شکل ۱۰- تفاوت برق تولیدی توسط سیستم خورشیدی و برق موردنیاز ساختمان در دو فصل تابستان و زمستان برای شهر تهران

راندمان کلی انرژی و اگزرژی سیستم با استفاده از روابط (۱۳) تا (۱۶) محاسبه شده و در اشکال (۱۱) و (۱۲) نشان داده شده است. با وجودی که هر دو بازده در فصول مورد مطالعه روند یکسانی دارند، همان‌طور که مشاهده می‌شود بازدهی انرژی از اگزرژی بیشتر است. گراف‌های راندمانی نشان می‌دهند 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 بدست می‌آید که مقدار برق مازاد بیشینه است. این دو شکل در تابستان بین ساعات ۷ تا ۱۹ کمترین راندمان انرژی و اگزرژی کل را نشان می‌دهند که علت آن این است که در این زمان برق مازاد صرف تولید هیدروژن در الکترولایزر شده و ذخیره می‌گردد. همچنین در زمستان این مقدار کمینه به محدوده ساعت ۸ صبح تا ۱۷ شیفت می‌شود.

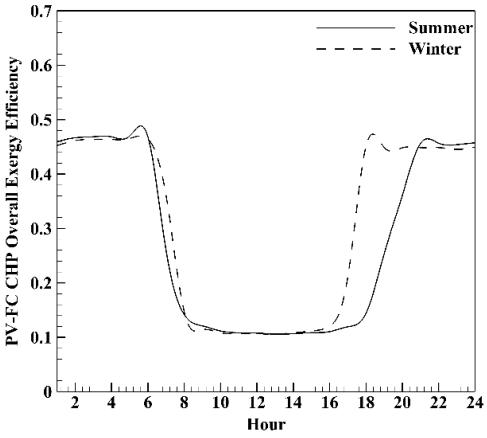
با توجه به شکل (۷) مقدار بیشینه‌ی راندمان انرژی سلول خورشیدی در حدود ۱۷ درصد است، همچنین تابش خورشیدی ۱۰۰۰ وات بر مترمربع در نظر گرفته‌شده است. این بدین معنی است که تنها ۱۷ درصد انرژی خورشیدی جذب‌شده در سلول‌های فوتوولتائیک به انرژی الکتریکی تبدیل می‌شود. در ساعاتی که میزان برق تولیدی توسط انرژی خورشیدی بیشتر از برق مورد نیاز مصرفی است (شکل (۹)) برق مازاد تولیدی با ورود به الکترولایزر (که بازدهی در حدود ۶۵ درصد دارد) و صرف تولید هیدروژن گشته بنابراین در این ساعات ورودی سیستم که تابش خورشید بوده به میزان بیشینه‌ی خود رسیده اما خروجی سیستم تنها برق مصرفی موردنیاز و هیدروژن تولیدشده در الکترولایزر است، به همین دلیل در این ساعات بازدهی انرژی و اگزرژی به میزان کمینه‌ی خود می‌رسد. به همین ترتیب تبدیل هیدروژن تولیدی در

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

الکترولایزر به برق مصرفی در ساعات اولیه و آخرین شبانه‌روز که تابش خورشید به‌عنوان ورودی سیستم وجود ندارد باعث افزایش چشمگیر انرژی و اگزرژی سیستم گردیده که این افزایش در اشکال زیر به‌درستی دیده می‌شود.



شکل ۱۱- راندمان کلی انرژی سیستم



شکل ۱۲- راندمان کلی اگزرژی سیستم

➢ محیط زیستی

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. ازاین‌رو در مقادیر معادل گازهای گلخانه‌ای و آلاینده‌های منتشرشده توسط هر دو سیستم موردبحث و نسبت کاهش گازهای گلخانه‌ای و آلاینده‌ها برای ساختمان مفروض ارائه شده است. لازم به ذکر است که سیستم تولید همزمان توانایی تامین تمام برق و حرارت مورد نیاز برای این واحد مسکونی را نداشته و مقدار مازاد مورد نیاز 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 ۰مشاهده 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.

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

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

جدول ۴- میزان آلاینده‌های منتشرشده برای دو سیستم موردبحث

آلاینده	کیلوگرم آلاینده‌ی تولیدشده در نیروگاه برق		کیلوگرم آلاینده‌ی تولیدشده از طریق گاز		ERR (%)
	Con	PVFC	Con	PVFC	
CO_2	۱۰۷۹۰	۶۸۰	۳۳۷۷۰	۲۹۱۴۷	۳۳
CO	۶	۰/۳	۲۰	۱۷	۳۲
NO_x	۷	۰/۵	۷۱	۶۱	۲۱
SO_x	۵۰	۳	۰	۰	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 شد. لازم به ذکر است که در بخش تحلیل اقتصادی از یک ساختمان نمونه در شهر تهران استفاده شد.

در بخش تحلیل انرژی و اگزرژی سیستم نمودارهای مرتبط به واحدهای مختلف تشکیل‌دهنده‌ی آن برحسب ساعات کارکرد آورده شد. 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 الکترولایزر است با ورود پیل سوختی به مدار در حوالی ساعت ۱۸ تا ۶ صبح راندمان به‌صورت چشمگیری افزایش می‌یابد. لازم به ذکر است که راندمان کلی دستگاه در حدود ۵۵ درصد بدست آمده که نسبت به راندمان سیستم رایج (حدود ۳۰ تا ۴۰ درصد) بالاتر می‌باشد. اما در بخش تحلیل زیست محیطی کفه‌ی ترازو کاملاً به سمت سیستم تولید هم‌زمان سنگینی می‌کند. به‌طوری‌که استفاده از این سیستم‌ها کاهش ۳۳ درصدی آلاینده‌های مخرب محیط‌زیست و گازهای آلاینده را به همراه دارد.

منابع

[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.
[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.

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

[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. I*nternational Journal of Energy Research*, Vol.37, No.5, pp. 426-434, 2013.

[۱۱] پورمحمد م. اشجاری م. و خسروشاهی ع.، بررسی انرژی و اگزرژی 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] فرهناک 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 ح.، برآورد کاهش انتشارآلاینده‌ها در عملکرد یک سیستم تولید همزمان نسبت به یک سیستم معمولی برای مطالعه موردی (هتل) دارای اب 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.prevailingwindpower.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 voltageand 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 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.

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