

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

چکیده

تاریخ دریافت:

۱۴۰۱/۰۹/۰۶

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۲/۰۲/۰۴

کلمات کلیدی:

تولید همزمان برق و حرارت
آنالیز انرژی و انرژی
آنالیز محیط زیستی
مدلسازی ترمودینامیکی
پیل سوختی

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 محیط زیستی 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 بعنوان داده‌های ورودی استفاده شده است. در این بررسی نمودارهای مربوط به راندمان انرژی و انرژی پیل 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، پژوهشگاه 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

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. به عنوان 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 می بردند. محدودیت های موجود در سیستم تولید برق سنتی و عرضه و تحویل، رقابت های جهانی، نگرانی های پیرامون تغییر شرایط آب و هوایی، خرابی زیرساخت های شبکه ی برق رسانی، و مسائل امنیتی از عوامل دیگر مؤثر بر زمینه ی تشدید فشار بر وضعیت انرژی هستند که بهداشت محیط زیست، و سلامت انسان را تهدید کرده و پیامدهای اقتصادی متعددی به دنبال دارد. بنابراین باید بهینه سازی گسترده ای در مصرف انرژی با بهبود سیستم های مصرف کننده، بهبود طراحی ساختمان ها و پیشرفت منابع پایدار و تجدید پذیر صورت گیرد.

ساختمان ها، در بخش های مسکونی، عمومی، اقتصادی حدود ۳۲ درصد انرژی مصرفی را بر عهده دارند که این عدد برای کشورهای عضو آژانس بین المللی انرژی به ۴۰ درصد نیز می رسد [۱]. که این مصارف شامل برق، گرمایش، سرمایش، و آب گرم مصرفی می باشد. این بارها معمولاً از طریق شبکه ی برق سراسری یا به کمک بویلرهای خانگی که از نفت و گاز تغذیه می شوند، تأمین می شوند. اما نیروگاه های حرارتی (با کمک موتورهای احتراقی یا توربین گاز و بخار) با بازده کم خود شناخته می شوند که در آن متوسط بهره وری برای تولید برق کمتر از ۴۰ درصد می باشد [۲]. همچنین برای بارهای حرارتی، بویلرهای رایج خانگی راندمانی در حدود ۷۰ درصد را دارند [۳]. علاوه بر این، استفاده از سوخت های فسیلی که پایه و اساس اکثر سیستم های رایج تولید قدرت است منتج به تولید مقدار قابل توجهی از آلاینده های مختلف از جمله گازهای گلخانه ای می گردد. از طرف دیگر ذخایر نفت جهانی شروع به کاهش بی سابقه ای کرده که نرخ تولید آن پاسخگوی بهره برداری و نیاز فعلی نیست. بنابراین بهینه سازی مصرف سوخت در بخش مسکونی لازم به نظر می رسد به همین جهت تولید جداگانه ی حرارت و الکتریسیته از نظر انرژی و محیط زیستی 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 می تواند یکی از راه های جلوگیری از اتلاف انرژی باشد که با نام فناوری تولید هم زمان یا تولید سه گانه بکار گرفته می شود.

استفاده از سیستم تولید هم زمان برق و حرارت و برودت در بخش ساختمانی بخصوص برای کشورهایی که هزینه ی انرژی در آن ها بالاست مقرون به صرفه است. در حال حاضر، یکی از جذاب ترین و در دسترس ترین روش های بهره وری انرژی، فناوری CCHP است. کاهش تقاضای کل انرژی، مستقل بودن سوخت، افزایش رقابت در تجارت، کاهش انتشار گازهای گلخانه ای و بهبود شبکه برق، برخی از مزایای این فن آوری است [۴]. سیستم های تولید هم زمان انواع مختلفی داشته و با مکانیزم های متعددی از قبیل توربین گاز، توربین بخار، میکروتوربین ها، موتورهای احتراق داخلی و ... کار می کنند. یک ایده ی نو در این زمینه استفاده از سلول خورشیدی به همراه پیل سوختی برای تولید هم زمان توان و حرارت می باشد که با توجه به این تجهیزات کمترین آلاینده ی 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 محیط زیستی استفاده از سیستم انرژی تجدید پذیر بر بام ساختمان های هنگ کنگ را در مطالعه ای گزارش دادند [۵]. این سیستم که شامل ۱۲۶ پنل خورشیدی به صورت سری و موازی بوده به شبکه برق سراسری متصل شده و توان خروجی سالانه ای معادل ۲۸۱۵۴ کیلووات ساعت دارد. ایشان دوره ی بازپرداخت انرژی و گازهای گلخانه ای این سیستم را به ترتیب ۷/۳ و ۵/۲ سال گزارش دادند. همچنین نتایج نشان می دهد که جهت گیری نصب و موقعیت مکانی بر پایداری سیستم PV تأثیر می گذارد. 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 می باشد. تفاوت قدرت خروجی سیستم فوتوولتائیک و بار

مورد نیاز 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 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 تولید شده توسط این سیستم است که به‌طور مستقیم به الکترولایزر منتقل می‌شود. بهره‌وری الکترولایزر PEM تحت تأثیر تغییرات سولوی به دلیل تغییرات بار تکراری، و راندمان کلی الکترولایزر ۶۵٪ گزارش شده 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 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٪ 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.

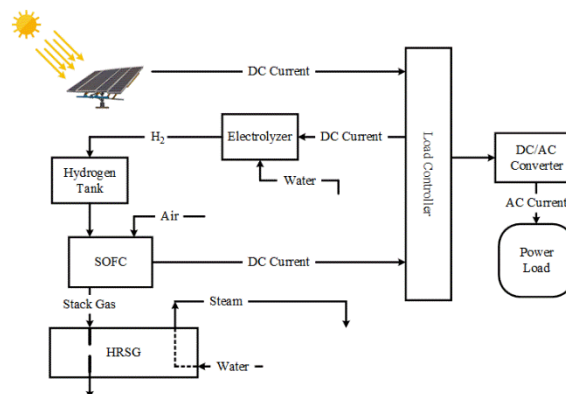
در کشور ما نیز مطالعاتی در این زمینه صورت گرفته است که برخی از این مطالعات در ادامه آورده شده است. پورمحمد و همکارانش به بررسی انرژی و انرژی یک سیستم تولید هم‌زمان گرما و توان با استفاده از میکروتوربین پرداخته‌اند [۱۱]. نتایج این بررسی نشان می‌دهد که افزودن ریکوپراتور باعث افزایش قابل ملاحظه در بازده 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 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 انتشار آلاینده‌ها 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 پیل 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 فوتوولتائیک خورشیدی بخش اصلی مدول تولید الکتریسیته به شمار می‌آید. همچنین یک الکترولایزر 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 به عنوان ورودی به پیل سوختی در نظر گرفته می شود. 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 درجه سانتی گراد) مستقیماً به مبدل حرارتی برای تولید بخار وارد شده و بخار تولیدی هم برای تهیه ی بار گرمایی مورد نیاز مجموعه استفاده می گردد. لازم به ذکر است که مبدل حرارتی تنها در شرایطی که پیل سوختی در حال کار است وارد مدار سیستم می گردد.



شکل ۱- شماتیک سیستم تولید همزمان

۳. معادلات حاکم

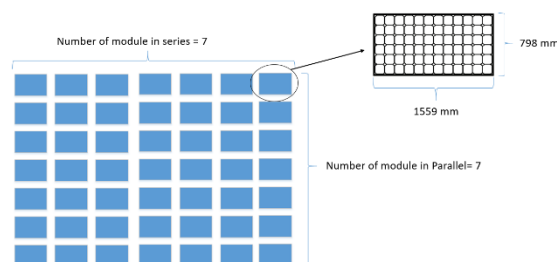
در این بخش معادلات حاکم در بخش های مختلف تحلیل به تفصیل آورده شده است.

➤ تحلیل انرژی و انرژی سیستم

در بخش انرژی و انرژی سیستم واحدهای مختلف بصورت مجزا بررسی شده اند:

• سیستم فوتوولتائیک

سیستم فوتوولتائیک از تعدادی سلول خورشیدی که به صورت سری و موازی بسته شده اند تشکیل شده است. مشخصات ابتدایی این سیستم با استفاده از داده های موجود در مرجع [۱۵] در شکل (۲) نشان داده شده است.



شکل ۲- شماتیک سیستم فوتوولتائیک

عملکرد این سیستم با منحنی غیرخطی ولتاژ - جریان نشان داده می شود. در مراجع معتبر این رابطه به صورت رابطه ی (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 q ، k ، R_s و I_0 به ترتیب شارژ الکترون، ثابت بولتزمن، مقاومت های 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 رابطه (۲) تعریف می شود:

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

که در آن G و G_{ref} به ترتیب تابش خورشیدی و تابش خورشیدی در شرایط طراحی هستند. همچنین $I_{L,ref}$ بر مبنای داده های سازنده برای مدار کوتاه و جریان نقطه ی بیشینه محاسبه شده و k_t نیز ضریب دمایی تولیدی برای جریان مدار کوتاه می باشد. T_{cell} نیز دمای سلول خورشیدی بوده که از رابطه (۳) بدست می آید.

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

که در آن V_{wind} سرعت متوسط باد می باشد. همچنین در روابط بالا γ فاکتور شکل نام دارد که از رابطه (۴) بدست می آید.

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

که در این رابطه a ، NS و NCS به ترتیب فاکتور تکمیل، تعداد سلول های متصل در هر مدول و تعداد مدول های متصل در هر سری می باشد.

قدرت خروجی سلول فوتوولتائیک بر اساس معادله ی غیرخطی رابطه ی (۱) از رابطه ی $V \times I$ بدست می آید. با رسم منحنی ولتاژ برحسب جریان نقطه ای وجود دارد که در آن توان بیشینه (P_{mp}) بدست می آید، به ولتاژ و جریان مرتبط با توان بیشینه به ترتیب V_{mp} و I_{mp} گفته می شود. لازم به ذکر است که طراحی ها به نحوی انجام می گیرد که سیستم فوتوولتائیک در همین نقطه کار کند. راندمان انرژی و انرژی سیستم فوتوولتائیک به صورت زیر نوشته می شود:

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

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

همچنین راندمان انرژی و انرژی سیستم در نقطه ی بیشینه را می توان از روابط زیر بدست آورد:

$$\eta_{PV} = \frac{P_{mp}}{\dot{E}n_{solar}} = \frac{I_{mp} \times V_{mp}}{G \times A_{cell}} \quad (7)$$

$$\psi_{PV} = \frac{P_{mp}}{\dot{E}x_{solar}} = \frac{I_{mp} \times V_{mp}}{G \times A_{cell} \left(1 - \frac{4T_0}{3T_{sun}} + \frac{1}{3} \left(\frac{T_0}{T_{sun}} \right)^4 \right)} \quad (8)$$

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

• واحد الکتروولایزر

برای برق مازاد تولیدشده در سیستم فوتوولتائیک، $P_{in,el}$ راندمان انرژی واحد الکتروولایزر برای محاسبه ی مقدار هیدروژن تولیدی به صورت رابطه ی (۹) تعریف می شود:

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، $(A^\circ C^{-1})$	۳-۳.۵*۱۰
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، $T_a(^{\circ}C)$	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

$$\eta_{el} = \frac{\dot{m}_{H_2} LHV_{H_2}}{P_{in,el}} \quad (9)$$

که در آن LHV_{H_2} ارزش حرارتی پائین هیدروژن بوده که مقدار آن ۳۳/۳۳ کیلووات ساعت بر کیلوگرم گزارش شده است. همچنین طبق مراجع یک الکترولایزر 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 ۰/۶۵ 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 الکترولایزر تغذیه شده و

زمانی که برق مورد نیاز بیش از مقدار تولیدی در سیستم فوتوولتائیک باشد به عنوان واحد تولید قدرت ثانویه وارد مدار می شود. این هیدروژن تولیدی تحت عنوان یک آنود، با یون های اکسیژن به عنوان آند یک واکنش الکتروشیمیایی برقرار می کند. لازم به ذکر است نرخ مصرف هیدروژن به چگالی جریان در پیل سوختی بستگی دارد. قدرت الکتریکی خالص خروجی پیل سوختی به صورت رابطه ی (۱۰) محاسبه می شود:

$$\dot{W}_{net-SOFC} = \dot{W}_{SOFC} - \dot{W}_{FWP} - \dot{W}_{consumption} \quad (10)$$

که در آن کار مصرفی توسط پمپ آب در مبدل حرارتی، کارهای مصرفی داخلی پیل سوختی شامل دمنده ی هوا و سیستم کنترلی و ... می باشد که طبق مرجع [۱۹] مجموعاً ۴ درصد کار کلی را تشکیل می دهد.
بازده انرژی و اگزرژی پیل سوختی از روابط زیر بدست می آید:

$$\eta_{PV} = \frac{\dot{W}_{net-SOFC}}{\dot{m}_{H_2,SOFC} LHV_{H_2}} \quad (11)$$

$$\psi_{PV} = \frac{\dot{W}_{net-SOFC}}{\dot{m}_{H_2,SOFC} ex_{H_2}} \quad (12)$$

لازم به ذکر است که داده های 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، ($^{\circ}C$)	۲۵
دمای خروجی از پیل، ($^{\circ}C$)	۹۰۰
مساحت سطح واکنش، (cm^2)	۸۳۴
چگالی جریان سلول، (A/cm^2)	۰/۳
ضریب استفاده از سوخت	۰/۸۵
تعداد سلول ها	۱۵

• راندمان کلی سیستم

راندمان کلی سیستم با دو سناریوی مختلف بدست می آید. 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. در این حالت راندمان کلی انرژی و اگزرژی سیستم برابر است با:

$$\eta_{total} = \frac{P_{demand} + \dot{m}_{H_2} LHV}{\dot{E}n_{solar}} \quad (13)$$

$$\psi_{total} = \frac{P_{demand} + \dot{m}_{H_2} ex_{H_2}}{\dot{E}x_{solar}} \quad (14)$$

در ساعاتی از شب و و زمان هایی که سیستم فوتوولتائیک کار نمی کند راندمان کلی انرژی و اگزرژی سیستم برابر است با:

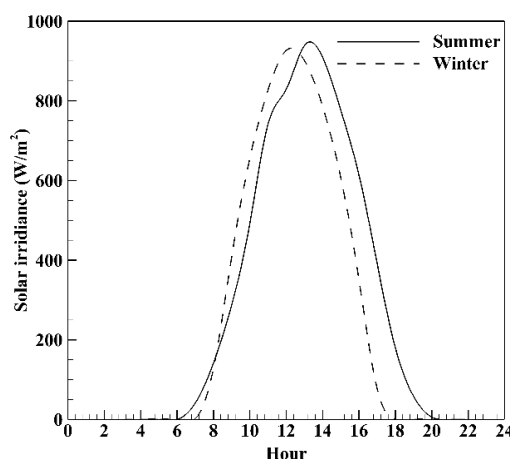
$$\eta_{PV} = \frac{\dot{W}_{SOFC} + \dot{Q}_{evap}}{\dot{m}_{fuel} LHV} \quad (15)$$

$$\psi_{PV} = \frac{\dot{W}_{SOFC} + \dot{Q}_{evap}(1 - T_0/T_{evap})}{\dot{m}_{H_2,SOFC} ex_{H_2}} \quad (16)$$

➤ فرضیات و الگوریتم حل

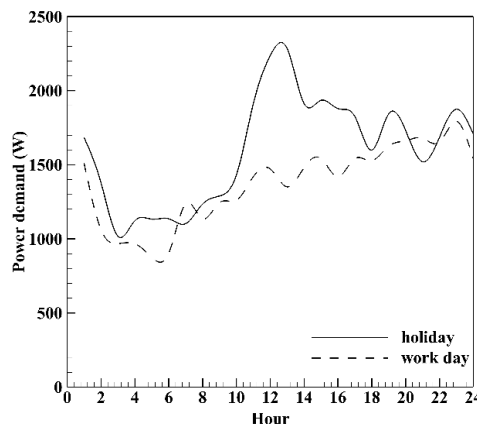
در مطالعه‌ی حاضر برای تحلیل انرژی و انرژی‌های زیر در نظر گرفته شده است [۲۰]:

- 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 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.



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 نرم افزار فترن به شرح زیر است:

- ۱- بدست آوردن نمودار ولتاژ-جریان با استفاده از روابط (۱) تا (۴)
- ۲- محاسبه راندمان انرژی و انرژی با استفاده از روابط (۵) و (۶)
- ۳- بدست آوردن مقدار هیدروژن تولیدی توسط الکترولایزر با استفاده از رابطه (۹)
- ۴- محاسبه راندمان انرژی کلی سیستم
- الف) در ساعات استفاده از سیستم فوتوولتائیک با رابطه (۱۳)
- ب) در ساعات استفاده از واحد پیل سوختی با کمک رابطه (۱۵)
- ۵- محاسبه راندمان انرژی کلی سیستم
- الف) در ساعات استفاده از سیستم فوتوولتائیک با رابطه (۱۴)
- ب) در ساعات استفاده از واحد پیل سوختی با رابطه (۱۶)

➤ تحلیل زیست محیطی

در کنار بحث های اقتصادی، تأثیرات زیست محیطی یک سیستم نیز در ارزیابی استفاده از آن نقش مهمی را ایفا می کند. به همین منظور در ادامه روابط حاکم برای بدست آوردن میزان آلاینده های منتشر شده از هر دو سیستم رایج استفاده شده در ساختمان ها (خرید برق از شبکه سراسری و استفاده از بویلر) و سامانه ی تولید هم زمان برق و حرارت معرفی شده اند.

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

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

که در آن Em_{CON} و Em_{CHP} میزان آلاینده های منتشر شده توسط سیستم رایج و سیستم فوتوولتائیک-پیل سوختی است که برابر با مجموع آلاینده های ناشی از تولید برق و گاز می باشد. برای مشخص شدن میزان تولید هر یک از آلاینده ها در طی فرآیند از روابط زیر استفاده می شود:

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

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

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

$$Em_{PVFC}^{gas} = E_{PVFC}^{gas} \times EmI_{gas} \quad (22)$$

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_{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 ذکر شده 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.

$$ERR = \frac{Em_{CON} - Em_{PV-FC}}{Em_{CON}} \times 100 \quad (23)$$

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]	$EmI_{ele} \left(\frac{kg}{kwh} \right)$ [۲۳]
CO_2	۱/۹۹۸	۰/۷۱۵
CO	۰/۰۰۱۲	۰/۰۰۰۴
NO_x	۰/۰۰۴۲	۰/۰۰۰۵
SO_x	-	۰/۰۰۳۳

۴. نتایج و بحث

➤ اعتبارسنجی

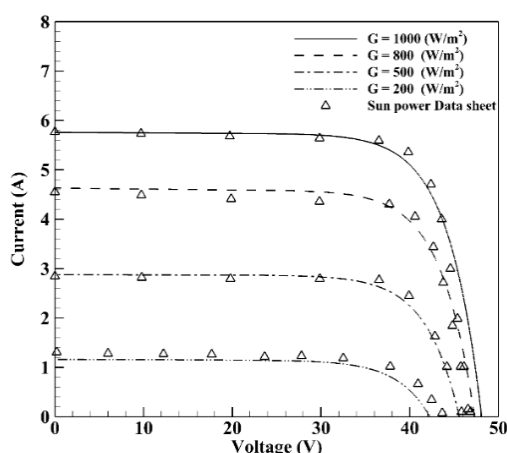
برای حصول اطمینان از صحت کد نوشته شده در شکل (۵) نمودار جریان-ولتاژ ارائه شده در برگ داده با کد نوشته شده در مطالعه‌ی حاضر مقایسه شده است. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود نمودار غیرخطی ولتاژ جریان که بر اساس رابطه‌ی (۱) بدست آمده از دو بخش تشکیل شده که در ولتاژهای پایین جریان ثابتی به دست می‌دهد اما در بخش پایانی با افزایش ولتاژ مقدار جریان به شدت 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 ارائه شده توسط شرکت سان‌پاور دارد.

➤ انرژی و انرژی

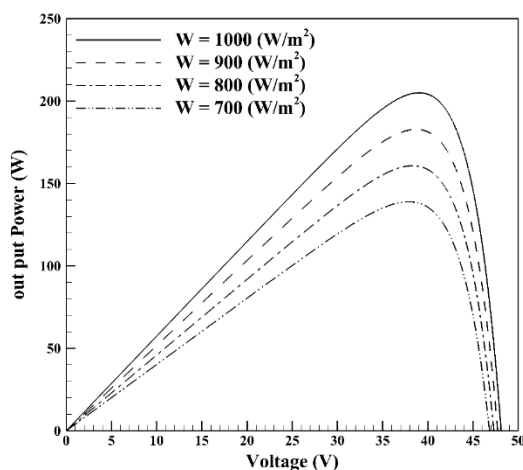
در این بخش ابتدا نتایج تحلیل برای پنل خورشیدی آورده شده است و در ادامه مباحثی پیرامون راندمان کلی سیستم انجام گرفته است. در شکل (۶) منحنی توان برحسب ولتاژ برای مقادیر تابش خورشیدی مختلف آورده شده است. با توجه به شکل می‌توان گفت که سیستم فوتوولتائیک یک نقطه‌ی کار بیشینه داشته که بعد از آن با تغییر ولتاژ 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 بدست آمده در این بخش نیز با داده‌های ارائه شده توسط شرکت سان‌پاور مقایسه شده و نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که در

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 قابل قبول است.

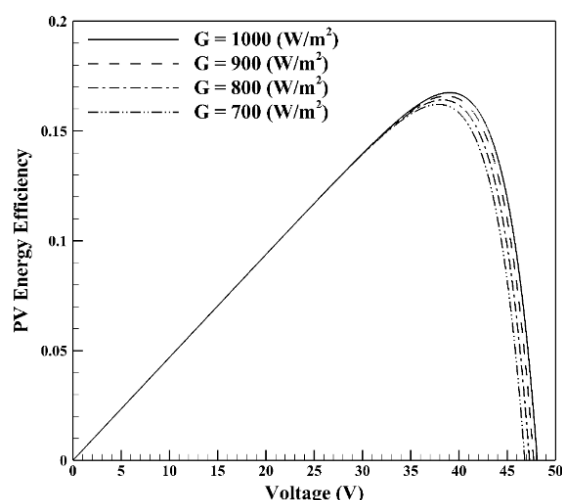
همچنین در شکل (۷) و شکل (۸) به ترتیب راندمان انرژی و اگزرژی سیستم فوتوولتائیک برای تابش‌های خورشیدی مختلف آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود روند هر دو نمودار مشابه روند منحنی توان-ولتاژ است. همچنین با افزایش تابش خورشیدی راندمان افزایش می‌یابد؛ و نیز راندمان اگزرژی در مقدار بیشینه‌ی خود مقدار 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.



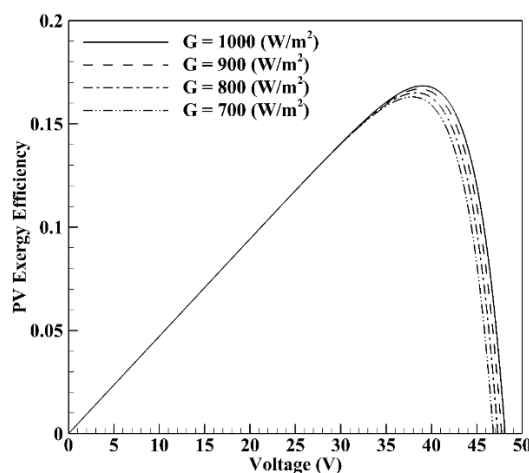
شکل ۵- اعتبارسنجی سیستم خورشیدی با مقایسه‌ی نمودار ولتاژ-جریان با داده‌های موجود در برگ‌داده‌ی شرکت سان‌پاور [۱۵]



شکل ۶- تأثیر تابش خورشید در منحنی توان-ولتاژ



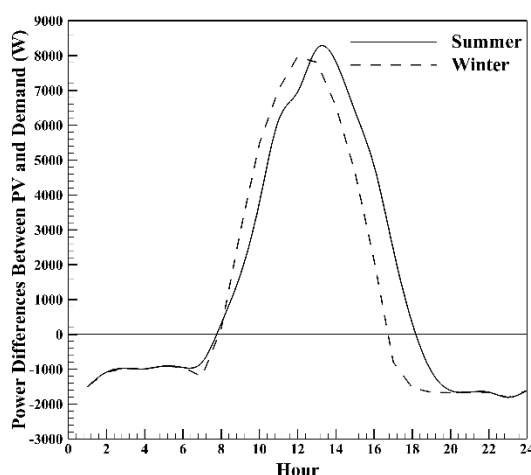
شکل ۷- نمودار راندمان انرژی بر حسب ولتاژ برای انرژی‌های تابشی مختلف



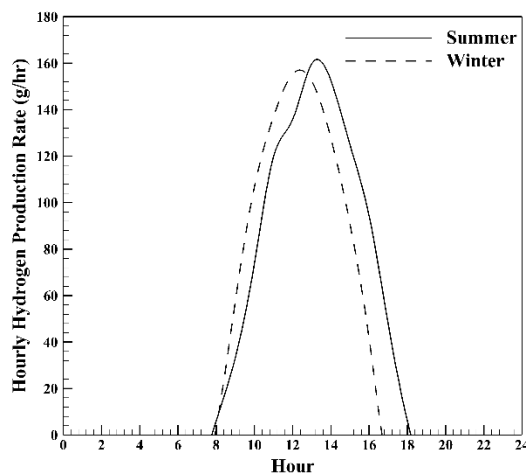
شکل ۸- نمودار راندمان اکسرژی بر حسب ولتاژ برای انرژی‌های تابشی مختلف

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 منتقل شده 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 داده شده است. همان‌طور که 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.



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

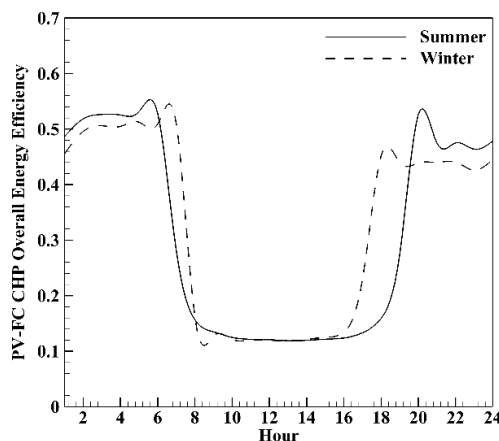


شکل ۱۰- تفاوت برق تولیدی توسط سیستم خورشیدی و برق موردنیاز ساختمان در دو فصل تابستان و زمستان برای شهر تهران

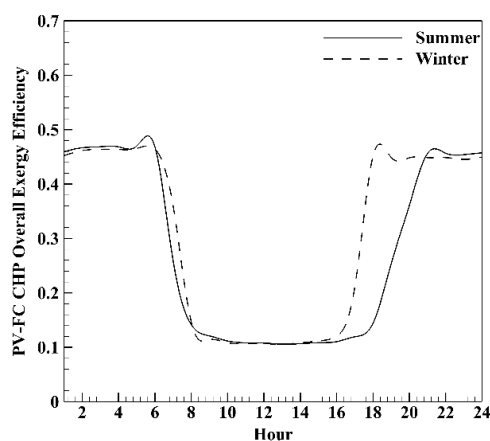
راندمان کلی انرژی و انرژی سیستم با استفاده از روابط (۱۳) تا (۱۶) محاسبه شده و در اشکال (۱۱) و (۱۲) نشان داده شده است. با وجودی که هر دو بازده در فصول مورد مطالعه روند یکسانی دارند، همان‌طور که مشاهده می‌شود بازدهی انرژی از انرژی بیشتر است. گراف‌های راندمانی نشان می‌دهند که ساعات کار پیل سوختی در زمستان 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 انرژی کل را نشان می‌دهند که علت آن این است که در این زمان برق مازاد صرف تولید هیدروژن در الکترولیزر 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 بیشینه 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 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 الکترولیزر (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 خود رسیده اما خروجی سیستم تنها برق مصرفی موردنیاز و هیدروژن تولیدشده در الکترولیزر است، به همین دلیل در این ساعات بازدهی انرژی و انرژی به میزان کمینه خود می‌رسد. به همین ترتیب تبدیل هیدروژن تولیدی در

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



شکل ۱۱- راندمان کلی انرژی سیستم



شکل ۱۲- راندمان کلی انرژی 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. از این‌رو 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 ۰ مشاهده می‌شود مقادیر SO_x ، NO_x ، CO ، CO_2 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.

جدول ۴- میزان آلاینده‌های منتشرشده برای دو سیستم موردبحث

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

۵. جمع بندی

در این مطالعه به تحلیل انرژی و انرژی، 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 انرژی سیستم نمودارهای مرتبط به واحدهای مختلف تشکیل‌دهنده‌ی آن برحسب ساعات کارکرد آورده شد. نتایج نشان می‌دهند که بیشینه‌ی راندمان انرژی و انرژی 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.

- [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.
- [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] 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.، دانیان 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 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 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, Compilation 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.