

ارایه الگوریتم نوین طراحی توأم با مدل سازی و ارزیابی مقایسه ای برای سیستم های مرکب پیل سوختی تولید مجدد

حسین قدمیان^۱

فریده عتایی^۱

حسنعلی ازگلی^{۲*}

تاریخ پذیرش: ۸۶/۴/۲

تاریخ دریافت: ۸۶/۲/۱۵

چکیده

سیستم پیل سوختی تولید مجدد *Regenerative Fuel Cell* از گروه سیستم های مستقیم تبدیل انرژی به عنوان یک سیستم ذخیره-تولید انرژی نوین مطرح است. این سیستم یک ساختار مرکب شامل زیرسیستم های الکترولیز / پیل سوختی می باشد که مولد آن سیستم فتوولتائیک خورشیدی است. به عبارت ساده مولکول های آب در فرآیند الکترولیز به مولکول های هیدروژن و اکسیژن تجزیه می شود و گازهای حاصل در مخازن فشار بالا ذخیره می گردد، سپس گاز هیدروژن به عنوان سوخت (حامل انرژی) وارد پیل سوختی شده و تولید انرژی الکتریکی می نماید. نتایج حاصل از محاسبات، مدل سازی و طراحی مهندسی نشان می دهد، تغییر وضعیت حامل انرژی از وضعیت الکتریکی به احتراق سرد شیمیایی در بخش پیل سوختی به منزله تولید انرژی داخلی در سیستم بوده و به میزان قابل ملاحظه ای نرخ شدت انرژی تولیدی و ضریب عملکرد سیستم را افزایش می دهد، زیرا با اتصال سیستم فتوولتائیک به واحدهای الکترولیز/ پیل سوختی و با استفاده از انرژی تولید شده در بخش فتوولتائیک، برای سیستم نمونه با ظرفیت 1 kW تولید انرژی داخلی به میزان $2/30\text{ kW}$ تولید می شود و همچنین به تبع آن میزان انرژی تولیدی در مجموعه RFC افزایش یافته و بازده کلی سیستم به میزان ۲۹/۴۵٪ خواهد بود.

در این تحقیق عملکرد عمومی سیستم و زیر سیستم های مربوط و مطالعات ظرفیتی مورد بررسی قرار گرفته و با استفاده از فرمولاسیون الکترولیز، پیل سوختی و سلول های فتوولتائیک به صورت جداگانه، مدل سازی با الگوریتم های غیرخطی انجام شده و به کمک نرم افزار GAMS انتگراسیون این سیستم ها صورت گرفته است. همچنین با انجام یک نمونه موردی مطالعاتی، راهکارها به منظور محاسبه و طراحی گام به گام سیستم های پیل سوختی تولید مجدد، ارایه شده است.

واژه های کلیدی: پیل سوختی تولید مجدد، مدل سازی و انتگراسیون، سلول های فتوولتائیک، الکترولیز، چگالی توان، نرم افزار

GAMS

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

۲- کارشناس ارشد مهندسی انرژی، دانشکده محیط زیست و انرژی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات تهران* (مسئول مکاتبات).

مقدمه

می‌آید. از جمله این کاربردها می‌توان به فعالیت‌های نظامی و صنایع هوا- فضا اشاره نمود.

همچنین، تولید انرژی پیوسته و پایدار با نرخ متغیر از ویژگی‌ها و مزایای عمده این نوع سیستم‌ها به شمار می‌آید و این موضوع برتری استفاده از سیستم RFC را در مقایسه با سیستم‌های باتری‌های قابل شارژ به اثبات می‌رساند و جذابیت استفاده از این سیستم را در میان مصرف‌کنندگان افزایش می‌بخشد. (۳ و ۴)

اساس عملکرد سیستم‌های RFC

در پیل‌های سوختی تولید مجدد آب به عنوان خوراک وارد سیستم‌های کنترل‌شده و در آن‌جا به اکسیژن و هیدروژن تجزیه می‌شود. مولکول‌های اکسیژن وارد محیط (یا در صورت لزوم ذخیره) شده و مولکول‌های هیدروژن در یک مخزن ذخیره می‌شوند. سپس هیدروژن ذخیره شده در مخزن وارد پیل سوختی گردیده و در آن‌جا هیدروژن روند تولید انرژی الکتریکی را طی می‌کند و در نهایت آب به عنوان محصول واکنش تولید گردیده و از پیل خارج می‌شود و از آن می‌توان در تغذیه مجدد الکترولیز استفاده نمود. یکی از دلایل عدم استفاده از سیستم ذخیره برای اکسیژن کنترل نرخ تولید انرژی در پیل سوختی توسط سوخت هیدروژن و عدم کفایت حجم اکسیژن تولیدی از الکترولیز (بازدهی یا نقص در سیستم الکترولیز) و پر هزینه بودن ذخیره سازی اکسیژن می‌باشد (۵).

استفاده از انرژی خورشیدی برای تأمین انرژی الکترولیز

الکترولیز آب برای انجام فرآیند جداسازی اکسیژن و هیدروژن نیازمند یک حامل انرژی خارجی حتی الامکان به صورت انرژی الکتریکی می‌باشد. در الکترولایزهایی که به طور منفرد عمل می‌کنند این انرژی الکتریکی توسط شبکه سراسری برق یا باتری‌ها تأمین می‌گردد. اما در پیل‌های سوختی تولید مجدد، انرژی مورد نیاز جهت جداسازی اکسیژن و هیدروژن در الکترولیز از انرژی‌های طبیعی قابل تبدیل به انرژی الکتریکی

پیل سوختی^۱ یکی از انواع فن‌آوری‌های نوین است که از درجه‌سازگاری مناسبی با محیط زیست برخوردار می‌باشد. از آن‌جا که عمل تبدیل انرژی در آن با بازدهی بالا صورت می‌پذیرد، لذا می‌بایست در مرحله نخست بخش طراحی در دو گونه انتگراسیون و طراحی جزئیات به اندازه کافی توسعه یافته و سپس مراحل مونتاژ و ساخت که در زمرة فن‌آوری‌های پیچیده است تحقق یابد، بنابراین به نظر می‌رسد که در قرن بیست و یکم و با توجه به پیشرفت سریع فن‌آوری‌های نوین، جانمایی مناسب برای فرآیندهای احتراقی سوخت‌های فسیلی در سیستم‌های تولید پراکنده انرژی باشد. (۱ و ۲).

به طور کلی یکی از مهم‌ترین مشکلات مطرح در فن‌آوری پیل سوختی، تأمین سوخت موردنیاز آن است. از آن‌جا که در اغلب پیل‌های سوختی ساخته شده، از هیدروژن به عنوان سوخت استفاده می‌شود و تولید هیدروژن، ذخیره سازی و حمل و نقل آن برای استفاده در پیل‌های سوختی با دشواری‌هایی روبرو است. در برخی از موارد بهره‌گیری از این فن‌آوری امکان پذیر نمی‌باشد.

پیل‌های سوختی تولید مجدد (RFC) با هدف رفع چالش تأمین سوخت هیدروژن، با ترکیب یک واحد پیل سوختی و یک واحد الکترولیز^۲ به راهکاری جدید جهت تأمین هیدروژن مورد نیاز پیل سوختی در مجموعه مولد انرژی تبدیل شده است. سیستم‌های RFC مولد قدرت هستند و واکنش‌دهنده‌هایشان را برای تولید جریان برق دوباره بازیابی می‌نمایند. این سیستم‌ها از چند لایه پیل که پشت سر هم به صورت سری بسته شده‌اند استفاده می‌کنند (۳).

پیل‌های سوختی RFC مناسب برای کاربردهایی است که از منابع تأمین سوخت دور هستند و یا امکان سوخت‌گیری در فواصل زمانی کوتاه برای آن‌ها میسر نمی‌باشد و در ضمن برای استفاده در کاربردهایی که به نسبت تولید انرژی به جرم حساس هستند انتخاب بسیار مناسبی به شمار

1- Fuel Cell (FC)

2- Electrolysis (EL)

- **پیل سوختی**

- ۱- انتخاب ظرفیت پیل سوختی با توجه به میزان انرژی مورد نیاز
- ۲- محاسبه تعداد سلول های پیل و شدت جریان stack و سایر مشخصه های فنی پیل سوختی با توجه به بازده آن
- ۳- محاسبه دبی جرمی هیدروژن مورد نیاز (به عنوان سوخت ورودی)

- **الکترولیز**

- ۱- محاسبه اختلاف پتانسیل لازم جهت الکترولیز آب ، با توجه به بازگشت ناپذیری های حاصل از افت ولتاژ
- ۲- محاسبه بازده الکترولیز در سناریوهای مختلف در شرایط نظری و واقعی

- **آرایه های P.V.**

- ۱- محاسبه سطح سلول های P.V. به منظور تولید انرژی الکتریکی مورد نیاز الکترولیز در شرایط ایده آل (با محاسبه سطح سلول های P.V. در حالت کلی و بدون نصب و بهره گیری از حداکثر میزان نرخ تابش خورشیدی).
- ۲- محاسبه سطح سلول های P.V. در شرایط واقعی (با محاسبه سطح ماژول استاندارد و در نظر گرفتن میزان نرخ تابش خورشیدی برای منطقه مورد نظر). مزایای بهره گیری از این الگوریتم نوین ارایه شده عبارت است از:

۱. قابلیت انجام محاسبات طراحی مهندسی به صورت سیستم های منفرد و جداگانه برای هر واحد.
۲. برقرار نمودن ارتباط منطقی میان اجزای سه گانه سیستم و مشخص نمودن پارامترهای اصلی طراحی برای طراحان در مقطع فاز صفر طراحی.

تأمین می‌گردند (۶ و ۲). در این میان انرژی خورشیدی و استفاده از سیستم های فتوولتائیک اصلی ترین و قابل توجه ترین شکل انرژی برای استفاده در RFC ها می‌باشد. پانل های خورشیدی قرار گرفته در مجموعه RFC ها وظیفه تبدیل انرژی خورشیدی به انرژی الکتریکی را برای انجام فرآیند جداسازی در الکترولیز برعهده دارند. سیستم ذخیره انرژی توسط پیل سوختی / الکترولیز جایگزین باتری های خورشیدی ذخیره کننده برق خواهد بود، به نحوی که این سیستم از یک الکترولیز PEM^۱، مخازن فشار بالای اکسیژن و هیدروژن و پیل سوختی PEM برای یک چرخه بسته آب طراحی و ساخته شده است.

آزمایش هایی به منظور دستیابی به امکان پذیری استفاده از این نوع سیستم ها، مشخصات کارایی الکترولیز (شامل میزان برق مصرفی برای عمل جدایش در هر سطح معین از الکترولیز)، بازده الکترولیز و میزان ارزش و سودمندی استفاده از آرایه های فتوولتائیک (P.V.)^۲ انجام شده است. نتایج نشان می‌دهد با به کارگیری آرایه P.V. در سیستم RFC، سیستم از قابلیت اطمینان بالایی برخوردار بوده و اثرات سوء زیست محیطی آن نیز به حداقل خواهد رسید (۴ و ۵).

الگوریتم طراحی سیستم های RFC

به طور کلی دیدگاه مهندسی در طراحی سیستم های مرکب متشکل از واحدهای مجزا، در واقع ایجاد ارتباط و ترکیب عناصر منفرد آن است، به نحوی که طراحی سیستم مرکب و ارایه الگوریتم طراحی مناسب جهت دستیابی به هدف اصلی طراحی و انتگراسیون سیستم مرکب محقق گردد. الگوریتم طراحی سیستم RFC ارایه شده در این تحقیق شامل پیل سوختی، الکترولیز و سلول های P.V. به شرح ذیل می باشد:

1- Proton Exchange Memberane
2- Photovoltaic

فرمولاسیون و عملکرد کلی سیستم های RFC

۱- محاسبه ولتاژ تولید شده در هر سلول پیل سوختی

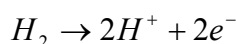
در سیستم های RFC غالباً اکسیژن و هیدروژن بیش از مقدار استوکیومتری آن مورد استفاده قرار می گیرد. این امر به ویژه در مورد اکسیژن (به هنگام استفاده از هوا) محسوس است. در صورت مصرف اکسیژن در حد استوکیومتری هوای خروجی از پیل باید عاری از اکسیژن باشد (۱):

$$P_e = V_c \times I \times n \quad (1)$$

در صورت مشخص نبودن V_c می توان از مقدار $V_c = 0.6 \approx 0.7 \text{volts}$ و یا با محاسبه η (بازده) از رابطه $\eta = 0.95 \times \frac{V_c}{1.48}$ استفاده نمود (برای شرایط خاص که پیل تحت فشار است از مقدار η استفاده می شود).

۲- محاسبه جرم هیدروژن مورد نیاز در پیل سوختی

در پیل های سوختی مولکول های هیدروژن (H_2) در آند قرار می گیرد و سپس با انجام واکنش زیر یون هیدروژن به کاتد رفته و با اکسیژن تشکیل آب می دهد و از طرفی الکترون های آزاد شده تولید جریان برق می کند:



با استفاده از عدد آووگادرو و بار الکتریکی هر الکترون، فرمول ذیل برای محاسبه تعداد مول های هیدروژن مورد نیاز برای تولید یک آمپر جریان الکتریکی در مدت یک ساعت در پیل های سوختی ارائه می گردد:

$$nH_2 = (1A) \left[\frac{1 \text{ coulomb / sec}}{1 A} \right] \left[\frac{1 \text{ equivalent } e \text{ of } e^-}{96.487 \text{ coulombs}} \right] \times \left[\frac{1 \text{ g mol } H_2}{2 \text{ equiv of } e^-} \right] \left[\frac{3600}{1 \text{ hr}} \right] = 0.018655 \frac{\text{gr.mol}}{\text{hr} - A} H_2$$

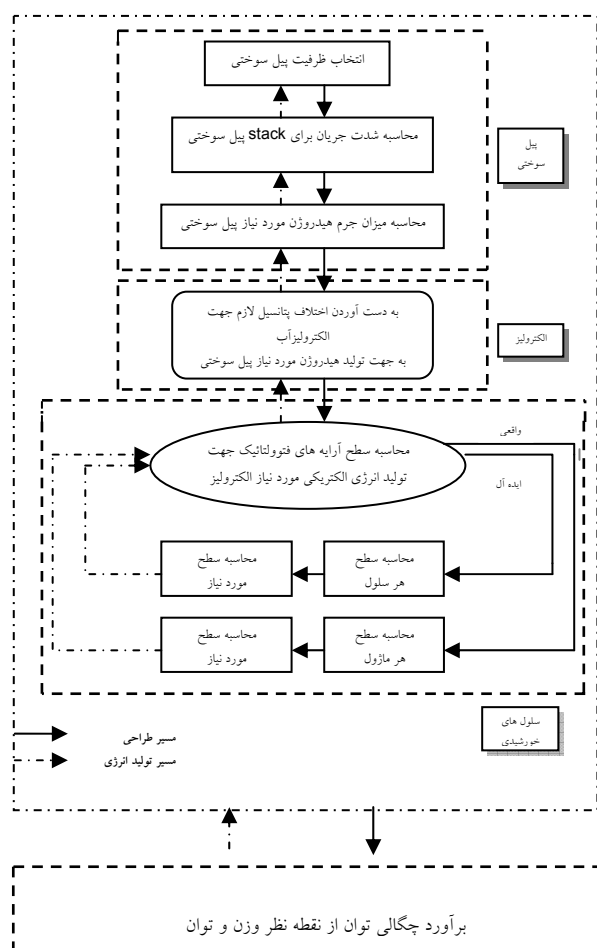
سپس جرم هیدروژن مورد نیاز پیل سوختی بر اساس رابطه ذیل محاسبه می گردد:

$$mH_2 = \left[0.018655 \frac{\text{g.mol}}{\text{hr} - A} H_2 \right] \left[\frac{2.0158 \text{gr}}{1 \text{g mol } H_2} \right] \left[\frac{1 \text{kg}}{1000 \text{gr}} \right] = 37.605 \times 10^{-6} \frac{\text{kg } H_2}{\text{hr} - A} = 0.037605 \frac{\text{kg } H_2}{\text{hr} - \text{kA}}$$

۳. امکان انجام ارزیابی سیستم تولید انرژی الکتریکی در بخش P.V. به لحاظ ایده آل یا واقعی بودن به طور همزمان .

۴. سهولت در ایجاد تغییرات در هر یک از واحدهای سه گانه سیستم و زیر مجموعه های آن به منظور بررسی تأثیر اعمال تغییرات مورد نظر بر شدت انرژی و بازده کلی سیستم .

۵. نمایش معکوس بودن مسیر طراحی سیستم RFC نسبت به مسیر تولید انرژی.



شکل ۱- فلوچارت الگوریتم نوین طراحی پیشنهادی سیستم RFC

مدار باز هر سلول دارای $V = 0.5$ و شدت تابش خورشیدی W/m^2 ۱۰۰۰ فرض شده است.

همچنین به منظور افزایش جریان ولتاژ، سلول‌ها به صورت مجموعه ای با اتصال‌های سری و موازی در یک واحد بزرگ‌تر به نام ماژول نصب می‌گردند

چنانچه کل توان دریافتی P_t ، A بیانگر سطح مفید سلول و P_s شدت تابش خورشید، V_{oc} ولتاژ مدار باز، I_{sc} شدت جریان اتصال کوتاه و $F.F.$ فاکتور پرکنندگی باشد، بازدهی سلول های خورشیدی به شرح فرمول ذیل محاسبه می‌گردد (۷):

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_t} = \frac{P_{max}}{P_s - A} = \frac{V_m \cdot I_m}{P_s - A} = \frac{V_{oc} \cdot I_{sc} \cdot FF}{P_s - A} \quad (3)$$

حل عددی یک نمونه مورد مطالعاتی

جهت تأمین انرژی یک سیستم آنتن مخابراتی (به عنوان یک رله تقویتی انتقال Data) که بسیار دور از شبکه انتقال برق و در بالاترین نقطه ارتفاعی منطقه می باشد، مقدار 1 kW انرژی مورد نیاز است. برای این منظور یک سیستم پیل سوختی تولید مجدد، برای تولید این میزان انرژی طراحی گردیده است. مراحل مختلف این طراحی در جدول ۱ ارایه شده است.

رابطه کمی بین emf^1 (نیروی محرکه الکتریکی) و غلظت‌ها توسط معادله نرنست^۲ داده شده است. صورت کلی معادله نرنست برای شرایط فشار 1 atm و دمای $25^\circ C$ چنین است (Q عبارت است از خارج قسمت واکنش) (۶):

$$E = E^o - \frac{0.05916}{n} \log Q \quad (2)$$

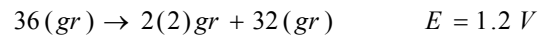
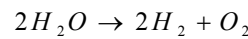
۳- محاسبه ولتاژ مورد نیاز برای الکترولیز آب

طبق معادله نرنست میزان الکتروسیته مورد نیاز جهت انجام الکترولیز دو مول آب برابر است با (۶):

$$E = E^o = \frac{(2.303)RT}{nF} \ln Q$$

$$E = -1.229 - \frac{(2.303) \times (8.314) \text{ kJ/kg} \cdot K \times (298.15)}{96487 \text{ Coulombs}} \ln \frac{[H]^2 [O_2]}{[H_2O]^2}$$

$$E = -1.229V$$



بنابراین از الکترولیز 36 gr آب 4 gr هیدروژن حاصل می‌شود و این عمل الکترولیز به حدود $1/2$ ولت برق نیاز دارد.

۴- محاسبه اختلاف پتانسیل تولید شده و سطح مورد

نیاز در سلول های فتوولتائیک جهت تولید هیدروژن

مورد نیاز پیل سوختی

کوچک‌ترین و اساسی‌ترین قسمت یک آرایه خورشیدی را سلول های خورشیدی تشکیل می‌دهند که در مقابل نور مانند یک باتری کوچک تولید برق می‌کنند. سطح این سلول‌ها تأثیری در میزان ولتاژ تولید شده توسط آن‌ها ندارد و شدت جریان در آن‌ها تابع مساحت سلول و شدت تشعشع خورشید می‌باشد.

فرضیات فنی که مسایل پایه ای ساخت را تشکیل

می‌دهد به شرح ذیل است:

ابعاد هر سلول $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ ، و از جنس سیلیکون کریستالی در نظر گرفته شده است. دمای سلول‌ها $25^\circ C$ ، ولتاژ

جدول ۱- عملیاتی کردن الگوریتم طراحی یک نمونه پیل سوختی با ظرفیت 1 kW

مراحل	شرح	خلاصه معادلات	نتایج مرحله
گام اول (۱)	محاسبه ولتاژ هر سلول پیل سوختی	به طور معمول $\eta = \frac{V_C}{1.48} \times 0.95$ $\eta_{PEM} = 0.6$ $V_C = 0.6 - 0.7V$	به وسیله آزمون و خطا $V_C = 0.65V$
گام دوم (۲)	محاسبه تعداد سلول های پیل سوختی	در نظر می گیریم: $V_{OUT} = 225 V$ $V = \text{Number Of Cell/Cell Voltage}$	$N = 347$
گام سوم (۲)	محاسبه شدت جریان و جرم هیدروژن مورد نیاز پیل سوختی	Cell Power = Cell Voltage \times Σ Current /Cell No. $I = \frac{P}{V}$ Cell Current = Stack Power / Cell Voltage $mH_2 = 1.05 \times 10^8 \times (P_e / V_c)$	$I = 1538A$ $I_{stack} = 4.43A$ $mH_2 = 0.05796 \frac{kg}{hr}$
گام چهارم (۶)	محاسبه الکتریسیته مورد نیاز الکترولیز	ایده آل $H_2O \rightarrow H_2 + \frac{1}{2}O_2 + 1.22V$ واقعی : $V_{real} \cong 1.3 - 1.4V_{Ideal}$	$V_{Ideal} = 17.38V$ $V_{Real} = 23.18V$
گام پنجم (۸)	محاسبه بازده الکترولیز	Current Efficiency % $= \frac{NL.H \times 96500 \times 100}{I \times 3600 \times 22.4}$ Energy Efficiency $= \frac{1.48V}{V_{EL}} \times \text{Current Efficiency \%}$	Electrolysis Energetic Efficiency $= 54.67\%$
گام ششم (۷)	محاسبه سطح سیستم فتوولتائیک	ایده آل : استفاده از سلول های P.V. در شرایط ایده آل واقعی : استفاده از ماژول های استاندارد $\eta = \frac{V_{OC} \cdot I_{SC} \cdot FF}{P_s \cdot A_{cell}}$ $F.F. = \frac{V_m \cdot I_m}{V_{OC} \cdot I_{SC}}$	$A_{Ideal} = 0.909m^2$ $A_{Real} = 1.68m^2$
گام هفتم (۲)	بالانس انرژی سیستم و محاسبه بازده	$E_{OUT} = (E_{in} + E_p)(\eta_{RFC})$ $\eta_{RFC} = \frac{E_{OUT}}{E_{in} + E_p}$	$\eta_{RFC} = 0.2945$ $E_{OUT (IDEAL)} = 963.6 W$ $E_{OUT (REAL)} = 999.5 W$

به لحاظ مشخصات فنی و عملیاتی با سیستم و مدل طراحی شده مقایسه شود. در جدول ۲ سه نمونه از این سیستم ها در مقایسه با سیستم مورد مطالعاتی تحقیق حاضر به تفصیل بیان شده است.

جدول نمونه های با ظرفیت بالا دارای توان خروجی در حد کیلو وات (kWt) به منظور انجام ارزیابی مقایسه ای میان مدل های واقعی و مدل ارایه شده، ضروری است ظرفیت های مشابهی در حد کیلووات

جدول ۲- مقایسه نمونه های ساخته شده سیستم های RFC با ظرفیت بالا (۹، ۱۰ و ۲)

سیستم RFC	مشخصات فنی سیستم
هوایمای هلیوس (NASA Helios)	<p>عرض بال : ۸ ft طول بال : ۲۴۷ ft</p> <p>ضخامت بال : ۱۱/۵ in</p> <p>مساحت بال : ۱۹۷۶ ft²</p> <p>وزن غیر خالص : ۲۰۴۸ Ib</p> <p>وزن خالص : ۱۳۲۲ Ib</p> <p>Ib</p> <p>سیستم P.V. :</p> <p>۶۲۱۲۰ عدد سلول فتوولتائیک با بازده ۱۹٪</p> <p>ارتفاع پرواز : ۵۰۰۰۰ = واقعی و ۱۰۰۰۰۰ = طراحی</p> <p>۷۰۰۰۰ ft</p> <p>۱۴ عدد موتور ۱/۵ کیلووات : نیروی محرکه</p> <p>PEMRFC : سیستم ذخیره انرژی</p> <p>دارای مخازن آب ، اکسیژن و هیدروژن جداگانه</p>
NASA Glenn Research Center QSS Group.Inc. Cleveland , Ohio	<p>۵/۲۵ kW : توان استک پیل سوختی</p> <p>PEMRFC : نوع پیل سوختی</p> <p>۵۲/۵V : ولتاژ پیل سوختی</p> <p>۱۰۰A : شدت جریان پیل سوختی</p> <p>۱۵ kW : توان استک الکترولیز</p> <p>PEMEL : نوع الکترولیز</p> <p>۱۰۰ V : ولتاژ الکترولیز</p> <p>۱۵۰ A : شدت جریان الکترولیز</p> <p>بیش از ۶۰ kWh خروجی سیستم FRC</p>
Electronic Research Institute , Dokki, Giza, Egypt	<p>۲/۲۴kW : توان سیستم RFC</p> <p>۷۲ V : ولتاژ پیل سوختی</p> <p>۳۱ A : شدت جریان پیل سوختی</p> <p>ولتاژ الکترولیز : ۱/۷-۱/۹ V</p> <p>نوع پیل سوختی و الکترولیز : PEMFC & PEMEL</p>

سیستم نمونه مورد مطالعاتی در تحقیق حاضر	۱ kW : توان خروجی سیستم RFC ۲۲۵ V : ولتاژ خروجی پیل سوختی ۴/۴۳ A : شدت جریان پیل سوختی ۲۳/۱۸۷ : ولتاژ الکترولیز نوع پیل سوختی و الکترولیز: PEMFC & PEMEL
---	---

برآورد چگالی توان سیستم‌های RFC از نقطه نظر تقابل

وزن و توان

چگالی توان سیستم‌های URFC در حالت نظری بسیار بالاست. چگالی توان را از محاسبه میزان انرژی خروجی طی فواصل تخلیه به وسیله وزن کل سیستم‌های URFC به دست می‌آورند (۹).

$$\text{انرژی خروجی} = n V_d I_d t_d$$

اگر همه اجزای سیستم به جز واکنش دهنده‌ها بدون وزن در نظر گرفته شوند، چگالی توان به لحاظ نظری به شکل زیر نشان داده می‌شود:

$$\text{چگالی توان} = \frac{n V_d I_d t_d}{M_w}$$

سایر وزن‌ها در URFC شامل وزن مخازن ذخیره‌سازی اکسیژن و هیدروژن، وزن مخزن ذخیره‌سازی آب، وزن استک URFC و وزن‌های تجهیزات جانبی می‌شود. بر این اساس چگالی توان از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\text{PowerOutput} = \frac{29762 (W - hr / kg)}{\left[1 + \frac{T_w}{M_w} + \frac{S_w}{M_w} + \frac{W_w}{M_w} + \frac{A_w}{M_w} \right]}$$

جزئیات محاسبات نمونه مطالعاتی مذکور به شرح ذیل می‌باشد:

ملاحظات فرمولاسیون وزنی (چگالی توان)^۱

در مورد فرمولاسیون سیستم‌های پیل سوختی تولید مجدد یکپارچه^۲ URFC از نقطه نظر وزنی نکات و برخی فرضیات زیر قابل ذکر می‌باشد:

۱- فرمولاسیون ارائه شده (۹) در رابطه با محاسبه چگالی توان است که تأثیرگذاری بسیاری در طراحی سیستم URFC دارد و سایر پارامترهای مؤثر در طراحی در این فرمولاسیون مد نظر قرار داده نشده است.

۲- این فرمولاسیون برای سیستم‌های URFC که Stack پیل سوختی و الکترولیز در واقع واحد می‌باشند صادق بوده و این سیستم برخلاف RFC شامل تجهیزات جداگانه الکترولیز و پیل سوختی نمی‌باشد. بنابراین سایر تجهیزات موجود در سیستم RFC و وزن آن‌ها در این فرمولاسیون لحاظ نشده‌اند. (وزن یک سیستم URFC تقریباً معادل $URFC \cong PEM \text{ Stack} + \text{Water Weight}$ در نظر گرفته شده است).

۳- در این فرمولاسیون صرفاً به وزن تجهیزات اصلی مولد قدرت توجه شده است. و وزن تجهیزات دیگری همانند سیستم P.V، کابل کشی، مبدل جریان در نظر گرفته نشده و بنابراین به دلیل نقصان موجود در فرمولاسیون و عدم دسترسی به مقادیر وزنی تجهیزات جانبی سیستم RFC، در نمونه‌های موردی این تحقیق نیز صرفاً وزن تجهیزات اصلی سیستم RFC در نظر گرفته شده است.

1- Power Density

2- Unitized Regenerative Fuel Cell

ب- گردآوری مدل اولیه و فرضیات مدل

هر مدلی شامل قسمت هایی چون تابع هدف، فرضیات مدل، نامعادلات محدودیت، پارامترها، متغیرهای مستقل و وابسته می باشد. با توجه به محاسبات انجام شده، قسمت های مدل به شرح آن چه در ادامه گفته می شود، ارایه می گردد:

ب-۱- تابع هدف^۲

تابع هدف، تعیین حداقل سطح P.V. مورد نیاز سیستم در نظر گرفته شده است.

$$\text{Min Area} = ((1/\text{EFPV}) \times (1/\text{PS}) \times \text{VOC} \times \text{ISC} \times \text{FF})$$

که در آن EFPV بازده سیستم فتوولتائیک، PS شدت تابش خورشیدی، VOC ولتاژ مدار باز، ISC شدت جریان اتصال کوتاه و FF فاکتور پرکنندگی می باشد.

ب-۲) فرضیات مدل

شامل فرضیات فیزیکی و محدودیت های بُعد فنی قضیه به شرح ذیل می باشد:

- ۱- در سناریوی اول حل مدل فرض شده است که پیل سوختی PEM دارای هیچ گونه افت ولتاژی نبوده و به صورت ایده آل فنی عمل می نماید. در سناریوی دوم حل مدل، با توجه به مدل ارایه شده در خصوص افت ولتاژ پیل های سوختی PEM (۵) و با استفاده از محاسبات مدل مذکور، مدل جدیدی با در نظر گرفتن افت ولتاژ پیل سوختی ارایه شده است که در نهایت برای هر دو مدل فوق، سطح مازول های P.V. در سیستم RFC بهینه سازی گردیده است.
- ۲) بازده الکترولیز اشاره شده در سیستم مذکور، برای عملکرد شرایط واقعی، با در نظر گرفتن جرم هیدروژن مورد نیاز ایده آل پیل سوختی در طی عملیات مدل سازی، ثابت در نظر گرفته شده است.

$$\text{PowerDensity} = \frac{\text{OutputEnergy}}{\text{TotalWeight}} = \frac{29762 V_d}{M_w}$$

$$3660 (W.hr/kg) = \frac{29672 \times 1.239 (W.hr)}{x (kg)} \Rightarrow M_w = 1kg$$

$$\Rightarrow \text{OutputEnergy} = 3660 W.hr$$

$$\text{PowerOutput} = \frac{29762 (W.hr/kg)}{\left[1 + \frac{T_w}{M_w} + \frac{S_w}{M_w} + \frac{W_w}{M_w} + \frac{A_w}{M_w} \right]}$$

$$\frac{T_w}{M_w} = 3.28 \times 10^{-5} RT \Rightarrow \frac{T_w}{M_w} = 3.28 \times 10^{-5}$$

$$\times (84.78 kg.cm^3 / cm^2.gmolK) \times 300K$$

$$\Rightarrow \frac{T_w}{M_w} = 0.83$$

$$\frac{S_w}{M_w} = \frac{2976 V_d}{M_w t_d \cdot (\text{powerdensity})} = 1$$

$$\frac{W_w}{M_w} = \frac{1710 MOP_w}{K_w}, K_w = \frac{1.5 MOP_w \cdot V_w}{W_w}$$

$$\frac{W_w}{M_w} = 1$$

$$\frac{A_w}{M_w} = 0.679$$

$$\Rightarrow \text{PowerDensity} = \frac{2976 V_d}{[1 + 0.83 + 1 + 1 + 0.679]}$$

$$\Rightarrow \text{چگالی توان واقعی} \approx 811 W.hr/kg$$

انتگراسیون سیستم های سه گانه و مدل سازی با نرم افزار

الف- کلیات اجرای مدل

روند طراحی بهینه در پنج بخش شامل موارد ذیل می باشد:

۱. گردآوری اطلاعات اولیه و شناخت کل سیستم
۲. تعیین پاسخ اولیه سیستم بهینه
۳. تشکیل تابع هدف و محدودیت های فیزیکی، ساختاری جهت حل مسأله
۴. ساده کردن مدل
۵. حل مدل به کمک تکنیک های برنامه ریزی ریاضی از طریق نرم افزارهایی چون GAMS^۱ و Matlab.

ب-۳- نامعادلات محدودیت در مدل

۱. ولتاژ تولید شده در هر سلول پیل سوختی PEM $0.6 \leq V_C \leq 0.7$ در نظر گرفته می شود (۲) که در شرایط ایده آل مقدار ۰/۷ جهت ادامه مسیر طراحی در نظر گرفته شده است.

۲- با توجه به نوع ماژول کریستالی P.V. استفاده شده در مورد مطالعاتی و با توجه به آنکه، میزان شدت جریان اتصال کوتاه در ماژول برای دو حالت کمینه و بیشینه قابل دستیابی می باشد، لذا حد بالا و حد پایین شدت جریان اتصال کوتاه به صورت زیر می باشد (۷):

$$3.45A \leq I_{SC} \leq 6.9A \quad (۴)$$

۳- محدوده بازده پیل های سوختی PEM به صورت $0.35 \leq \eta_{FC} \leq 0.6$ مشخص گردیده و در حل مدل به صورت یکی از نامعادلات قید، مطرح گردیده است.

۴- براساس نتایج تجربی به دست آمده جهت الکترولیز آب حدود ولتاژ مورد نیاز الکترولیز PEM (VELR) جهت تجزیه یک مول گرم آب در شرایط واقعی مطابق رابطه زیر در نظر گرفته می شود (۸):

$$1.6V \leq V_{EL} \leq 1.8V \quad (۵)$$

ب-۴- پارامترهای مدل

به منظور کاهش متغیرها در مدل RFC پارامترهایی که دارای مقادیر ثابت بوده و تغییرات آن ها در تابع هدف تأثیر چندانی نداشته باشد، به شرح ذیل در نظر گرفته شده اند:

۱- توان خروجی (ظرفیت تولید انرژی) سیستم (PO)، ۱ kW در نظر گرفته شده است.

۲- میزان شدت تابش خورشیدی مقدار ثابت $P_s = 650 W/m^2$ فرض شده است (۷).

۳- بازده الکترولیز (EFEL) محاسبه شده، $\eta_{el} = 0.5467$ می باشد که ثابت در نظر گرفته می شود.

۴- ولتاژ خروجی سیستم $V_O = 225V$ فرض شده است.

۵- فاکتور پرکنندگی (F.F.) برای سلول های P.V. کریستالی مقدار ۰/۷۳ محاسبه شده و در فرآیند مدل سازی ثابت در نظر گرفته می شود.

۶- بازده سلول های فتوولتائیک کریستالی انتخابی، برحسب مشخصات فنی آن ها ۰/۱۴ در نظر گرفته شده است.

۷- ضریب اطمینان (SF) طراحی سیستم از نقطه نظر میزان الکتروسیته مورد نیاز الکترولیز جهت تجزیه آب و تولید هیدروژن مورد نیاز پیل سوختی و تولید آن توسط سیستم های فتوولتائیک، به میزان ۱/۴۱ محاسبه گردیده و ثابت در نظر گرفته می شود.

ب-۵- متغیرهای مستقل مدل

متغیرهای مستقل مربوط به EFFC (بازده پیل سوختی PEM) و ISC (شدت جریان اتصال کوتاه ماژول P.V.) در نظر گرفته شده اند.

ب-۶- متغیرهای وابسته

متغیرهای وابسته در مدل سناریوی ۱، وابسته به متغیرهای مستقل به شرح ذیل می باشد:

ولتاژیک سلول پیل سوختی (V)

$$(VC) = 1.48(EFFC) / 0.95$$

شدت جریان پیل سوختی (I) = PO/VC

تعداد سلول های پیل سوختی (N) = VO/VC

دبی جرمی هیدروژن مورد نیاز پیل سوختی (kg/h)

$$(MH) = I \times 0.000037605$$

دبی جرمی اکسیژن تولید شده (kg/h)

$$(MO) = (1/3600) \times$$

$$(1/VC) \times PO \times 0.000829 \times 1000$$

دبی جرمی آب تولید شده در پیل سوختی (kg/h)

$$(MW) = (1/4) \times MH \times 36$$

ولتاژ مورد نیاز الکترولیز به دست آمده از فرمول اولیه (V)

$$(VEL1) = (1/4) \times MH \times VELR \times 1000$$

ولتاژ مورد نیاز الکترولیز به دست آمده از فرمول بازده (V)

$$(VEL2) = VEL1/EFEL$$

عنوان مقداری ثابت در حل مدل سیستم RFC در نظر گرفته شده و میزان بهینه سازی شده سطح سلول های فتوولتائیک مورد نیاز با احتساب افت های ولتاژ در پیل سوختی به دست آمده است.

ج- حل مدل به وسیله نرم افزار GAMS

مدل های محاسبه شده در مراحل ، به منظور تعیین پاسخ های دقیق، توسط نرم افزار GAMS مورد تحلیل قرار گرفته و با استفاده از این نرم افزار و انجام آنالیز برنامه ریزی ریاضی، به کمک محاسبه گر CONOPT، نقطه بهینه طراحی مدل عرضه شده برای سیستم RFC محاسبه گردیده است. نتایج حاصل از حل نرم افزاری در جدول های شماره (۳ و ۴) نشان داده شده است.

جدول ۳- اجرای نرم افزار GAMS برای سناریوی ۱

	LOWER	LEVEL	UPPER
VAR AREA	-INF	۱/۴۰۵	+INF
VAR N	.	۲۹۴/۵۰۳	+INF
VAR I	.	۱۳۰۸/۹۰۱	+INF
VAR ISC	.	۳/۴۵۰	+INF
VAR VOC	.	۵۰/۷۷۹	+INF
VAR EP	.	۱۹۵۴/۸۹۱	+INF
VAR VEL1	.	۱۹/۶۸۸	+INF
VAR VEL2	.	۳۶/۰۱۳	+INF
VAR VEL3	.	۵۰/۷۷۹	+INF
VAR MH	.	۰/۰۴۹	+INF
VAR MO	.	۰/۳۰۱	+INF
VAR MW	.	۰/۴۴۳	+INF
VAR KCPH	.	۱۶۸۰/۹۰۴	+INF
VAR KJPH	.	۷۰۳۷/۶۰۹	+INF

ولتاژ مورد نیاز الکترولیز به دست آمده از ضریب ایمنی (V)

$$(VEL3) = VEL2 \times SF$$

انرژی داخلی تولید شده در سیستم (kCall/h)

$$(KCPH) = (1/2.0) \times (MH \times 68.3) \times 1000$$

انرژی داخلی تولید شده در سیستم (kJ/h)

$$(KJPH) = KCPH \times 4.1868$$

انرژی داخلی تولید شده در سیستم (W)

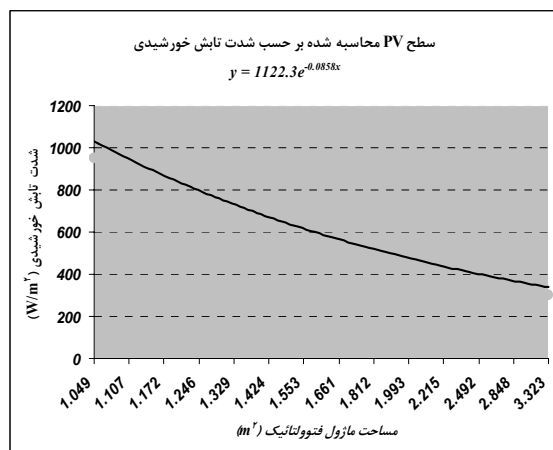
$$(EP) = (1/3600.0) \times KJPH \times 1000$$

نکته قابل توجه در ارایه مدل آن است که کلیه متغیرهای وابسته و مستقل، مثبت می باشند به جز متغیر تابع هدف (AREA) که از نوع متغیر آزاد است.

مدل سناریوی ۲ با در نظر گرفتن افت ولتاژ پیل سوختی PEM ارایه گردیده است. در این مدل تابع هدف، توان کل خروجی پیل سوختی PEM است که مقدار آن بر مبنای رابطه کلی $P = VI$ محاسبه گردیده است (۵ و ۱) (V ولتاژ سلول پیل سوختی و I شدت جریان سلول). به منظور لحاظ نمودن افت ولتاژ سلول به هنگام محاسبات، مقادیر به دست آمده برای افت های اکتیواسیون، عبور غیر مجاز سوخت، اهمی و انتقال جرم یا کاهش غلظت توسط یک رابطه تحت عنوان فرمول کلی بازگشت ناپذیری ها در ولتاژ (محاسبه جمع کل افت ها) از میزان V تابع هدف کسر گردیده است. بنابراین به منظور بهره گیری از مدل محاسبه ولتاژ سلول و به دست آوردن سطح P.V. مورد نیاز سیستم RFC تغییری در این مدل داده شد. برای این منظور با در نظر گرفتن متغیری به نام V_C در مدل، رابطه ای برای به دست آوردن ولتاژ سلول (V_C) به معادلات اضافه گردیده و ولتاژ سلول از کسر نمودن افت های عبور غیر مجاز سوخت، اهمی و انتقال جرم از مقدار V محاسباتی پیل سوختی محاسبه شده است.

بنابراین در مدل شماره ۲ به جای محاسبه V_C در معادلات مربوطه، از مقدار V_C به دست آمده در مدل تغییر یافته محاسبه ولتاژ سلول (با در نظر گرفتن افت های ولتاژ) $V = 0.764$ استفاده شده است. از آن جا که در مدل تغییر یافته محاسبه ولتاژ سلول، میزان V_C به طور دقیق برای هر سلول پیل سوختی محاسبه شده است، لذا آن در قسمت پارامترها و به

همچنین، به منظور نمایش دقیق تر تغییرات حاصل در میزان سطح آرایه های خورشیدی مورد نیاز سیستم RFC و با استفاده از جدول، منحنی تغییرات مساحت ماژول فتوولتائیک بر حسب شدت تابش خورشیدی رسم شده است که در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲- منحنی تغییرات سطح ماژول فتوولتائیک بر حسب شدت تابش خورشیدی از سناریوی اول

همان گونه که از شکل مشخص است، میزان شدت تابش خورشیدی با مقدار سطح مورد نیاز سلول های فتوولتائیک نسبت عکس دارد. همچنین به ازای مقادیر شدت تابش خورشیدی متوسط (مناطق دارای شرایط آب و هوایی معتدل و پرجمعیت) کاهش یا افزایش شدت تابش خورشیدی با نرخ کم موجب تغییرات اندکی در سطوح P.V. مورد نیاز سیستم RFC می گردند. اما در شرایط آب و هوایی بسیار گرم یا بسیار سرد، با تغییر اندکی در میزان شدت تابش خورشیدی، سطح سلول های فتوولتائیک مورد نیاز سیستم با نرخ قابل ملاحظه ای کاهش یا افزایش می یابند.

۱۱-۲- تحلیل مدل سناریوی دوم

مقدار V_C حاصل از محاسبه ولتاژ سلول (بر مبنای آزمایشات تجربی و مطالعات فنی پیل های سوختی PEM) از میزان V_C فرض شده در مدل سناریوی اول بیشتر بوده و بنابراین مقادیر به دست آمده برای نقطه بهینه طراحی در مدل

جدول ۴- اجرای نرم افزار GAMS برای سناریوی ۲

	LOWER	LEVEL	UPPER
VAR AREA	-INF	۱/۷۸۶	+INF
VAR N	-INF	۳۲۱/۴۲۹	+INF
VAR I	-INF	۱۴۲۸/۵۷	+INF
VAR VC	-INF	۰/۷۰۰	+INF
VAR ISC	-INF	۳/۴۵۰	
VAR VOC	-INF	۵۵/۴۲۱	+INF
VAR EP	-INF	۲۱۳۳/۶۲۴	+INF
VAR VEL1	-INF	۲۱/۴۸۹	+INF
VAR VEL2	-INF	۳۹/۳۰۶	+INF
VAR VEL3	-INF	۵۵/۴۲۱	+INF
VAR EFFC	-INF	۰/۴۴۹	+INF
VAR MH	-INF	۰/۰۵۴	+INF
VAR MO	-INF	۰/۳۲۹	+INF
VAR MW	-INF	۰/۴۸۳	+INF
VAR KJPH	-INF	۱/۶۰۰	+INF
VAR KCPH	-INF	۱۸۳۴/۵۸۷	+INF
VAR KJPH	-INF	۷۶۸۱/۰۴۸	+INF

۱۱- تحلیل مدل ها و ارزیابی پیشنهاد

۱۱-۱- مدل سناریوی اول

پاسخ های به دست آمده از حل مدل سیستم RFC یک کیلو وات به وسیله نرم افزار GAMS و در نظر گرفتن شدت تابش خورشیدی 650 W/m^2 مورد بررسی قرار گرفته اند.

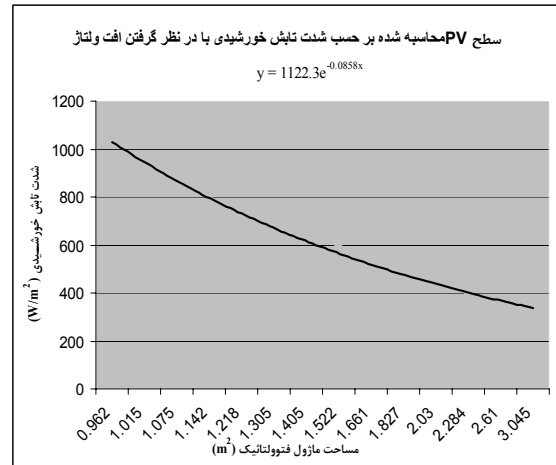
به منظور ارزیابی دقیق پاسخ به دست آمده برای نقطه بهینه طراحی سیستم RFC میزان شدت تابش خورشیدی بر حسب متوسط سالانه (W/m^2) برای عمده مناطق مسکونی کره زمین در نظر گرفته شده است.

از این رو مدل سناریوی اول با در نظر گرفتن ۱۴ عدد شدت تابش خورشیدی مختلف، به وسیله نرم افزار GAMS پیاده سازی شده و پاسخ های مربوط به نقطه بهینه طراحی بر حسب مقدار سطح مورد نیاز سلول های فتوولتائیک به دست آورده شد.

سطح فتوولتائیک به دست آمده، به میزان (۱۴) عدد در نظر گرفته شده است.

باید توجه داشت که با دقت در مقادیر d_L (حد پایین) و d_U (حد بالا) که در جدول آماره دوربین واتسون درج شده اند، برای هر میزان n و سطح اطمینان، پس از به دست آوردن d از فرمول ارایه شده می توان در زمینه وجود پارامتر خود همبستگی بحث نمود. حال با توجه به اینکه مقدار d محاسبه شده برابر 0.102274 می باشد و با مراجعه به جدول، میزان $(d_L=1/0.8)$ و $(d_U=1/3.6)$ مشاهده شده است (۱۱)، بنابراین $(d < d_L)$ و در نتیجه تقریب حاصل دارای خود همبستگی مثبت می باشد. وجود خودهمبستگی مثبت بین مقادیر به دست آمده امری قابل پیش بینی بود، لذا از این تحلیل انجام گرفته می توان اینگونه برداشت نمود که به دلیل وجود مقادیر حداقل و حداکثر در داده های آماری ارایه شده - مقادیر در نظر گرفته شده برای شدت تابش خورشیدی - می توان صحت معادله به دست آمده برای دامنه تغییرات هر دو مدل عرضه شده را اثبات نمود. محاسبات صورت گرفته بر روی نتایج به دست آمده از مدل ها و به دست آمدن آماره دوربین واتسون در جدول ۵ نشان داده شده است.

سناریوی دوم کمتر از نتایج حاصل شده برای متغیرهای گوناگون در مدل سناریوی اول می باشند که این موضوع برای طراحی سیستم های RFC، فابل پیش بینی بوده است. نتایج حاصل از رگرسیون به صورت گراف نتایج آماری حاصل از مدل ها و منحنی تغییرات ماژولهای فتوولتائیک مدلسناریوی دوم در شکل ۳ نمایش داده شده اند.



شکل ۳- منحنی تغییرات سطح ماژول فتوولتائیک بر حسب شدت تابش خورشیدی در سناریوی دوم

۱۲- تحلیل صحت وجود خود همبستگی مدل های

دو سناریو و ارایه پیشنهادات

با تکمیل نتایج حاصل از جدول آماری مدل های سناریوی ۱ و سناریوی ۲ می توان صحت انجام محاسبات را با استفاده از منحنی تغییرات سلول های P.V. به دست آمده برای مدل ها بوسیله تست خود همبستگی^۱ و با استفاده از جدول آماره دوربین-واتسون^۲ ارزیابی نمود. برای این منظور فرضیات زیر مورد نیاز است (۱۱) :

- سطوح اطمینان ۵٪ یا ۱٪ می باشند که در این جا (۵٪) فرض شده است.
- تعداد مشاهدات (n) با توجه به جداول به دست آمده و نمونه های آماری تهیه شده در مورد مقادیر مختلف شدت تابش خورشیدی و به طبع آن مقادیر متفاوت

جدول ۵- انجام تست خود همبستگی توسط محاسبه

آماره دوربین-واتسون

فرمول	$\sum (e_i)^2$	$\sum (e_i - e_{i-1})^2$	$d = \frac{\sum (e_i - e_{i-1})^2}{\sum (e_i)^2}$
۱	۹۰۲۵۰۰	۲۵۰۰	۰/۰۰۲۷۷۰۰۶۳
۲	۸۱۰۰۰۰	۲۵۰۰	۰/۰۰۳۰۸۰۶۴۲
۳	۷۲۲۵۰۰	۲۵۰۰	۰/۰۰۳۴۶۰۲۰۸
۴	۶۴۰۰۰۰	۲۵۰۰	۰/۰۰۳۹۰۶۲۵
۵	۵۶۲۵۰۰	۲۵۰۰	۰/۰۰۴۴۴۴۴۴
۶	۴۹۰۰۰۰	۲۵۰۰	۰/۰۰۵۱۰۲۰۴۱
۷	۴۲۲۵۰۰	۲۵۰۰	۰/۰۰۵۹۱۷۱۶
۸	۳۶۰۰۰۰	۲۵۰۰	۰/۰۰۶۹۴۴۴۴
۹	۳۰۲۵۰۰	۲۵۰۰	۰/۰۰۸۲۶۴۴۴۳
۱۰	۲۵۰۰۰۰	۲۵۰۰	۰/۰۱
۱۱	۲۰۲۵۰۰	۲۵۰۰	۰/۰۱۲۳۴۵۶۷۹
۱۲	۱۶۰۰۰۰	۲۵۰۰	۰/۰۱۵۶۲۵
۱۳	۱۲۲۵۰۰	۲۵۰۰	۰/۰۲۰۴۰۸۱۶۳
۱۴	۹۰۰۰۰	۰	۰
جمع کل	۶۰۳۷۵۰۰	۳۲۵۰۰	۰/۱۰۲۲۷۴۳۵۵

به منظور طراحی مازولهای به کار برده شده در سیستم RFC، استفاده از نرم افزار PV*SOL پیشنهاد می گردد. از آنجایی که نتایج حاصل از مراحل طراحی یک سیستم RFC در نهایت منجر به دستیابی به میزان سطح مورد نیاز سلول های فتوولتائیک برای سیستم می گردد، بنابراین، دقت ارقام محاسبه شده در قسمت طراحی مازولهای P.V. از اهمیت بسیاری برخوردار است. بدین منظور پیشنهاد می گردد با در نظر گرفتن توان الکتریکی درخواستی الکترولیز جهت تجزیه نمودن حجم معینی از آب که در قسمت های قبل حل مسأله محاسبه شده است، با استفاده از نرم افزار PV*SOL مقدار بهینه سطح فتوولتائیک مورد نیاز سیستم محاسبه می شود.

به کمک این نرم افزار می توان میزان دقیق سطح سلول های خورشیدی مورد نیاز واحدهای مصرفی مختلف را با در نظر گرفتن جزئیات کامل طراحی فنی آن ها به دست آورد. (۱۲)

بنابر این به جهت بررسی صحت پاسخ های به دست آمده از حل مدل توسط نرم افزار GAMS، ارقام محاسبه شده برای ولتاژ مورد نیاز الکترولیز، با توجه به شدت تابش خورشیدی در نظر گرفته شده در مورد نمونه مطالعاتی به عنوان ورودی به نرم افزار PV*SOL داده شده اند. در ضمن سیستم فتوولتائیک، از نوع مستقل از شبکه^۱ در نظر گرفته شده است. با توجه به میزان سطح محاسبه شده توسط نرم افزار PV*SOL نتایج زیر حاصل گردید:

۱- میزان سطح محاسبه شده توسط نرم افزار $1/m^2$ می باشد. با توجه به اینکه میزان شدت تابش خورشیدی متوسط سالانه $500-600 W/m^2$ در نظر گرفته شد مقایسه آن با پاسخ های به دست آمده از حل مدل $P_S = 500 \Rightarrow A_{PV} = 1.993 m^2$, $P_S = 550 \Rightarrow A_{PV} = 1.812 m^2$, $P_S = 600 \Rightarrow A_{PV} = 1.661 m^2$ نشانگر آن است که از دقت مناسبی برخوردار می باشد.

۲- می توان با استفاده همزمان از نرم افزار PV*SOL و نرم افزار GAMS، نقطه بهینه طراحی سیستم RFC را با دقت بسیار بالایی تعیین نمود. همچنین می توان در تحلیل پاسخ های به دست آمده از مدل طراحی سیستم مرکب RFC بهره گیری نمود.

از این رو استفاده تلفیقی نرم افزارهای طراحی مهندسی با نرم افزارهای آنالیز برنامه ریزی ریاضی به منظور دستیابی به نقطه بهینه طراحی سیستم های فنی پیشنهاد می گردد.

۱۳- جمع بندی نتایج

در بهره گیری از الگوریتم پیشنهادی سیستم های RFC نتایج تحلیل ها به شرح ذیل می باشند:

۱- مدل سازی بر پایه الگوریتم نوین طراحی، شرایط مطلوبی را جهت دستیابی به نقطه بهینه طراحی و بحث و تحلیل

است که بازده سیستم های منفرد P.V. در بهترین شرایط عملکردی حدود ۱۴٪ می باشد.

۴- یکی از مجهولات مهم در طراحی سیستم های RFC محاسبه بازده الکترولیز می باشد. این امر با محاسبه دو میزان بازدهی شدت جریان و بازدهی انرژی و با استفاده از رابطه ای که این دو مقدار را به هم پیوند می دهد و نیز یک مرحله میان یابی به دست می آید. بازده الکترولیز بر این مبنا، ۵۴/۶۷٪ به دست آمد.

۵- حل مدل های نرم افزاری برای ۱۴ عدد شدت تابش خورشیدی مختلف و ترسیم نمودارهای پاسخ های حاصل نشان از همبستگی مثبت نتایج به دست آمده دارد. این موضوع با استفاده از تحلیل وجود خود همبستگی و به دست آمدن میزان ۰/۱ برای آماره دوربین-واتسون به اثبات رسید.

۶- بررسی دیگری بر روی میزان دقت نتایج حاصل شده می تواند با بهره گیری از نرم افزار PV*SOL انجام شود. از این رو، با در نظر گرفتن توان الکتریکی مورد نیاز الکترولیز جهت تجزیه نمودن حجم معینی از آب و وارد نمودن آن به عنوان پارامتر ورودی، مقدار بهینه سطح فتوولتائیک مورد نیاز سیستم تعیین شد. میزان سطح محاسبه شده توسط PV*SOL، $1/7 \text{ m}^2$ برای شدت تابش خورشیدی متوسط سالانه 600 W/m^2 -۵۰۰ می باشد. مراجعه به جدول پاسخ های به دست آمده از حل مدل های ارایه شده و مقایسه ارقام موجود در آن با سطح P.V. محاسبه شده در این تحلیل، حاکی از دقت مناسب نتایج مدل ها می باشد.

پیرامون پاسخ های به دست آمده از حل نمونه مورد مطالعاتی (۱ kW) فراهم نمود. مدل سازی در قالب دو سناریو صورت گرفت. در سناریوی اول، مدل بر طبق الگوی ارایه شده به طراحی سیستم RFC می پردازد. سناریوی دوم بر مبنای مطالعه ای که قبلاً بر روی افت ولتاژ سلول های پیل سوختی PEM صورت گرفته (۴) V $0/764 = V_C$ انجام گرفت. روش مدل سازی، برنامه ریزی ریاضی غیر خطی با در نظر گرفتن پارامترها، معادلات و نامعادلات محدودیت در سیستم های RFC می باشد. تابع هدف، حداقل سازی سطح آرایه های P.V. در سیستم در نظر گرفته شد. مدل های حاصل به نرم افزار GAMS داده شد، که از محاسبه گر CONOPT برای حل مدل های مذکور استفاده می نماید، پاسخ های مدل سناریوی اول، میزان $1/553 \text{ m}^2$ و مدل سناریوی دوم، مقدار $1/405 \text{ m}^2$ را برای شدت تابش خورشیدی W/m^2 ۶۵۰ نشان می دهند.

۲- مزیت عمده سیستم RFC در مقایسه با سایر سیستم های تبدیل مستقیم انرژی، بحث تولید انرژی داخلی می باشد. با استفاده از روابط اساسی هر یک از بخش های سه گانه در نمونه مورد مطالعاتی ارایه شده، میزان انرژی داخلی تولید شده $E_p = 2/302 \text{ kW}$ می باشد.

۳- با توجه به مورد فوق، بهبود قابل ملاحظه بازده سیستم RFC نسبت به حالت استفاده از سیستم های P.V. به صورت منفرد مشاهده گردید. محاسبه بازده در نمونه مورد مطالعاتی بر طبق دو سناریو صورت پذیرفت. در سناریوی اول به کمک بالانس انرژی، بازده کلی سیستم RFC (η_{RFC})، معدل ۲۹/۴۵٪ به دست آمد. در سناریوی دوم با بهره گیری از برآورد چگالی توان از نقطه نظر وزن و توان، بازده ۵۲٪ برای سیستم مشاهده می گردد. این امر در حالی

۱۴- فهرست علائم و اختصارات به کار رفته در محاسبات

واحد	شرح	نشانه
Volt	نیروی محرکه الکتریکی ($emf =$)	E
Volt	نیروی محرکه الکتریکی استاندارد	E°
Watt	انرژی ورودی	E_{in}
Watt	انرژی خروجی	E_{out}
Watt	انرژی داخلی تولید شده	E_p
Watt	توان	P
W/m^2	شدت تابش خورشیدی	P_s
Watt	کل توان دریافتی از خورشید	P_t
Volt	ولتاژ مدار باز	V_{oc}
Volt	اختلاف پتانسیل هر سلول (ولتاژ متوسط هر سلول)	V_c
Volt	اختلاف پتانسیل الکترولیز	V_{el}
Volt	ولتاژ خروجی سیستم	V_o
m^2	سطح مفید	A
m^2	سطح سلول	A_{cell}
m^2	سطح ماژول	A_{module}
m^2	سطح آرایه فتوولتائیک	$A_{p.v.}$
A	شدت جریان اتصال کوتاه	I_{sc}
kCal	حرارت (انرژی) آزاد شده	Q
-	فاکتور پرکنندگی	$F.F.$
K	دما	T
$kJ/kg.K$	ثابت عمومی گازها	R
$\frac{Coulomb}{Faraday}$	ثابت فارادی (9.6487×10^4)	F
kg	جرم	m
Coulomb	بار الکتریکی	e^-
-	داده آماری	e_t
-	آماره دوربین-واتسون	d

d_U	حد بالای آماره دوربین-واتسون	-
d_L	حد پایین آماره دوربین-واتسون	-
η	بازده	-
نشانه	شرح	واحد
η_{el}	بازده الکترولیز	-
η_{FC}	بازده پیل سوختی	-
η_{RFC}	بازده پیل سوختی تولید مجدد	-
P_e	کل توان پیل سوختی	Watt
$V_{required}$	ولتاژ مورد نیاز الکترولیز	Volt
M_W	وزن آب	kg
T_W	وزن خالص مخازن ذخیره سازی گاز	kg
S_W	وزن خالص استک	kg
W_W	وزن خالص مخزن ذخیره آب	kg
A_W	وزن خالص تجهیزات جانبی سیستم ها	kg
V_d	ولتاژ تخلیه سلول	Volt
I_d	شدت جریان میانگین تخلیه	A
n	تعداد سلولها در استک	-
t_d	زمان تخلیه	hr

منابع

۱. قدمیان- حسین ، ۱۳۸۳ ، "شبه سازی طراحی و توسعه مدل بهینه پیل سوختی به کمک برنامه ریزی ریاضی و تحلیل اگزرژی"، رساله دکتری، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات.
2. Ogden J.M& Vielstich W., Lamm A., Gasteiger H.A., 2003,"Hanbook of Fuel Cells",Vol 1-4,Wiley,Chichester,UK.
3. Mitlitsky, F. &Myers, B., 1998,"Regenerative Fuel Cell Systems", Vol12 No1, pp.56-71, Energy Fuels journal.
4. [www.nasa.gov/NASA Dryden Fact Sheet - Helios Prototype.htm](http://www.nasa.gov/NASA_Dryden_Fact_Sheet_-_Helios_Prototype.htm)
5. Ghadamian,H.&Saboochi,Y.,November 2004, "Quantitative analysis of irreversibilities causes voltage drop in fuel cell (simulation & modeling)",Volume 50, Issues 2-3, 30 , pp.699-704, ARTICLE Electrochimica Acta.
6. Perry R.H. & Green D., 1984,"Chemical Engineering's Handbook", Editing by 6th Edition,Mc Graw-Hill.

9. Bents, J.D., Scullin, J.V., January 2005, "Hydrogen-Oxygen PEM Regenerative Fuel Cell Energy Storage System", Glenn Research Center, Cleveland, Ohio, NASA/TM.
10. [@LLNL-Technology Profile Unitized Regenerative Fuel Cell.htm](http://www.llnl.gov/IPandC)
۱۱. ابریشمی - حمید ، ۱۳۷۷ ، "مبانی اقتصاد سنجی" ، ترجمه، جلد اول و دوم ، انتشارات دانشگاه تهران.
12. www.valentin.de/index_de_page=pvsl
7. "Planing and Installing Photovoltaic Systems (a guid for installers, architects and engineers)", 2006, First published by James & James (Science Published) Ltd in the UK and USA.
8. Yamaguchi, M. & Shinohara, T., etal. , 1998, "Development Of 2500cm² Solid Polymer Electrolyte Water Electrolyzer In WE-NET", pp.0194-240, New Energy Laboratory Fuji Electric Corporate Research and Development, Ltd.2-2-1, Nagasaka, Yokosuka City, Japan.