

# تحلیل انرژی و انرژی الکترو لایزر غشا پلیمری در ترکیب با سیستم متمرکز کننده خورشیدی

فائزه مرادی نافچی<sup>۱</sup>، ابراهیم افشاری<sup>۲</sup>، احسان بنی اسدی<sup>۳</sup>

۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اصفهان، اصفهان

۲ دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اصفهان، اصفهان، e.afshari@eng.ui.ac.ir

۳ استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اصفهان، اصفهان

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۲/۱۱

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۱۲/۰۵

## چکیده

تولید هیدروژن با استفاده از الکترو لایزرهای غشا پلیمری روشی مؤثر و مفید برای تولید یک منبع انرژی تجدیدپذیر است. از هیدروژن و اکسیژن تولیدی توسط الکترو لایزر می‌توان در پیل‌های سوختی در پهنادهای استفاده کرد. تحلیل ترمودینامیکی الکترو لایزر غشا پلیمری برای مشخص کردن افت‌های کلیدی و بهینه‌سازی عملکرد آن بسیار اساسی است. در این مقاله، فرایند الکترو لایزر آب توسط الکترو لایزر غشا پلیمری در ترکیب با سیستم متمرکز خورشیدی به منظور تولید توان و هیدروژن مطالعه و اثر شدت تابش، چگالی جریان و دیگر پارامترهای عملکردی بر نرخ هیدروژن تولیدی بررسی شده است. نتایج حاکی از آن است که با افزایش چگالی جریان و یا به عبارتی افزایش میزان هیدروژن تولیدی، ولتاژ الکترو لایزر افزایش می‌یابد و راندمان انرژی و انرژی الکترو لایزر کاهش می‌یابد. همچنین افزایش دما، کاهش فشار و ضخامت غشای نفیونی سبب کاهش ولتاژ و بهبود عملکرد الکترو لایزر می‌شود. با افزایش شدت تابش ورودی به سیستم خورشیدی به میزان ۴۵ درصد، میزان هیدروژن تولیدی ۱۱۰ درصد افزایش و راندمان انرژی و انرژی الکترو لایزر هر دو به میزان ۱۳/۸ درصد به دلیل بالاتر بودن نسبت جریان الکتریکی ورودی به هیدروژن خروجی کاهش می‌یابد.

## واژگان کلیدی

الکترو لایزر غشا پلیمری، چگالی جریان، راندمان انرژی و انرژی، سیستم متمرکز خورشیدی، شدت تابش

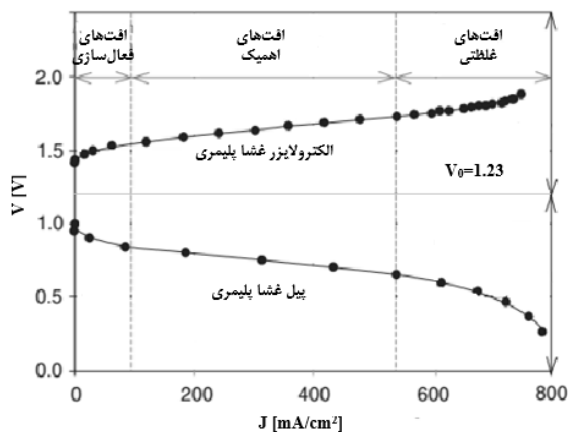
## ۱. مقدمه

به انرژی خورشیدی، هسته‌ای، باد، زیست‌توده و جز این‌ها اشاره کرد. دینسر روش‌های متنوعی برای تولید هیدروژن معرفی و به صورت گسترده بررسی کرده است [۲]. محققان دیگر هم روش‌هایی را برای تولید هیدروژن از منابع انرژی تجدیدپذیر

برخلاف سوخت‌های فسیلی موجود در طبیعت، هیدروژن منبع طبیعی ندارد و باید از روش‌هایی تولید شود [۱]. منابع انرژی تجدیدپذیر فراوانی وجود دارد که می‌توان آنها را ذخیره کرد و از طریق آنها سوخت هیدروژن تولید نمود. از جمله این منابع می‌توان

بررسی کردند. آنها نشان دادند که آب مناسب‌ترین ماده اولیه برای تولید هیدروژن به‌خصوص با استفاده از منابع تجدیدپذیر و در مقیاس بزرگ است [۳]. انرژی خورشیدی از جمله منابع انرژی است که به‌دلیل تجدیدپذیری، امن و تمیز بودن به‌عنوان یکی از گزینه‌های مناسب مطرح است. استینفیلد تولید ترموشیمیایی هیدروژن با استفاده از تابش‌های متمرکز خورشیدی را به‌عنوان منبع انرژی گرمایی فرایند دما بالا تشریح کرده است. او نشان داد که تولید ترموشیمیایی هیدروژن از طریق الکترولیز آب با استفاده از انرژی الکتریکی تولیدشده توسط سیستم خورشیدی، به‌دلیل کاهش تولید دی‌اکسید کربن و آلودگی، با روش‌های متداول که از طریق سوخت‌های فسیلی است رقابت می‌کند [۴]. تجزیه شیمیایی آب، سیکل‌های ترموشیمیایی یا رفورمینگ هیدروکربن‌ها و الکترولیز آب برای تجزیه مستقیم آب به هیدروژن و اکسیژن به جریان الکتریکی نیاز دارند. بر این اساس، ترکیب فرایند الکترولیز آب با سیستم انرژی‌های تجدیدپذیر که توان و حرارت مورد نیاز برای تولید هیدروژن را فراهم می‌کند، مورد توجه بسیاری از دانشمندان قرار گرفته است [۵]. در فضا نیز ذخیره اکسیژن و هیدروژن برای مدت طولانی غیرعملی است. همان‌طور که دانشمندان مقدار آب و هوای مورد نیاز بدن برای ادامه حیات در زمین را مشخص کرده‌اند، دانشمندان هوافضا هم به‌طور مشابه مقدار آب‌وهوای مورد نیاز برای ادامه حیات در فضا را تخمین زده‌اند. در زمین گیاهان نقش مهمی در دفع دی‌اکسید کربن و تولید اکسیژن ایفا می‌کنند، اما در فضا از روش‌های دیگری برای حذف دی‌اکسید کربن و تولید آب و اکسیژن استفاده می‌شود. در شاتل‌های فضایی، پیل‌های سوختی با ترکیب هیدروژن و اکسیژن، الکتریسته تولید می‌کنند. پیل‌های سوختی با استفاده از یک واکنش شیمیایی، ولتاژ خارجی مانند یک باتری تولید می‌کنند؛ اما با این تفاوت که سوخت آنها به‌طور پیوسته از اکسیژن و هیدروژن تأمین می‌شود. محصول فرعی این واکنش آب است که می‌تواند در الکترولایزر اکسیژن برای تنفس و هیدروژن به‌عنوان سوخت تولید گردد. یک الکترولایزر متشکل از چندین سل است که به‌صورت سری به هم متصل شده‌اند. هر سل الکترولایزر از صفحات قطبی، کاتد، آند، الکترولیت، لایه پخش‌گاز و کاتالیست‌ها تشکیل شده است [۶]. فناوری الکترولایزر به چهار دسته کلی الکترولایزرهای آلکالینی که الکترولیت آنها مایع (مانند پتاسیم هیدروکسید) است، الکترولایزرهای غشا تبادل پروتونی و

۱. در چگالی جریان‌های پایین (محلی که از آثار تلفات اهمی می‌توان صرف‌نظر کرد)، افت ولتاژ فعال‌سازی که از معادله ولمر-باتلر به‌دست می‌آید، افت غالب است
۲. در محدوده وسط، نمودار به‌صورت خطی است و افت ولتاژ ناشی از افت‌های اهمی است
۳. در چگالی جریان‌های بالا، افت غالب افت ولتاژ غلظتی است

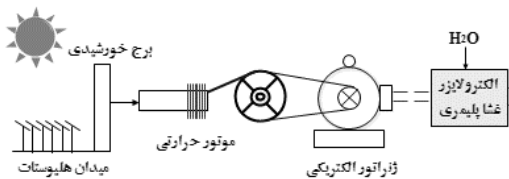


شکل ۱. نمودارهای عملکرد الکترولایزر غشا پلیمری و پیل سوختی غشا پلیمری

تاکنون مدلسازی الکترولایزرهای غشا پلیمری توسط برخی از محققان انجام شده است. کوکا و همکاران تأثیر کاتالیست‌های آندی چند ماده‌ای را بر عملکرد الکترولایزرهای غشا پلیمری و تأثیر لایه‌نشانی کاتالیستی بر انواع غشای نفیونی بررسی کردند [۱۱]. هریسون و همکاران از یک مدل نیمه‌تجربی صفر بعدی تحت شرایط پایا و دمای متغیر برای مشخص کردن عملکرد ۲۰ سل از استک الکترولایزر غشا پلیمری استفاده کردند و چگالی تبادل جریان آند و کاتد و هدایت غشا را بر اساس نتایج تجربی و یک منحنی غیرخطی برای ربط دادن به ولتاژ جریان ارائه دادند

## ۲. توصیف سیستم

در شکل ۱ شماتیک سیستم مورد بررسی نمایش داده شده است. این سیستم از چهار قسمت برج خورشیدی، موتور حرارتی، ژنراتور و الکترولایزر غشا پلیمری تشکیل شده است. زیرسیستم هلیوستات‌ها و برج خورشیدی از یک میدان هلیوستات که شامل تعداد زیادی آینه در یک چیدمان دایروی برای بازتاب و منعکس کردن تابش خورشیدی به دریافت‌کننده مرکزی که بالای برج خورشیدی قرار دارد، تشکیل شده است (توضیحات تکمیلی در پیوست اول). فناوری برج خورشیدی برای دماهای بالا تا حدود ۲۲۰۰ کلوین کارآمد است [۱۹]. این ویژگی باعث می‌شود که این فناوری در ترکیب با سیستم‌های دیگر با دمای بالا مناسب باشد. مقادیر عددی و فرضیات استفاده شده برای این قسمت از سیستم در جدول ۱ داده شده است. مقادیر تابش خورشیدی به صورت ماهانه از داده‌های هواشناسی شهر اصفهان (شکل پیوست ۲) آمده است. با منعکس شدن تابش خورشیدی روی دریافت‌کننده مرکزی، تابش متمرکز شده و به موتور حرارتی داده می‌شود. موتور حرارتی از مقداری از این تابش استفاده کرده و آن را به کار مکانیکی تبدیل می‌کند. سپس کار مکانیکی برای تولید الکتریسیته به ژنراتور الکتریکی فرستاده می‌شود و توان الکترولایزر را تأمین می‌کند.



شکل ۲. نمایی شماتیک سیستم مورد بررسی در مقاله حاضر

جدول ۱. پارامترهای مهم مورد استفاده برای مدل کردن برج خورشیدی

پارامتر	مقدار
راندمان نوری هلیوستات	۷۵ درصد
راندمان دریافت‌کننده	۸۷/۵ درصد
مساحت میدان هلیوستات	۶۰۰۰ مترمربع

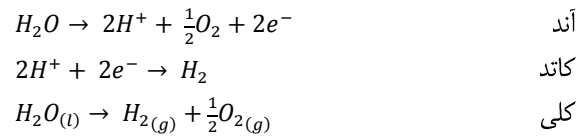
در الکترولایزر غشا پلیمری، مولکول‌های آب و پروتون از سمت آند به سمت کاتد توسط غشا حرکت می‌کنند که در آند به اکسیژن، پروتون و الکترون تجزیه می‌شود. الکترون‌ها از یک مدار خارجی از سل خارج می‌شوند. الکترون‌ها و پروتون‌ها در کاتد با

[۱۲]. همچنین دلیل و همکاران از یک مدل نیمه‌تجربی بر اساس قوانین ترمودینامیکی برای مشخص کردن ویژگی‌های یک الکترولایزر غشا پلیمری ۶ کیلوواتی استفاده کردند [۱۳]. ساترلی و همکاران با انجام آنالیزهای تجربی بر الکترولایزرهای غشا پلیمری تجاری، با استفاده از رگرسیون، به بررسی اثر پارامترهای کاری مختلف بر ولتاژ تغذیه برای الکترولایزرهای غشا پلیمری فشار بالا در سطوح مختلف جریان استک پرداختند [۱۴]. کاندسریس و همکاران مدل عددی یک‌بعدی پایا را برای مطالعه آثار چگالی جریان و دما بر تخریب غشا بررسی کردند. آنها دریافتند که بیشترین مقدار تخریب غشا در کاتد اتفاق می‌افتد و دما اثر بسیار قوی بر این تخریب دارد [۱۵].

دیگر مطالعات به بررسی سیستم‌های تولید هیدروژن با استفاده از سلول‌های فتولتاییک و الکترولایزر غشا پلیمری پرداختند. اسکامان و همکاران ترکیب سیستم انرژی خورشیدی با استفاده از سلول‌های فتولتاییک و الکترولایزر غشا پلیمری را در سه شرایط آب و هوایی بررسی کردند [۱۶]. گیبسون و کلی سیستم ترکیبی سل‌های فتولتاییک و الکترولایزر غشا پلیمری را بررسی کردند. آنها با تطبیق دادن ولتاژ و ماکزیمم توان خروجی فتولتاییک به ولتاژ کاری الکترولایزر، سیستم ترکیبی الکترولایزر غشا پلیمری و سل‌های فتولتاییک را بهینه کردند. این فرایند بهینه‌سازی، راندمان تولید هیدروژن را تا ۱۲ درصد برای این سیستم بالا می‌برد که هیدروژن کافی برای پیل سوختی مورد استفاده در وسیله نقلیه را فراهم می‌کند [۱۷].

پل و اندریس سیستم هیدروژن - انرژی تجدیدپذیر را برای تغذیه توان مناطق دور بررسی کردند. نتایج اولیه تجربی نشان می‌دهد حدود ۹۵ درصد از انرژی نسبت به حالت تئوری منتقل می‌شود و همچنین از نظر اقتصادی کاملاً بررسی و توجیه شد [۱۸]. بر اساس مطالعات بیان‌شده، تاکنون در هیچ‌یک از مطالعات، آنالیز انرژی و انرژی سیستم الکترولایزر غشا پلیمری در ترکیب با سیستم متمرکز خورشیدی بررسی نشده است. در مقاله حاضر، تولید هیدروژن با استفاده از سیستم الکترولایزر غشا پلیمری که توان خود را از یک سیستم متمرکز خورشیدی تأمین می‌کند بررسی می‌شود. از اینرو، ابتدا به معرفی سیستم پرداخته‌شده و سپس با بیان شرایط حاکم بر سیستم، آنالیز انرژی و انرژی سیستم انجام می‌گیرد.

یکدیگر ترکیب شده و گاز هیدروژن آزاد می‌شود [۶]. واکنش‌ها در کاتد و آند الکترولایزر غشا پلیمری به صورت زیر است:



### ۳. آنالیز ترمودینامیکی

آنالیز ترمودینامیکی سیکل با استفاده از نرم‌افزار EES (ضمیمه ۳) انجام شده است. فرضیات زیر در حل مسئله در نظر گرفته شده‌اند.

۱. از تغییرات انرژی پتانسیل و جنبشی صرف‌نظر شده است
۲. سیستم در حالت پایا کار می‌کند
۳. انرژی شیمیایی فقط برای الکترولایزر غشا پلیمری در نظر گرفته شده است

### ۳-۱. برج خورشیدی

کل تابش خورشیدی به روی هلیوستات از رابطه ۱ به دست می‌آید [۲۰].

$$Q_h = A_h * I \quad (1)$$

نرخ گرمای منعکس شده به دریافت‌کننده به صورت زیر در ترمهای راندمان نوری میدان هلیوستات تعریف می‌شود.

$$\eta_{opt} = \frac{Q_{rec}}{Q_h} \quad (2)$$

همچنین نرخ گرمای جذب شده به نرخ گرمای منعکس شده به دریافت‌کننده به عنوان راندمان دریافت‌کننده معرفی می‌شود.

$$\eta_{rec} = \frac{Q_{abs}}{Q_{rec}} \quad (3)$$

میزان نرخ انرژی مربوط به شار حرارتی به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$Ex_h = Q_h \left(1 - \frac{T_0}{T_{sun}}\right) \quad (4)$$

به طور مشابه انرژی تابش منعکس شده به صورت زیر نوشته می‌شود.

$$Ex_{rec} = Q_{rec} \left(1 - \frac{T_0}{T_{sun}}\right) \quad (5)$$

انرژی مخصوص سیال در هر حالت به صورت رابطه زیر مشخص می‌شود.

$$ex_i = Cp_i(T_i - T_0) - T_0 \left[ Cp_i \ln \left( \frac{T_i}{T_0} \right) \right] \quad (6)$$

در حالی که نرخ انرژی گرمای جذب شده به صورت زیر است.

$$Ex_{abs} = Q_{abs} \left(1 - \frac{T_0}{T_{rec}}\right) \quad (7)$$

راندمان انرژی و انرژی زیرسیستم برج خورشیدی نیز به صورت زیر است.

$$\eta_{solar} = \frac{Q_{abs}}{Q_h} \quad (8)$$

$$\psi_{solar} = \frac{Ex_{abs}}{Ex_h} \quad (9)$$

### ۳-۲. موتور حرارتی

کار مکانیکی به صورت رابطه زیر تعریف می‌شود [۲۱].

$$\dot{W} = \eta_{HE} \dot{Q}_{abs} \quad (10)$$

$$\eta_{HE} = 1 - \frac{T_0}{T_{rec}} \quad (11)$$

در این رابطه  $\eta_{HE}$  راندمان ایده‌آل موتور احتراقی سیکل کارنو است که مربوط به بیشترین انرژی دریافت‌شده برای هر موتور حرارتی است. به عبارت دیگر هیچ موتور حرارتی نمی‌تواند عملکرد بهتر از سیکل کارنو داشته باشد. بنابراین راندمان انرژی موتور حرارتی کمتر از راندمان سیکل کارنو و در حدود ۳۰ تا ۵۰ درصد است. در این مقاله این مقدار ۴۵ درصد در نظر گرفته شده است.

### ۳-۳. ژنراتور الکتریکی

راندمان انرژی ژنراتور الکتریکی به صورت زیر تعریف می‌شود [۲۱].

$$\eta_{GEN} = \frac{P_E}{P_M} \quad (12)$$

در این رابطه  $P_E$  کار الکتریکی و  $P_M$  کار مکانیکی است. چون خروجی الکتریکی و ورودی مکانیکی ثابت می‌ماند، راندمان انرژی ژنراتور الکتریکی شبیه راندمان الکتریکی در نظر گرفته می‌شود. در یک ژنراتور الکتریکی تلفات شامل تلفات آهنی هسته و تلفات مسی آرمیچر و افت ولتاژ در پل دیودی است که معمولاً در محدوده ۵۰ تا ۶۲ درصد قرار دارد. تلفات هسته از تلفات هیستریزس تلفات ناشی از جریان‌های گردابی در هسته آرمیچر تشکیل می‌شود و تلفات مسی در اثر عبور جریان از سیم‌پیچ‌های تحریک آرمیچر و دیگر سیم‌پیچ‌های موجود در ژنراتور به وجود می‌آید. بیان نهایی راندمان انرژی ژنراتور الکتریکی به صورت ۱۳ است.  $\tau$  گشتاور،  $\omega$  دور بر دقیقه،  $V$  ولتاژ و  $I$  جریان است.

$$\psi_{GEN} = \frac{P_E}{P_M} = \frac{VI}{\tau * \omega} = \frac{VI}{\tau * \frac{2\pi rpm}{60}} \quad (13)$$

### ۳-۴. الکترولایزر غشا پلیمری

پارامترهای ثابت مورد استفاده در مدلسازی الکترولایزر غشا پلیمری در جدول ۲ ارائه شده‌اند [۲۱]. بر اساس انرژی آزاد گیبس

نتیجه انتقال الکترون‌ها از سطح الکترودها در طول فرایند شیمیایی از دست می‌رود. انرژی فعال‌سازی در هر دو سمت کاتد و آند به‌دلیل افت ولتاژ فعال‌سازی توسط معادله ولمر-باتلر مدل می‌شود.

جدول ۲. ارامترهای ثابت جهت مدلسازی الکترولایزر غشا پلیمری [۲۲]

پارامتر	نماد	مقدار
فشار هیدروژن	$P_{H_2}$	1 bar
فشار اکسیژن	$P_{O_2}$	1 bar
فشار آب	$P_{H_2O}$	1 bar
دمای الکترولایزر	$T$	353 K
ضخامت غشا	$L$	183 $\mu m$
انرژی فعال‌سازی آند	$E_{act,a}$	76 kJ/mol
انرژی فعال‌سازی کاتد	$E_{act,c}$	18 kJ/mol
ارزش حرارتی پایین هیدروژن	$LHV_{H_2}$	224 KJ/mol

$$V_{act,i} = \frac{RT}{F} \sinh^{-1} \left( \frac{J}{2J_{0,i}} \right) \quad (18)$$

$$J_{0,i} = J_i^{ref} \exp \left( -\frac{E_{act,i}}{RT} \right) \quad (19)$$

$i = a, c$

به‌طوری‌که  $J_{0,i}$  چگالی تبادل جریان آند/کاتد برحسب  $A/cm^2$  چگالی تبادل جریان مرجع کاتد/آند برحسب  $A/cm^2$  و  $E_{act}^i$  انرژی فعال‌سازی برحسب  $kJ/mol$  است. چگالی تبادل جریان وابسته به جنس ماده و تخلخل الکترودها، غلظت، ابعاد و توزیع ذرات کاتالیست بر روی الکترودها و دمای کاری است. برای الکترودهای با کاتالیست پلاتینیم، چگالی تبادل جریان آند در محدوده  $10^{-8}$  تا  $10^{-5}$  چگالی تبادل جریان کاتد در محدوده  $10^{-1}$  تا  $10^{-1}$  آمپر بر متر مربع است [۸]. در این مقاله بر اساس کاتالیست پلاتینیم، چگالی تبادل جریان برای آند  $10^{-3}$  آمپر بر متر مربع و برای کاتد  $10$  آمپر بر متر مربع در نظر گرفته شده است [۲۶].

### ۳-۴-۲. افت ولتاژ اهمیک

افت ولتاژ اهمیک مقاومت ایجادشده در برابر جریان الکترون‌ها و مقاومت الکتریکی الکترولایزر غشا پلیمری است. این افت ولتاژ بستگی به نوع الکترولایزر غشا پلیمری و جنس الکترودها دارد. افت ولتاژ اهمیک به‌صورت خطی با چگالی جریان رابطه دارد. افت ولتاژ اهمیک ناشی از مقاومت غشا، مقاومت الکترولایزر در مقابل

واکنش، یک ولتاژ برگشت‌پذیر برای الکترولایزر غشا پلیمری وجود دارد. این ولتاژ مربوط به سل الکترولایزر ایده‌آل در شرایط بازگشت‌پذیر و هم‌دماست. در پیل‌های سوختی تمام انرژی الکتریکی به‌دست‌آمده در طول فرایند حرکت الکترون‌ها در یک مدار خارجی در دسترس است. این مفهوم برای الکترولایزر به این صورت است که تمام نیروی محرکه تولیدشده برای تولید هیدروژن بدون هیچ افتی در دسترس است. بقیه افت‌های ولتاژ به ولتاژ برگشت‌پذیر اضافه می‌شوند. آثار غلظت در ترم‌های معادله نرنست و همچنین در افت‌های غلظتی در نظر گرفته می‌شود که در این مقاله به‌دلیل کم‌بودن مقدار افت‌های غلظتی، از این افت‌ها صرف‌نظر شده است و صرفاً افت‌های اهمیک و فعال‌سازی در نظر گرفته شده است. انرژی آزاد گیبس به‌صورت ۱۴ تعریف می‌شود.

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \quad (14)$$

به‌طوری‌که  $\Delta H$  تغییر آنتالپی برحسب  $J/mol$  و  $\Delta S$  تغییر آنتروپی برحسب  $J/mol K$  است. تحت شرایط ایده‌آل، گرمای تولیدشده در طول واکنش به‌طور پیوسته از سیستم دفع می‌شود، بنابراین دمای سیستم تغییری نمی‌کند. مقدار انرژی‌ای که دفع می‌شود برابر حاصل‌ضرب تغییرات آنتروپی واکنش در دمای کار پیل است. پتانسیل برگشت‌پذیر توسط معادله ۱۵ به‌دست می‌آید [۲۳]. ولتاژ مدارباز برای الکترولایزر غشا پلیمری با استفاده از معادله نرنست به‌دست می‌آید [۲۴].

$$V_0 = -\frac{\Delta G}{2F} \quad (15)$$

$$V_0 = 1.229 - 0.9 * 10^{-3} (T - 298) + \frac{RT}{nF} \ln \left( \frac{P_{H_2} P_{O_2}^{0.5}}{P_{H_2O}} \right) \quad (16)$$

در رابطه بالا،  $T$  دمای الکترولایزر،  $R$  ثابت جهانی گازها برابر  $8.314 J/K mol$ ،  $n$  تعداد الکترون مبادله شده،  $F$  ثابت فارادی برابر با  $96485 C/mol$ ،  $P_{H_2}$  فشار هیدروژن،  $P_{O_2}$  فشار اکسیژن و  $P_{H_2O}$  فشار آب برحسب بار است. ولتاژ تک سل الکترولایزر به‌صورت رابطه ۱۷ تعریف می‌شود. در رابطه ۱۷،  $V_{act}$  افت ولتاژ فعال‌سازی در آند و کاتد و  $V_{ohm}$  افت ولتاژ اهمیت برحسب ولت است.

$$V = V_0 + V_{act} + V_{ohm} \quad (17)$$

### ۳-۴-۱. افت ولتاژ فعال‌سازی

افت ولتاژ فعال‌سازی نشان‌دهنده آمادگی الکترون‌ها برای واکنش الکتروشیمیایی است. مقداری از ولتاژ اعمالی به الکترولایزر در

هیدروژن است که مقدار آن برابر  $236/09 \text{ KJ/Kmol}$  است [25]. برگشتناپذیری‌هایی در الکترولایزر غشا پلیمری در نتیجه گرما به دلیل تولید آنتروپی  $\sigma$  به وجود می‌آید. تولید آنتروپی به صورت زیر است [21].

$$\sigma = 2F(V_{act,a} + V_{act,c} + V_{ohm}) \quad (29)$$

اگر  $\sigma \geq T\Delta S$ ، گرمای تولیدشده به واسطه برگشتناپذیری‌های سیستم برابر یا بیشتر از گرمای موردنیاز برای تجزیه است و هیچ گرمای خارجی برای الکترولایزر غشا پلیمری نیاز نیست و از اینرو  $Q_{heat,pem} = Ex_{heat,pem} = 0$  باید توجه داشت که فرض می‌شود گرمای اضافی تولیدشده از طریق تشعشع به محیط بیرون داده می‌شود. اگر  $\sigma < T\Delta S$ ، گرمای تولیدشده کمتر از گرمای مورد نیاز است و نیاز به گرمای اضافی است. گرمای ورودی به الکترولایزر از طریق رابطه 30 محاسبه می‌شود.

$$Q_{heat,pem} = [T\Delta S - \sigma]N_{H_2O,reacted} = [T\Delta S - \sigma] \frac{J}{2F} \quad (30)$$

$$Ex_{heat,pem} = Q_{heat,pem} \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) \quad (31)$$

### 3-5. راندمان کلی

پس از محاسبه راندمان هر قسمت از سیستم، راندمان کلی انرژی و انرژی کل سیستم تولید هیدروژن خورشیدی به صورت زیر به دست آمده می‌آید.

$$\eta_{energy} = \eta_{solar} * \eta_{HE} * \eta_{GEN} * \eta_{pem} \quad (32)$$

$$\psi_{energy} = \psi_{solar} * \psi_{HE} * \psi_{GEN} * \psi_{pem} \quad (33)$$

## 4. نتایج و بحث

### 4-1. اعتبارسنجی الکترولایزر

جهت اعتبارسنجی مدل الکترولایزر مورد بررسی در این مقاله، نتایج مقاله حاضر با نتایج آزمایش‌های تجربی [27] مقایسه شد. الکترولیت مورد استفاده در آزمایش نیون است و ضخامت آن 50 میکرومتر است. از پلاتینیم جهت الکترود سمت کاتد استفاده شده است. در شکل 3 نمودار پلاریزاسیون الکترولایزر با شرایط کاری ذکرشده در جدول 3 آورده شده است. نتایج مدلسازی مطابقت خوبی با نتایج تجربی نشان می‌دهد. به منظور درک بهتر عملکرد الکتروشیمیایی الکترولایزر غشا پلیمری، افت ولتاژهای اهمیت و فعال سازی آند و کاتد در شکل 4 آورده شده است. افت ولتاژ اهمیت بسیار کم است و به طور پیوسته با افزایش چگالی جریان افزایش می‌یابد. دلیل این امر آن است که در رطوبت  $\lambda = 21$  و دمای کاری 353 کلین، هدایت یونی غشا زیاد است. با اینکه

انتقال پروتون‌ها است و به عنوان تابعی از ضخامت غشا ( $L$ ) برحسب متر، رسانندگی یونی غشای تبادل یونی ( $\sigma_{mem}$ ) برحسب  $1/\Omega \cdot cm$  و چگالی جریان ( $J$ ) برحسب  $A/cm^2$  به صورت زیر تعریف می‌شود [6].

$$V_{ohm} = \frac{L}{\sigma_{mem}} J \quad (20)$$

$$\sigma_{mem} = (0.005139\lambda - 0.00326) \text{EXP} \left[ 1263 \left( \frac{1}{303} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (21)$$

چون پروتون در سطح غشا با استفاده از مولکول‌های آب انتقال می‌یابد، محتویات آب در رسانندگی یونی غشا بسیار مؤثر است.  $\lambda$  محتویات آب است و با اینکه در پیل‌های سوختی تعیین  $\lambda$  به دلیل اینکه رطوبت غشا تغییر می‌کند بسیار مهم است، در الکترولایزر غشا پلیمری به دلیل فراوانی مقدار آب در سمت آند (و همچنین در سمت کاتد به دلیل پدیده انتقال)، کل غشا را می‌توان مرطوب در نظر گرفت.  $\lambda$  معمولاً در محدوده 14 تا 21 قرار دارد و در این پژوهش مقدار آن برابر 21 در نظر گرفته شده است [8]. کل انرژی مورد نیاز، انرژی تئوری مورد نیاز برای الکترولیز آب بدون هیچ‌گونه اتلافی است. اما در سیستم‌های واقعی مقداری اتلافات وجود دارد و عملکرد سیستم را با استفاده از راندمان‌های انرژی و انرژی تعریف می‌شود.

$$\eta_{pem} = \frac{\dot{N}_{H_2,out} \cdot LHV_{H_2}}{W_{elec} + Q_{heat,pem}} \quad (22)$$

$$\psi_{pem} = \frac{\dot{N}_{H_2,out} \cdot Ex_{H_2}}{W_{elec} + Ex_{heat,pem}} \quad (23)$$

به طوری که  $LHV$  ارزش حرارتی پایین هیدروژن،  $\dot{N}_{H_2,out}$  میزان هیدروژن خروجی از الکترولایزر،  $W_{elec}$  میزان انرژی ورودی به الکترولایزر و  $Q_{heat,pem}$  نرخ انرژی حرارتی ورودی به الکترولایزر است. میزان هیدروژن، اکسیژن و آب خروجی از الکترولایزر از رابطه 24 تا 26 به دست آمده می‌آید.

$$\dot{N}_{H_2,out} = \frac{J}{2F} = \dot{N}_{H_2O,reacted} \quad (24)$$

$$\dot{N}_{O_2,out} = \frac{J}{4F} \quad (25)$$

$$\dot{N}_{H_2O,out} = \dot{N}_{H_2O,in} - \dot{N}_{H_2O,reacted} = \dot{N}_{H_2O,in} - \frac{J}{2F} \quad (26)$$

$$W_{elec} = JV \quad (27)$$

دبی آب ورودی به الکترولایزر برابر  $0/005$  کیلوگرم بر ثانیه فرض می‌شود. انرژی هیدروژن به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$Ex_{H_2} = Ex_{H_2}^{ph} + Ex_{H_2}^{ch} \quad (28)$$

به طوری که  $Ex_{H_2}^{ph}$  انرژی فیزیکی هیدروژن است که از معادله 6 به دست آمده می‌آید و  $Ex_{H_2}^{ch}$  انرژی شیمیایی

ورودی و انرژی حرارتی خروجی به صورت خطی با چگالی جریان تغییر می‌کند. چون با افزایش چگالی جریان مقدار انرژی ورودی که مجموع انرژی الکتریکی و حرارتی است با نرخ بیشتری نسبت به انرژی خروجی که هیدروژن تولیدی است افزایش می‌یابد، از اینرو با افزایش چگالی جریان، راندمان انرژی کاهش می‌یابد. همچنین چون بیشتر الکترولایزرهای غشا پلیمری در دمای زیر ۳۷۳ کلوین کار می‌کنند، انرژی حرارتی مورد نیاز برای الکترولایزر فقط برای گرم کردن آب ورودی است و راندمان انرژی و انرژی الکترولایزر فقط از الکتریسیته تبعیت می‌کند. چون راندمان انرژی الکتریسیته ۱۰۰ درصد است، پس راندمان‌های انرژی و انرژی کارآمد بودن این سیستم را نشان می‌دهد.

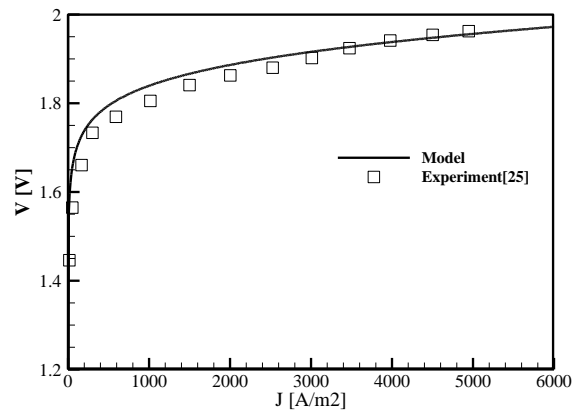
#### ۳-۴. تأثیر پارامترهای عملکردی

شکل ۶ تأثیر دما بر راندمان انرژی و انرژی الکترولایزر در چگالی جریان ۵۰۰۰ آمپر بر متر مربع را نشان می‌دهد. نتایج حاکی از آن است که افزایش دما سبب افزایش راندمان می‌شود. در دماهای بالاتر در الکترودهای الکترولایزر بیشتر واکنش انجام شده که منجر به تولید چگالی تبادل جریان بالاتر و در نتیجه افت ولتاژ فعال سازی کمتری می‌شود. در نتیجه با افزایش دما ولتاژ سل الکترولایزر کاهش می‌یابد که نتیجه آن کاهش انرژی الکتریکی ورودی است. شکل‌های ۷ و ۸ نمودارهای پلاریزاسیون الکترولایزر غشا پلیمری را در دما و فشار کاری مختلف نشان می‌دهند. مطابق شکل ۶ با افزایش دما، ولتاژ سل کاهش می‌یابد. ولتاژ مدار باز با افزایش دما کاهش می‌یابد. اختلاف بین ولتاژ مدار باز بر اساس انرژی آزاد گیبس و ولتاژ نرنست نشان‌دهنده آثار غلظت محصولات و واکنش‌گراهاست. چون واکنش الکترولایزر گرماگیر است، دماهای بالاتر سبب تسریع واکنش الکترولایزر می‌شود. با اینحال در الکترولایزرهای غشا پلیمری به دلیل خواص غشا، دما یکی از محدودیت‌های طراحی است. ضریب پخش یون  $H^+$  در غشای نفیون (که مستقیماً به رسانندگی غشا مرتبط است) با افزایش دما و کاهش فشار، افزایش می‌یابد. اولین تأثیر افزایش دما، کاهش ولتاژ (و به دنبال آن توان مورد نیاز الکترولایزر) است و خواص انتقالی غشای نفیون در دماهای بالاتر افزایش می‌یابد. برعکس فشار بیشتر سمت کاتد، به دلیل حرکت مخالف یون  $H^+$  از آند به کاتد، سبب افزایش ولتاژ می‌شود و انجام واکنش را با

مقدار افت ولتاژ فعال سازی کاتد از افت ولتاژ اهمیک بیشتر است، از افت ولتاژ فعال سازی آند بسیار کوچکتر است. دلیل این امر سریع‌تر بودن سینتیک واکنش در سطح کاتد است. برای چگالی جریان‌های کمتر از ۱۰۰۰ آمپر بر متر مربع ناگهانی افزایش می‌یابد و سپس با افزایش چگالی جریان، به طور یکنواخت افزایش می‌یابد. همان‌طور که از شکل ۴ مشخص است، افت ولتاژ فعال سازی کاتد به دلیل اینکه واکنش تشکیل هیدروژن سرعت زیادی دارد، مقدار کمی دارد و به دلیل کم بودن سرعت واکنش تشکیل اکسیژن، افت ولتاژ فعال سازی آند، مقدار بیشتری داشته که افت ولتاژ کلی الکترولایزر را مشخص می‌کند.

جدول ۳. شرایط کاری الکترولایزر جهت اعتبارسنجی

پارامتر	نماد	مقدار
فشار هیدروژن	$P_{H_2}$	1 bar
فشار اکسیژن	$P_{O_2}$	1 bar
فشار آب	$P_{H_2O}$	1 bar
دمای الکترولایزر	$T$	353 K
ضخامت غشا	$L$	50 $\mu m$



شکل ۳. مقایسه بین نتایج تجربی و مدلسازی این مقاله

#### ۲-۴. راندمان‌های انرژی و انرژی

شکل ۵ راندمان انرژی و انرژی الکترولایزر غشا پلیمری بر حسب چگالی جریان را در دمای ۳۵۳ کلوین نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است، منحنی راندمان‌های انرژی و انرژی بسیار به هم نزدیک هستند. هر دو راندمان با افزایش چگالی جریان کاهش می‌یابند. دلیل این امر آن است که انرژی ورودی و انرژی خروجی با افزایش چگالی جریان افزایش می‌یابد. در چگالی جریان‌های کم انرژی الکتریکی مورد نیاز با افزایش چگالی جریان به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد؛ در صورتی که انرژی حرارتی

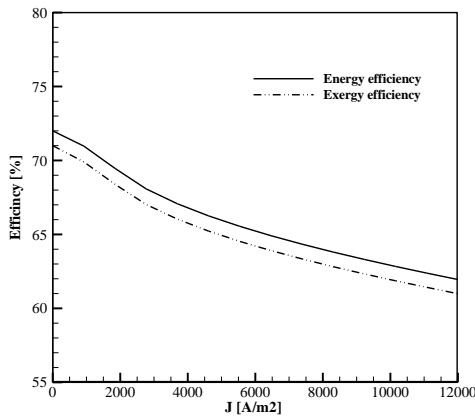
مشکل مواجه می‌کند. شکل ۹ نمودار ولتاژ برحسب دمای کاری الکترولایزر را در چگالی جریان ۵۰۰۰ آمپر بر متر مربع نشان می‌دهد. با افزایش دما ولتاژ سل کاهش می‌یابد که دلیل آن تسریع واکنش شیمیایی و افزایش چگالی تبادل جریان و در نتیجه کاهش افت ولتاژ فعال‌سازی و اهمیک است.

شکل ۱۰ نمودار پلاریزاسیون الکترولایزر غشا پلیمری با در نظر گرفتن غشاهای مختلف را نشان می‌دهد. در چگالی جریان کمتر از ۱۰۰۰ آمپر بر متر مربع، تغییر ضخامت غشا تأثیر ناچیزی روی ولتاژ الکترولایزر دارد؛ اما برای مقادیر بیشتر چگالی جریان، تأثیر ضخامت روی ولتاژ الکترولایزر بیشتر می‌شود. با افزایش ضخامت غشا، ولتاژ الکترولایزر غشا پلیمری افزایش می‌یابد که دلیل آن افزایش ولتاژ اهمیک است. کاهش ضخامت غشا سبب

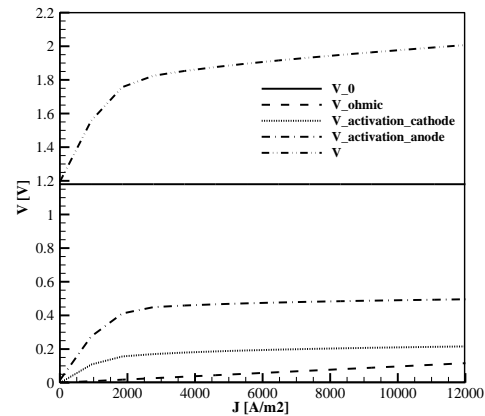
کاهش مقاومت، کاهش میزان مواد مصرفی و از اینرو کاهش قیمت آن می‌گردد. اما اگر ضخامت غشا بیش از اندازه هم کم شود، می‌تواند سبب کم‌شدن عمر غشا و عبور گازهای واکنشگر از بین آن شود.

#### ۴-۴. تأثیر شدت تابش خورشیدی

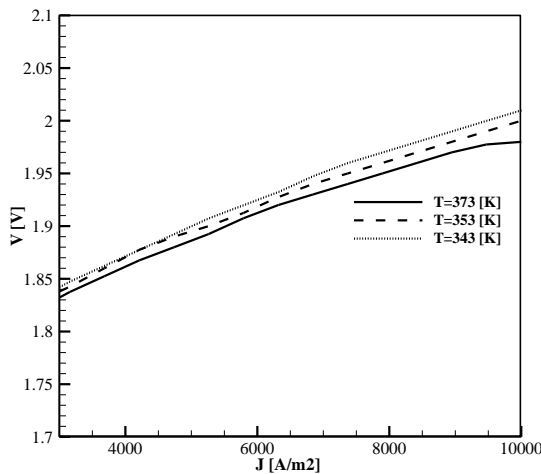
شکل ۱۱ نمودار تأثیر میزان شدت تابش خورشیدی را بر راندمان‌های انرژی و آگرژی الکترولایزر نشان می‌دهد. با افزایش تابش خورشیدی راندمان انرژی و آگرژی الکترولایزر کاهش می‌یابد؛ زیرا با افزایش تابش خورشیدی، انرژی حرارتی بیشتری وارد دریافت‌کننده برج خورشیدی می‌شود و در نتیجه توان بیشتری برای الکترولایزر به‌عنوان ورودی فراهم می‌شود.



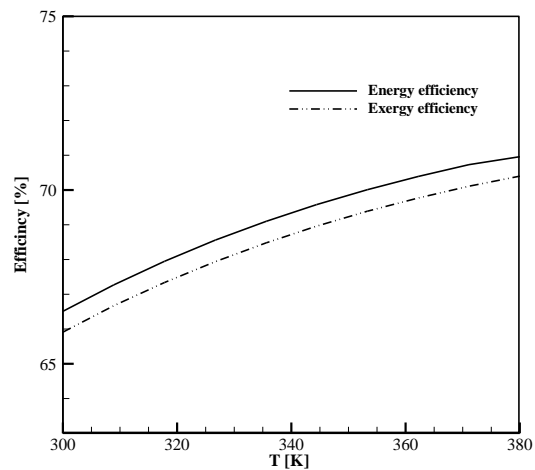
شکل ۵. نمودار راندمان انرژی و آگرژی الکترولایزر غشا پلیمری برحسب چگالی جریان



شکل ۴. نمایش از نمودار پلاریزاسیون الکترولایزر غشا پلیمری

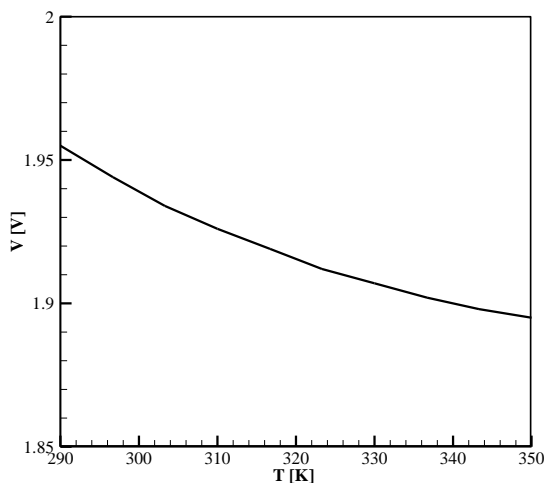


شکل ۷. نمایش از نمودارهای پلاریزاسیون الکترولایزر غشا پلیمری در دماهای مختلف

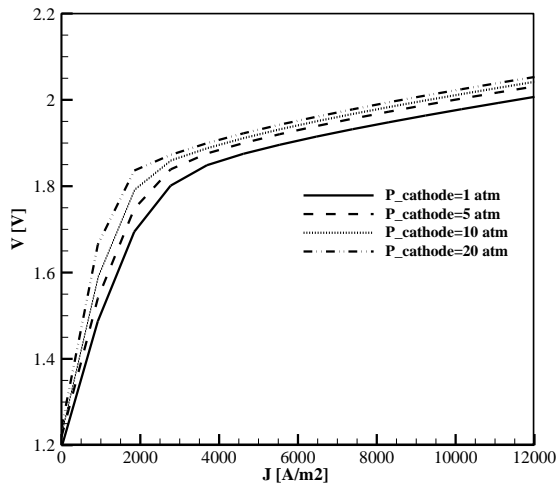


شکل ۶. تأثیر دما بر راندمان انرژی و آگرژی الکترولایزر در چگالی جریان ۵۰۰۰ آمپر بر مترمربع

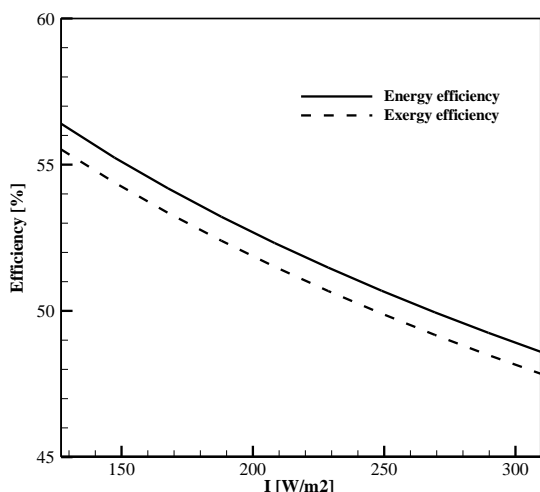




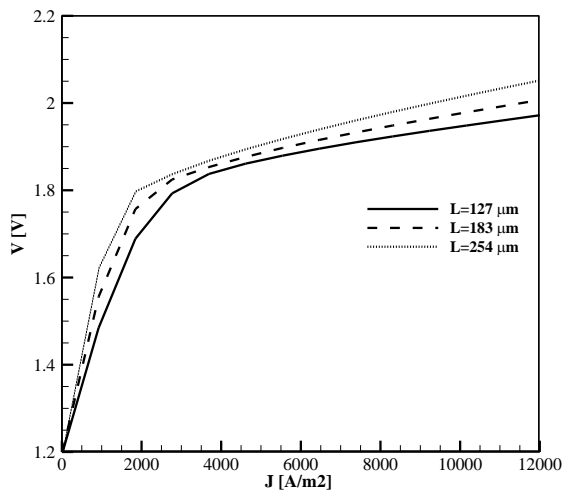
شکل ۹. نمودار تأثیر دما بر ولتاژ سل الکتروکاتولیز



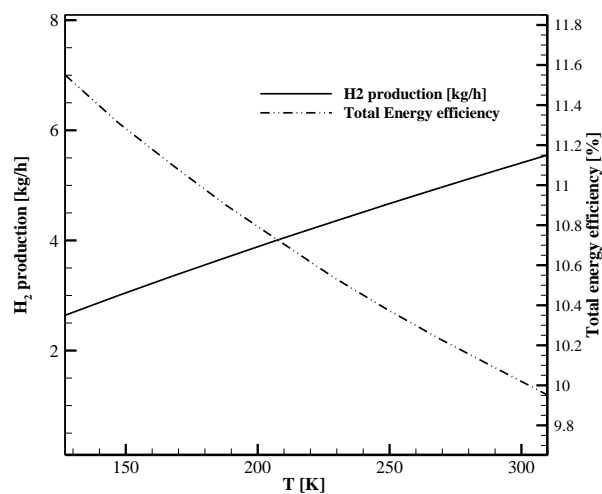
شکل ۸. نمودارهای پلاریزاسیون الکتروکاتولیزر غشا پلیمری در فشارهای مختلف



شکل ۱۱. تأثیر میزان شدت تابش خورشیدی بر راندمان انرژی و آگزرژی الکتروکاتولیزر



شکل ۱۰. نمودارهای پلاریزاسیون الکتروکاتولیزر غشا پلیمری در ضخامت‌های مختلف غشا



شکل ۱۲. تأثیر تابش خورشیدی بر تولید هیدروژن

میزان تابش خورشیدی از ۱۱۷ وات بر متر مربع تا ۳۱۰ وات بر متر مربع، میزان هیدروژن تولیدی ۵۸ درصد افزایش می‌یابد.

شکل ۱۲ تأثیر شدت تابش خورشیدی را بر میزان هیدروژن تولیدی و راندمان انرژی کل سیستم نشان می‌دهد. با افزایش

هیدروژن تولیدی رابطه مستقیم با توان تغذیه الکتروولایزر دارد. وقتی توان ورودی به الکتروولایزر افزایش یابد، مقدار هیدروژن تولیدی هم افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش میزان شدت تابش خورشیدی از ۱۲۷ وات بر متر مربع تا ۳۱۰ وات بر متر مربع، راندمان انرژی کل سیستم به میزان ۱۰ درصد کاهش می‌یابد که دلیل آن کاهش راندمان الکتروولایزر است.

### ۵. نتیجه‌گیری

به دلیل بعضی مزایای نسبی مانند کارایی، عملکرد و راندمان ولتاژ بالاتر، چگالی جریان بیشتر، تولید هیدروژن و اکسیژن خالص و فشرده و کم‌حجم بودن، استفاده از الکتروولایزهای غشا پلیمری نسبت به بقیه انواع آن رایج‌تر است. در این مقاله، آنالیز ترمودینامیکی برای یک الکتروولایزر غشا پلیمری که در ارتباط با سیستم خورشیدی متمرکز برج خورشیدی است انجام شده است. با معرفی سیستم و به‌کمک معادلات الکتروشیمیایی - مکانیکی، سل الکتروولایزر مدلسازی گردید و اثر شدت تابش، چگالی جریان و پارامترهای عملکردی الکتروولایزر بر میزان هیدروژن تولیدی و عملکرد الکتروولایزر بررسی شد. نتایج نشان می‌دهند که با افزایش چگالی جریان و یا به‌عبارتی افزایش تعداد هیدروژن تولیدی، ولتاژ الکتروولایزر افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش دما و کاهش فشار، عملکرد سل الکتروولایزر افزایش می‌یابد. افزایش راندمان‌های انرژی و انرژی الکتروولایزر به دلیل تسریع واکنش شیمیایی و افزایش چگالی تبادل جریان و در نتیجه کاهش افت ولتاژ فعال‌سازی و اهمیت می‌شود. با در نظر گرفتن غشاهای نفیونی مختلف مشخص شد که نفیون ۱۱۵ به‌علت کمتر بودن ضخامت آن و به‌دنبال آن کاهش افت ولتاژ اهمیت عملکرد بهتری نسبت به سایر غشاهای در نظر گرفته شده دارد. با افزایش شدت تابش خورشیدی به میزان ۱۴۵ درصد، راندمان‌های انرژی و انرژی الکتروولایزر هر دو به میزان ۱۳/۸ درصد کاهش و میزان هیدروژن تولیدی ۱۱۰ درصد افزایش می‌یابد.

### فهرست علائم

$A_n$	مساحت میدان هلیوستات ( $m^2$ )
$I$	شدت تابش ورودی ( $W/m^2$ )، جریان ( $A$ )
$\eta_{opt}$	راندمان نوری میدان هلیوستات
$Q$	نرخ گرما ( $W$ )
$T$	دما ( $K$ )

$P$	فشار ( $bar$ )
$\eta$	راندمان انرژی
$\psi$	راندمان انرژی
$Ex$	نرخ انرژی ( $W$ )
$Cp$	ظرفیت گرمای ویژه ( $Kj/Kg.K$ )
$W$	کار مکانیکی ( $W$ )
$V$	ولتاژ ( $V$ )
$I$	جریان ( $A$ )
$G$	انرژی آزاد گیبس ( $KJ/mol$ )
$H$	انتالپی ( $J/mol$ )
$S$	آنترپی ( $J/mol K$ )
$F$	ثابت فارادی ( $96485 C/mol$ )
$n$	تعداد الکترون مبادله‌شده
$R$	ثابت جهانی گازها ( $8.314 J/K mol$ )
$LHV$	ارزش حرارتی پایین ( $KJ/mol$ )
$E_{act,i}$	انرژی فعال‌سازی ( $KJ/mol$ )
$L$	ضخامت غشا ( $m$ )
$J$	چگالی جریان ( $A/m^2$ )
$\sigma$	رسانندگی یونی ( $1/\Omega.cm$ )، تولید آنترپی ( $J/mol$ )
$\lambda$	محتوی آب
$N$	دبی جریان ( $mol/s.m^2$ )
$0$	شرایط استاندارد محیط، ولتاژ مدار باز
$solar$	خورشیدی
$HE$	موتور حرارتی
$GEN$	ژنراتور الکتریکی
$rec$	دریافت‌کننده
$h$	هلیوستات
$abs$	جذب‌شده
$act$	اضافه ولتاژ فعال‌سازی
$ohm$	اضافه ولتاژ اهمیک
$a$	آند
$c$	کاتد
$pem$	الکتروولایزر غشا پلیمری
$mem$	غشا

### ۶. پیوست

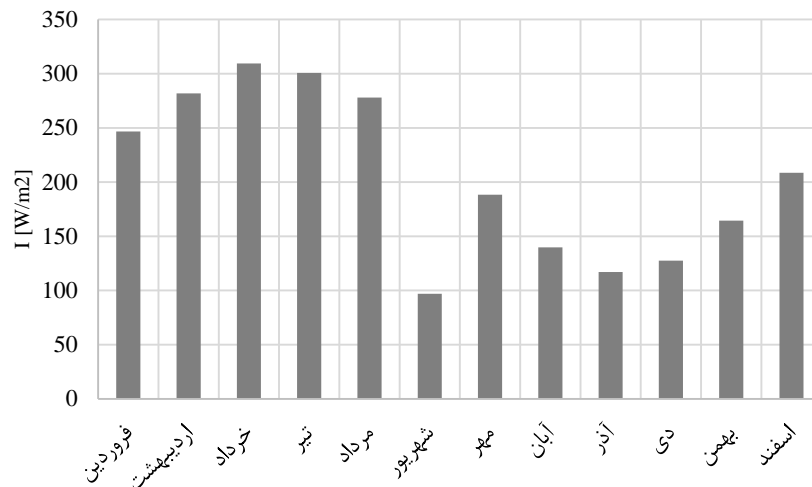
#### ۶-۱. برج خورشیدی

فناوری برج خورشیدی از یک میدان متشکل از آینه تشکیل شده است که تابش خورشید را روی یک دریافت‌کننده که در بالای یک برج مرکزی قرار دارد، متمرکز می‌کند و در برج تبدیل به گرما می‌شود. گرمای تولیدی در یک چرخه حرارتی دینامیکی، که معمولاً چرخه بخار آب است، برق تولید می‌کند. این میدان شامل شمار زیادی از آینه‌ها به نام هلیوستات است که توسط

امروزه از آب/بخار، هوا و یا نمک مذاب جهت انتقال حرارت به سیکل تولید توان استفاده می‌کنند. بر اساس طراحی دریافت‌کننده و سیال کاری، در حال حاضر سیستم‌های برج خورشیدی در دمای ۶۰۰ درجه سلسیوس برای نمک مذاب طراحی و استفاده می‌شوند. امروزه برج‌های خورشیدی در اندازه‌های معمول بین ۱۰ تا ۵۰ مگاوات طراحی و استفاده می‌شوند.

سیستم‌های کامپیوتری کنترل می‌شوند. هلیوستات‌ها وظیفه منعکس کردن نور روی دریافت‌کننده مرکزی را دارند که در آن یک مایع گرم می‌شود. برج‌های خورشیدی نسبت به سیستم‌های دیگر نظیر فرنزل خطی و ترف پارابولیک دماهای بالاتری دارند، زیرا نور بیشتری در دریافت‌کننده مرکزی وجود منعکس می‌شود و اتلافات گرما در آن نقطه به حداقل می‌رسد. برج‌های خورشیدی

### ۲-۶. منحنی تابش خورشیدی ماهانه شهر اصفهان



شکل ۱۳. منحنی ماهانه تابش خورشیدی شهر اصفهان

### ۳-۶. نرم‌افزار EES

است، مثل شبیه‌سازی حالت پایدار اغلب سیستم‌های مهندسی، استفاده شود. این نرم‌افزار دو مزیت عمده نسبت به دیگر نرم‌افزارهای حل همزمان معادلات دارد. این نرم‌افزار به‌طور خودکار معادلاتی که باید همزمان حل شوند را شناسایی و دسته‌بندی می‌کند. این مورد مراحل کار را برای کاربر بسیار ساده می‌کند. همچنین EES یک سری توابع جهت محاسبه خواص ترموفیزیکی مواد در اختیار کاربر می‌گذارد. کتابخانه توابع ریاضی و توابع خواص ترموفیزیکی مواد در این نرم‌افزار بسیار گسترده است.

نرم‌افزار EES، که مخفف Engineering Equations Solver است، نرم‌افزاری برای حل معادلات دیفرانسیل غیرخطی است این نرم‌افزار، در علم ترمودینامیک برای حل مسائل به‌کار می‌رود که لازم است همزمان با تنظیم معادلات از خواص ترموفیزیکی مواد نیز استفاده گردد. گاه لازم است یک مسئله چندین بار با داده‌های مختلف حل شود. این نرم‌افزار در اصل برای حل دستگاه معادلات طراحی شده و برای تمامی رشته‌هایی که با معادلات ریاضی سروکار دارند مناسب است. این نرم‌افزار می‌تواند برای شبیه‌سازی سیستم‌هایی که معادلات حاکم بر آنها جبری و دیفرانسیل ساده

### ۷. مأخذ

[1] F. Barbir, PEM electrolysis for production of hydrogen from renewable energy sources, *Solar energy*, vol. 78, no. 5, pp. 661-669, 2005.

[2] I. Dincer, Green methods for hydrogen production, *International journal of hydrogen energy*, vol. 37, no. 2, pp. 1954-1971, 2012.

- [3] S. A. Sherif, D. Y. Goswami, E. L. Stefanakos, A. Steinfeld, *Handbook of hydrogen energy*, CRC Press, 2014.
- [4] A. Steinfeld, Solar thermochemical production of hydrogen-a review, *Solar energy*, vol. 78, no. 5, pp. 603-615, 2005.
- [5] A. A. AlZahrani, I. Dincer, Design and analysis of a solar tower based integrated system using high temperature electrolyzer for hydrogen production, *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 41, no. 19, pp. 8042-8056, 2016.
- [6] A. A. Rahim, A. S. Tijani, S. K. Kamarudin, S. Hanapi, An overview of polymer electrolyte membrane electrolyzer for hydrogen production: Modeling and mass transport, *Journal of Power Sources*, vol. 309, pp. 56-65, 2016.
- [7] H. Janssen, J. C. Bringmann, B. Emonts, V. Schröder, Safety-related studies on hydrogen production in high-pressure electrolyzers و International Journal of Hydrogen Energy, vol. 29, no.7, pp. 759-770, 2004.
- [8] Z. Abdin, C. J. Webb, E. M. Gray, Modelling and simulation of a proton exchange membrane (PEM) electrolyser cell, *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 40, no. 39, pp. 13243-13257, 2015.
- [9] S. Ahmadi, A. H. Fakehi Khorasani, Optimization of the operating temperature and pressure of the PEM electrolyzer based on energy and exergy analysis, *Iranina journal of Energy*, vol. 18, no. 3, pp. 1-14, 2015 (in Persian).
- [10] A. Godula-Jopek, *Hydrogen production: by electrolysis*, John Wiley & Sons, 2015.
- [11] K. B. Kokoha, E. Mayousseb, T. W. Napporna, K. Servata, N. Guilletb, E. Soyezc, A. Grosjeanc, A. Rakotondrainibéc, J. Paul-Josephc, Efficient multi-metallic anode catalysts in a PEM water electrolyzer, *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 39, no.5, pp. 1924-1931, 2014.
- [12] K. W. Harrison, E. Hernández-Pacheco, M. Mann, H. Salehfar, Semiempirical model for determining PEM electrolyzer stack characteristic, *Journal of fuel cell science and technology*, vol. 3, no. 2, pp. 220-223, 2006.
- [13] N. V. Dale, M. D. Mann, H. Salehfar, Semiempirical model based on thermodynamic principles for determining 6kW proton exchange membrane electrolyzer stack characteristics, *Journal of Power Sources*, vol. 185, no. 2, pp. 1348-1353, 2008.
- [14] Santarelli, Massimo, P. Medina, M. Cali, Fitting regression model and experimental validation for a high-pressure PEM electrolyzer, *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 34, no. 6, pp. 2519-2530, 2009.
- [15] M. Chandesris, V. Médeau, N. Guillet, S. Chelghoum, D. Thoby, F. Fouda-Onana, Membrane degradation in PEM water electrolyzer: Numerical modeling and experimental evidence of the influence of temperature and current density, *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 40, no. 3, pp. 1353-1366, 2015.
- [16] D. Scamman, H. Bustamante, S. Hallett, M. Newborough, Off-grid solar-hydrogen generation by passive electrolysis, *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 39, no. 35, pp. 19855-19868, 2014.
- [17] T. L. Gibson, N. A. Kelly, Optimization of solar powered hydrogen production using photovoltaic electrolysis devices, *International journal of hydrogen energy*, vol. 33, no. 21, pp. 5931-5940, 2008.
- [18] B. Paul, J. Andrews, Optimal coupling of PV arrays to PEM electrolyzers in solar-hydrogen systems for remote area power supply, *International journal of hydrogen energy*, vol. 33, no. 2, pp. 490-498, 2008.
- [19] S. A. Kalogirou, Solar thermal collectors and applications, *Progress in energy and combustion science*, vol. 30, no. 3, pp. 231-295, 2004.
- [20] A. A. AlZahrani, I. Dincer, Design and analysis of a solar tower based integrated system using high temperature electrolyzer for hydrogen production, *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 41, no. 19, pp. 8042-8056, 2016.
- [21] A. S. Joshi, I. Dincer, B. V. Reddy, Solar hydrogen production: a comparative performance assessment, *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 36, no. 17, pp. 11246-11257, 2011.
- [22] M. Ni, M. K. Leung, D. Y. Leung, Energy and exergy analysis of hydrogen production by a

- proton exchange membrane (PEM) electrolyzer plant, *Energy conversion and management*, vol. 49, no. 10, pp. 2748-2756, 2008.
- [23] C. Y. Biaku, N. V. Dale, M. D. Mann, H. Salehfar, A. J. Peters, T. Han, A semiempirical study of the temperature dependence of the anode charge transfer coefficient of a 6 kW PEM electrolyzer, *International journal of hydrogen energy*, vol. 33, no. 16, pp. 4247-4254, 2008.
- [24] R. García-Valverde N. Espinosa, A. Urbina, Simple PEM water electrolyser model and experimental validation, *International journal of hydrogen energy*, vol. 37, no. 2, pp. 1927-1938, 2012.
- [25] R. Rivero, M. Garfias, Standard chemical exergy of elements updated, *International journal of Energy*, vol. 31, no. 15, pp. 3310-3326, 2006.
- [26] F. Marangio, M. Santarelli, M. Cali, Theoretical model and experimental analysis of a high pressure PEM water electrolyser for hydrogen production, *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 34, no. 3, pp. 1143-1158, 2009.
- [27] T. Ioroi, K. Yasuda, Z. Siroma, N. Fujiwara, Y. Miyazaki, Thin film electrocatalyst layer for unitized regenerative polymer electrolyte fuel cells, *Journal of Power sources*, vol. 112, no. 2, pp. 583-587, 2002.