

# بهینه سازی دما و فشار عملکردی الکترو لایزر غشا پلیمری بر اساس مدل سازی و آنالیز انرژی و اگسرژی

سمیه احمدی<sup>۱</sup>، امیرحسین فاکهی خراسانی<sup>۲</sup>

تاریخ پذیرش مقاله:

۹۴/۲/۹

تاریخ دریافت مقاله:

۹۳/۸/۵

## چکیده:

نگرانی های زیست محیطی جهانی و افزایش نیاز به استفاده از انرژی، همراه با پیشرفت پایدار در زمینه فناوری های انرژی تجدیدپذیر باعث ایجاد قالب های جدیدی برای استفاده عمومی از منابع انرژی نو مانند هیدروژن گشته است. الکترو لایزرهای غشا پلیمری یکی از رایج ترین مدل های انرژی جهت تولید هیدروژن می باشند. در این پژوهش سعی بر آن است تا با آنالیز اگسرژی و انرژی الکترو لایزرهای غشا پلیمری تاثیر پارامترهای مختلف عملکردی بر بازده انرژی و اگسرژی کل سیستم در نظر گرفته شود. برای این منظور، ابتدا معادلات الکتریکی-شیمیایی- مکانیکی حاکم بر سیستم الکترو لایزر غشا پلیمری بیان شده و مدل اگسرژی- انرژی آن توسط نرم افزار متلب توسعه داده شده و در انتها، نتایج حاصل از آن مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته و مقادیر بهینه پارامترهای عملکردی دما و فشار با استفاده از بازده اگسرژی معرفی می گردد. نتایج حاکی از آن است که افزایش فشار و همچنین افزایش دما سبب نزدیک شدن بازده اگسرژی سیستم به بازده انرژی آن و همچنین افزایش عملکرد الکترو لایزر می گردد. بهینه مقدار عملکردی دما برابر ۲۷۳ کلوین و مناسبترین فشار برابر ۳ اتمسفر می باشد. همچنین با افزایش چگالی جریان الکترو لایزر و یا عبارتی افزایش تعداد هیدروژن های تولیدی، پتانسیل الکترو لایزر افزایش می یابد.

## کلمات کلیدی:

الکترو لایزر غشا پلیمری، اگسرژی، مدل سازی و شبیه سازی انرژی

## مقدمه

نگرانی های زیست محیطی جهانی و افزایش نیاز به استفاده از انرژی، همراه با پیشرفت پایدار در زمینه فناوری های انرژی تجدیدپذیر باعث ایجاد قالب های جدیدی برای استفاده عمومی از منابع انرژی نو و تجدیدپذیر گشته است [۴]. یکی از منابع تولید انرژی سازگار با محیط زیست هیدروژن می باشد و اغلب در سیستم های تولید توان جهت افزایش قابلیت اطمینان سیستم های تجدیدپذیر مورد استفاده قرار می گیرد. تولید هیدروژن از سوخت های فسیلی، الکترولایزر آب و تجزیه ترموشیمیایی آب متداول ترین فرایندهای تولید هیدروژن است [۳، ۵، ۱ و ۱۲]. در عین حال، الکترولایزرها به دلیل دارا بودن سادگی سیستم و پاک بودن از مرسوم ترین سیستم های تولید هیدروژن در دنیا می باشند [۲].

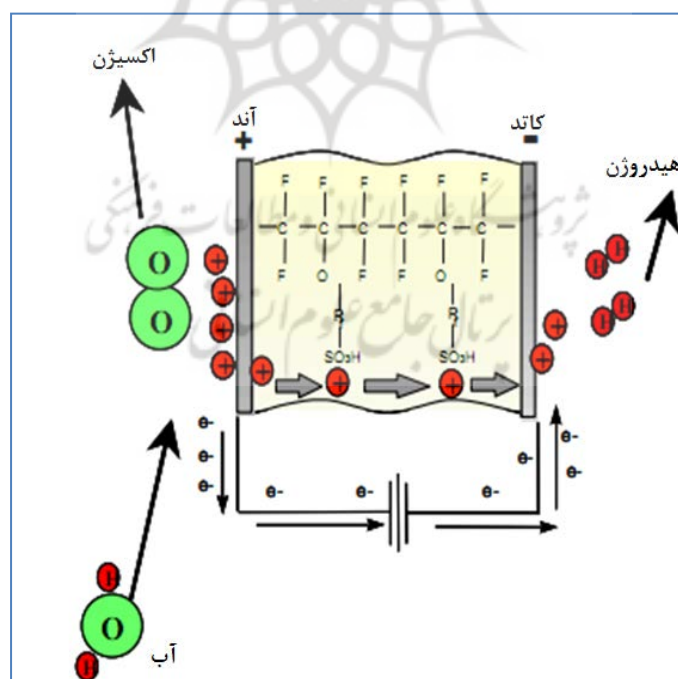
الکترولایزر وسیله ای است که با استفاده از جریان مستقیم الکتریکی، آب را به هیدروژن و اکسیژن تجزیه می کند. به عبارت دیگر، وسیله تبدیل انرژی الکتریکی به انرژی شیمیایی است که می تواند به عنوان یک بار DC غیر خطی حساس به ولتاژ در نظر گرفته شود. با افزایش مقدار ولتاژ DC اعمالی به الکترولایزر، جریان آن بیشتر شده و میزان بیشتری هیدروژن تولید می گردد [۷]. کاتد، آند، الکترولیت و جداسازنده از اجزای اصلی تشکیل دهنده الکترولایزرها هستند. الکترولیت های قلیایی و تبادل پروتونی از متداول ترین الکترولیت های مورد استفاده در حال حاضر می باشند. بر اساس نوع اجزای مذکور، الکترولایزرها به پنج دسته اصلی الکترولایزرهای قلیایی سنتی و پیشرفته، الکترولایزرهای غشا پلیمری، الکترولایزرهای غشای غیر آلی و الکترولایزرهای اکسید جامد تقسیم بندی می شوند. در میان انواع مختلف الکترولایزرها، الکترولایزر غشا پلیمری به دلیل مزایای نسبی زیر دارای کاربرد بیشتری می باشد [۲]:

- کارایی و عملکرد بالاتر
- چگالی جریان بسیار بیشتر (تا حدود ۱۳ آمپر بر سانتی متر مربع)
- دامنه وسیع چگالی جریان که خود معادل با سرعت تولید انعطاف پذیرتر می باشد.
- تولید هیدروژن و اکسیژن بسیار خالص
- ایمنی بیشتر (عدم گردش الکترولیت خورنده)
- امکان اختلاف فشار بالاتر از میان غشا
- جداسازی ذاتی گاز توسط الکترولیت غشا
- امکان ترکیب الکترولایزر و پیل سوختی

از این رو در این پژوهش، الکترولایزر تبادل پروتونی مورد مطالعه قرار گرفته شده است. شماتیک کلی این نوع از الکترولایزرها در شکل (۱) آورده شده است. تاکنون مدلسازی الکترولایزرهای تبادل پروتونی (غشا پلیمری) توسط برخی از محققان و دانشمندان مورد بررسی قرار گرفته است؛ آقای کوان و همکارانشان تاثیر کاتالیست های آندی چند ماده ای را بر عملکرد الکترولایزرهای غشا پلیمری و تاثیر لایه نشانی کاتالیستی بر روی انواع غشاهای نافونی را نشان داده اند [۸].

همچنین آقای سیراکاسانو و همکارانشان تاثیر جایگزینی غشای پلی سولفونات را با غشای نافیونی در این نوع از الکترولایزرها مورد بررسی قرار داده اند. نتایج این پژوهش عملکرد خوبی را برای الکترولایزرهای غشا پلیمری نشان می‌دهد [۹]. همچنین ایشان در گروه تحقیقاتی دیگر، بهترین پارامترهای گردآوری استک الکترولایزر را اعم از فشار و دمای پرس گرم و ..... بررسی و میزان بهینه را جهت بیشترین بازدهی الکتریکی مشخص نموده اند [۱۴]. علاوه بر این پژوهش‌های عملکردی، تاکنون تحقیقات مدلسازی گوناگونی نیز بر روی الکترولایزرهای غشا پلیمری انجام گرفته شده که از جمله این تحقیقات می‌توان از مدلسازی‌ها و شبیه‌سازی‌های دینامیکی مختلفی که برای تولید هیدروژن از این نوع از مبدل‌های انرژی استفاده شده نام برد. برای این منظور معمولاً از معادلات باتلر والمر، ولتاژ مدار باز، معادلات نرس و .... جهت شبیه‌سازی دینامیکی استفاده می‌گردد [۶ و ۷].

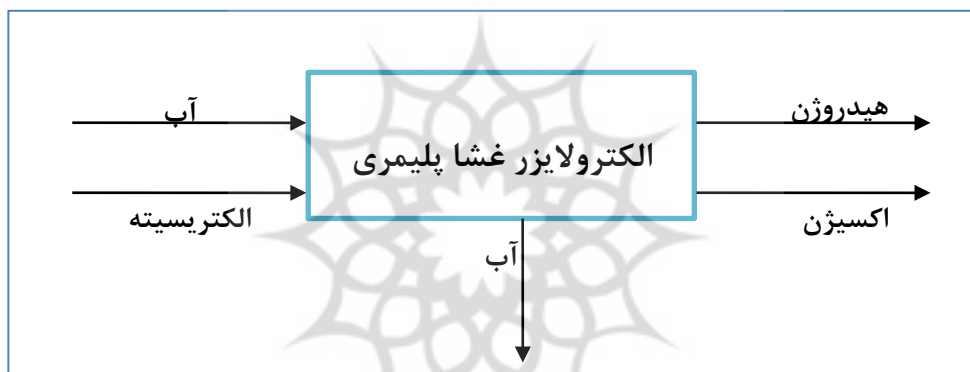
در این پژوهش سعی بر آن است تا با آنالیز اگسرژی و انرژی الکترولایزرهای غشا پلیمری تاثیر پارامترهای مختلف عملکردی بر بازده انرژی و اگسرژی کل سیستم در نظر گرفته شود. برای این منظور، ابتدا معادلات الکتریکی-شیمیایی-مکانیکی حاکم بر سیستم الکترولایزر غشا پلیمری بیان شده و مدل اگسرژی-انرژی آن توسط نرم افزار متلب توسعه داده می‌شود و در انتها، نتایج حاصل از آن مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته و مقادیر بهینه پارامترهای عملکردی دما و فشار با استفاده از بازده اگسرژی معرفی می‌گردد.



شکل (۱) شماتیک الکترولایزرهای غشای پلیمری

## مدلسازی سیستم

در این پژوهش، الکترولیزر غشا پلیمری بصورت سیستم بسته مدلسازی شده و معادلات انرژی و اگسرژی حاکم بر این سیستم پیشرفته تبدیل انرژی مشخص شده است تا براساس آن بازدهی انرژی و اگسرژی محاسبه شده و تاثیر تغییرات پارامترهای عملکردی بر این بازدهی ها مشخص گردد. از آنجایی که بازه عملکردی هریک از پارامترها با توجه به خواص الکترومکانیکی و شیمیایی اجزاء الکترولیزر مشخص است، میزان بهینه هریک از این متغیرها مشخص می گردد. خطوط جریان انرژی سیستم بسته الکترولیزر در شکل (۲) نشان داده شده است.



شکل (۲) شماتیک سیستم الکترولیزر غشا پلیمری

همانگونه که مشاهده می شود، با استفاده از جریان مستقیم الکتریسته به الکتروود ها در یک سلول الکترولیزر، آب به دو قسمت هیدروژن و اکسیژن تبدیل می شود. مدلسازی و شبیه سازی الکترولیزر بر اساس معادلات ترمودینامیکی و الکتروشیمیایی انجام می گردد [۱۸، ۱۳، ۱۰، ۱۶، ۱۱ و ۱۵].

تقاضای انرژی الکترولیزرهای غشا پلیمری از رابطه (۱) محاسبه می گردد:

$$\Delta H = \Delta G + T\Delta S \quad (1)$$

که در آن،  $\Delta G$  تقاضای انرژی الکتریکی و یا تغییرات در انرژی آزاد گیبس می باشد و  $T\Delta S$  تقاضای انرژی گرمایی است. میزان کل تقاضای انرژی به طور تئوریک برابر است با انرژی مورد نیاز شکست آب بدون در نظر گرفتن اتلاف موجود در سیستم های واقعی، اتلاف انرژی اجتناب ناپذیر است، از این رو، عملکرد سیستم را می توان با استفاده از بازدهی انرژی ( $\eta$ ) و بازدهی اگسرژی ( $\psi$ ) محاسبه نمود. معادلات حاکم بر این دو بازدهی عبارتند از:

$$\eta = \frac{\dot{N}_{H_2} LHV}{P_{elec}} \quad (۲)$$

و

$$\psi = \frac{\dot{N}_{H_2} E_{H_2}}{E_{elec} + E_{H_2O,in} - E_{O_2} - E_{H_2O,out}} \quad (۳)$$

که در آن،  $LHV$  ارزش حرارتی پایین هیدروژن،  $\dot{N}_{H_2}$  میزان هیدروژن خروجی از الکترولیزر،  $P_{elec}$  میزان انرژی الکتریکی ورودی به الکترولیزر،  $E_{elec}$  آگسرژی الکتریکی،  $E_{H_2O,in}$  آگسرژی آب ورودی به الکترولیزر،  $E_{O_2}$  آگسرژی اکسیژن خروجی از الکترولیزر،  $E_{H_2O,out}$  آگسرژی آب خروجی از الکترولیزر و  $E_{H_2}$  آگسرژی هیدروژن خروجی از الکترولیزر است.

میزان هیدروژن خروجی از الکترولیزر از رابطه (۴) محاسبه می شود:

$$\dot{N}_{H_2} = \frac{J}{2F} \quad (۴)$$

و بنا بر رابطه زیر میزان مولی آب واکنش داده شده برابر با میزان هیدروژن و میزان اکسیژن تولیدی نصف هیدروژن تولیدی خواهد بود.



$$\dot{N}_{H_2O,reacted} = \dot{N}_{H_2} = \frac{J}{2F} \quad (۶)$$

$$\dot{N}_{O_2} = \frac{J}{4F} \quad (۷)$$

$$\dot{N}_{H_2O,out} = \dot{N}_{H_2O,in} - \frac{J}{2F} \quad (۸)$$

بنابراین، میزان آب خروجی از الکترولیزر برابر است با:

که در آنها  $J$  چگالی جریان و  $F$  ثابت فارادی است.

با صرف نظر از آگسرژی جنبشی و پتانسیلی، میزان آگسرژی هر یک از واکنش دهنده ها و محصولات سیستم از رابطه (۹) حاصل می گردد:

$$E_i = \dot{N}_i (E_i^{ch} + E_i^{ph}) \quad (۹)$$

که در  $E_i^{ch}$  و  $E_i^{ph}$  به ترتیب آگسرژی فیزیکی و شیمیایی مولفه های سیستم است. آگسرژی فیزیکی هر یک از مولفه ها از رابطه (۱۰) محاسبه می گردد.

$$E_i^{ph} = (H - H_0) - T(S - S_0) = C_p T_0 \left( \frac{T_i}{T_0} - 1 - \ln \left( \frac{T_i}{T_0} \right) + \ln \left( \frac{P_i}{P_0} \right) \right) \quad (۱۰)$$

که در آن،  $T_i$  و  $P_i$  به ترتیب دما و فشار محصولات و واکنش دهنده ها و  $T_0$  و  $P_0$  به ترتیب دما و فشار در شرایط استاندارد است.

اگر انرژی و انرژی مورد نیاز الکتریکی با هم برابر و با استفاده از معادله الکتروشیمیایی (۱۱) محاسبه می گردند.

$$E_{elec} = P_{elec} = JV \quad (11)$$

$$V = V_0 + V_{act,a} + V_{act,c} + V_{ohmic} \quad (12)$$

که در آن،  $V$  ولتاژ سیستم است و همانگونه که در معادله (۱۲) مشاهده شد، از حاصل جمع ولتاژ برگشت پذیر ( $V_0$ ) با ولتاژ افت فعالسازی در آند و کاتد ( $V_{act,c}$  و  $V_{act,a}$ ) و ولتاژ اهمیک ( $V_{ohmic}$ ) محاسبه می شود.

همانگونه که از معادله (۱۳) پیداست، افت فعالسازی در هر یک از الکترودهای الکترولایزر (آند و کاتد) تا حد زیادی به چگالی جریان تبدلی وابسته است. این پارامتر نشان دهنده آمادگی الکترودها برای واکنش الکتروشیمیایی است و بنا بر معادله (۱۴) محاسبه می گردد و بالا بودن میزان آن برابر آمادگی بالای واکنش الکترودهاست.

$$V_{act,i} = \frac{RT}{F} \sinh^{-1} \left( \frac{J}{2J_{0,i}} \right) = \frac{RT}{F} \ln \left( \frac{J}{2J_{0,i}} + \sqrt{\left( \frac{J}{2J_{0,i}} \right)^2 + 1} \right) \quad i = a, c \quad (13)$$

$$J_{0,i} = J_i^{ref} \exp\left(-\frac{E_{act,i}}{RT}\right) \quad (14)$$

که در آن،  $J_i^{ref}$  چگالی جریان تبدلی مرجع و  $E_{act,i}$  انرژی فعالسازی آند و کاتد می باشد.

افت پتانسیل اهمیک به دلیل مقاومت الکتریکی در سلول های الکترولایزر حاصل می گردد و از آنجایی که مقاومت الکترودها و صفحات بسیار پایین است، جهت محاسبه افت پتانسیل اهمیک، افت اهمیک غشای تبدل یونی در نظر گرفته می شود. افت پتانسیل غشای تبدل یونی نشانگر مقاومت یونی غشا در برابر حرکت و انتقال هیدروژن می باشد و مقاومت یونی به عواملی مانند رطوبت غشا، ضخامت آن و همچنین دمای غشا بستگی دارد. بنابراین، افت پتانسیل اهمیک در الکترولایزرهای غشا پلیمری برابر است با:

$$V_{ohmic} = JR_{PEM} \quad (15)$$

$$R_{PEM} = \int_0^L \frac{dx}{\sigma_x} \quad (16)$$

که در آن،  $\sigma_x$  رسانندگی یونی غشای تبدل یونی است و از رابطه (۱۷) محاسبه می گردد.

$$\sigma_x = [0.5139\lambda(x) - 0.326] \exp\left[1263\left(\frac{1}{303} - \frac{1}{T}\right)\right] \quad (17)$$

در رابطه بالا،  $x$  المانی از غشای تبادل پروتونی است و  $\lambda(x)$  محتویات آب در المان مذکور است. از آنجایی که پرتون‌ها در سطح غشا با استفاده از مولکول‌های آب انتقال می‌یابد، محتویات آب در رسانندگی یونی غشا بسیار موثر می‌باشد. این محتویات آب در سطح مشترک بین غشا و اکترودها با استفاده از رابطه (۱۸) محاسبه می‌گردد.

$$\lambda(x) = \frac{\lambda_a - \lambda_c}{L} x + \lambda_c \quad (18)$$

که در آن،  $\lambda_a$  و  $\lambda_c$  به ترتیب محتویات آب در فصل مشترک غشا با آند و کاتد و  $L$  ضخامت غشای نافویونی الکترولایزر می‌باشد.

بر اساس مدل ظرفیت گرمایی فشرده، تراز انرژی حرارتی در سلول الکترولایزر بر اساس معادله (۱۹) بیان می‌گردد.

$$\dot{Q}_{gen} = \dot{Q}_{loss} + \dot{Q}_{H_2O,out} \quad (19)$$

که در آن،  $\dot{Q}_{gen}$  انرژی حرارتی تولید شده در سلول، انرژی حرارتی تلف شده و  $\dot{Q}_{H_2O,out}$  انرژی حرارتی آب خروجی از الکترولایزر می‌باشد. پتانسیل برگشت ناپذیر در عملکرد الکترولایزر غشا پلیمری به دلیل گرمای ناشی از آنتروپی تولیدی  $\sigma$  بنا بر رابطه زیر حاصل می‌گردد.

$$\sigma = 2F(V_{act,a} + V_{act,c} + V_{ohmic}) \quad (20)$$

در صورتی که  $\sigma \geq T\Delta S$  گرمای برگشت ناپذیر سلول برابر میزان انرژی لازم جهت شکست مولکول‌های آب باشد، نیازی به هیچ گرمای خارجی وجود ندارد. از این رو:

$$E_{heat} = \dot{Q}_{gen} = 0 \quad (21)$$

اما، در صورتی که  $\sigma < T\Delta S$  گرمای تولید شده قادر به تامین تقاضای انرژی مورد نیاز سلول نباشد، به انرژی گرمایی مازاد احتیاج می‌باشد. از این رو، گرمای ورودی به الکترولایزر برابر است با:

$$\dot{Q}_{gen} = [T\Delta S - \sigma] \dot{N}_{H_2O} = \frac{J}{2F} [T\Delta S - \sigma] \quad (22)$$

همچنین میزان اتلاف گرمایی بنا بر رابطه (۲۳) قابل محاسبه است که در آن،  $R_t$  برابر مقاومت حرارتی کل الکترولایزر می‌باشد.

$$\dot{Q}_{loss} = \frac{1}{R_t} (T - T_0) \quad (23)$$

بنابر روابط (۱۹) تا (۲۳) انرژی حرارتی آب خروجی از الکترولایزر برابر است با:

$$\dot{Q}_{H_2O,out} = \dot{Q}_{gen} - \dot{Q}_{loss} = \dot{N}_{H_2O,out} C(T_{H_2O,out} - T_0) \quad (24)$$

که بر اساس رابطه بالا، دمای آب خروجی از الکترولایزر قابل محاسبه می‌باشد و بر اساس رابطه (۹) اگسرژی این خط جریانی قابل محاسبه است.

پارامترهای ثابت های مورد استفاده در فرایند مدلسازی در جدول (۱) گردآوری شده است.

جدول (۱) پارامترهای ثابت مورد استفاده جهت مدل‌سازی انرژی و آگسرژی سیستم الکترولایزر غشا پلیمری

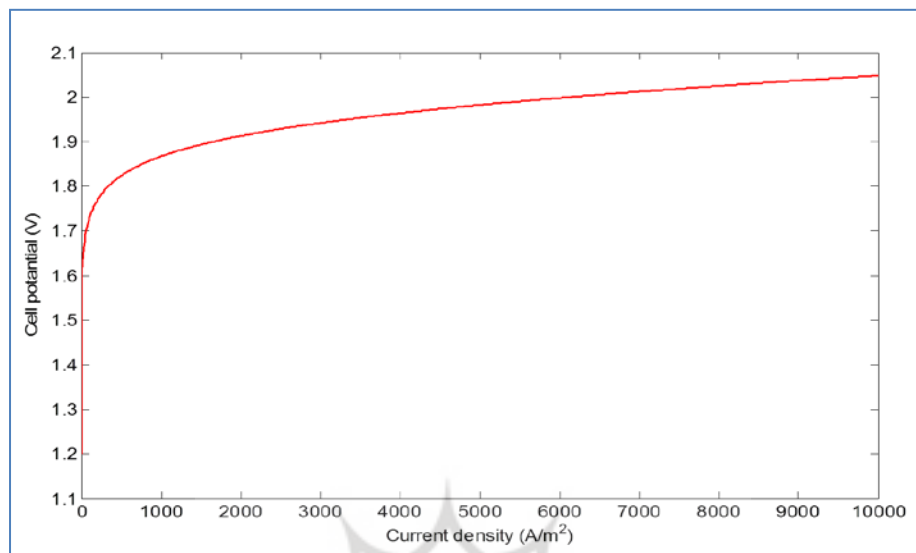
ردیف	علامت اختصاری	پارامتر	مقدار	واحد
۱	$E_{act,a}$	انرژی فعالسازی آند	۷۶	$\text{kJ mol}^{-1}$
۲	$E_{act,c}$	انرژی فعالسازی کاتد	۱۸	$\text{kJ mol}^{-1}$
۳	$\lambda_a$	محتویات آب در فصل مشترک آند-غشا	۱۴	....
۴	$\lambda_c$	محتویات آب در فصل مشترک کاتد-غشا	۱۰	....
۵	$L$	ضخامت غشا	۵۰	$\mu\text{m}$
۶	$V_0$	پتانسیل برگشت پذیر الکترولایزر	۱/۲	V
۷	$R_t$	مقاومت حرارتی کل الکترولایزر	۰/۱۶۷	$^{\circ}\text{C W}^{-1}$
۸	$J_a^{ref}$	چگالی جریان تبدلی مرجع آند	۱۰-۵	$\text{Am}^{-2}$
۹	$J_c^{ref}$	چگالی جریان تبدلی مرجع کاتد	۱۰	$\text{Am}^{-2}$
۱۰	$P_{O_2}$	فشار اکسیژن	۱	atm
۱۱	$P_{H_2}$	فشار هیدروژن	۱	atm
۱۲	$P_{H_2O}$	فشار آب	۱	atm
۱۳	$LHV_{H_2}$	ارزش حرارتی پایین هیدروژن	۲۴۲	$\text{kJ/kmol}$
۱۴	$Cp_{H_2}$	میانگین گرمای ویژه هیدروژن	۱۴/۳	$\text{kJ.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$
۱۵	$Cp_{O_2}$	میانگین گرمای ویژه اکسیژن	۱/۰۰۵	$\text{kJ.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$

## تحلیل نتایج:

## نمودار پلاریزه الکترولایزر

در شکل (۳) نمودار پلاریزه الکترولایزر نشان داده شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود، با افزایش چگالی جریان الکترولایزر و یا عبارتی افزایش تعداد هیدروژن های تولیدی، پتانسیل الکترولایزر افزایش می‌یابد. این امر بدان دلیل است که با افزایش چگالی جریان هم افت فعالسازی در آند و کاتد بیشتر می‌شود و هم افت اهمیک الکترولایزر. بنا بر این، افزایش در هیدروژن تولید شده و یا عبارتی افزایش در چگالی جریان باعث افزایش در ولتاژ سلول می‌شود که نتیجه آن کاهش بازدهی انرژی می‌باشد.

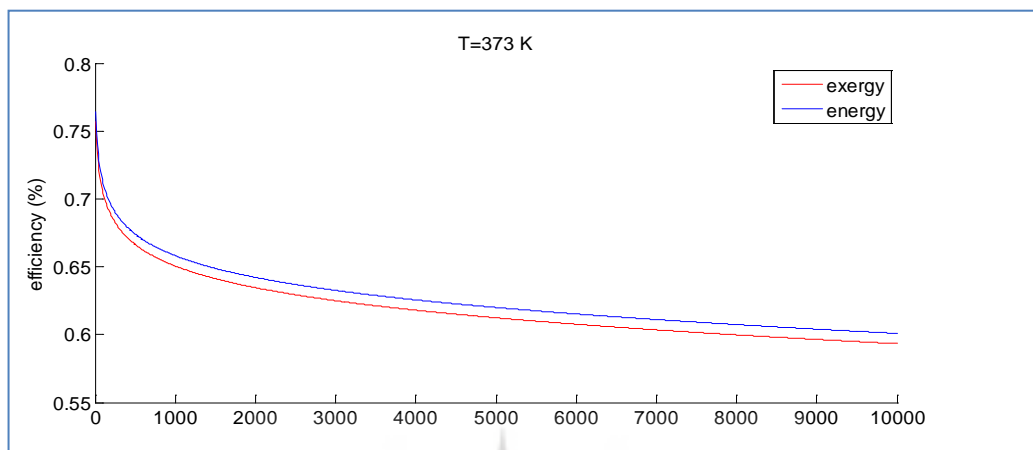




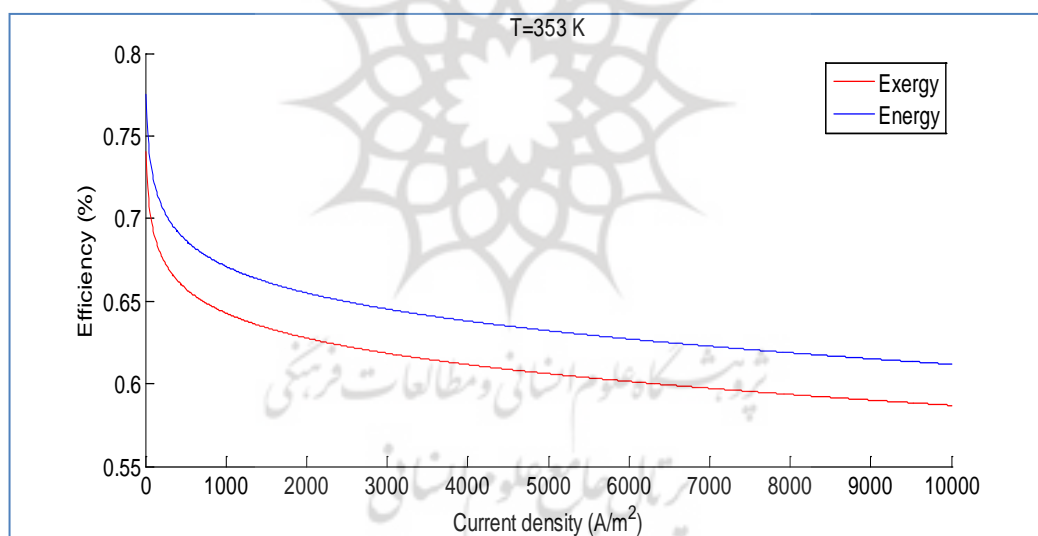
شکل ۳) نمودار پلاریزه الکترولایزرهای غشا پلیمری

#### روند تغییرات دما بر بازدهی انرژی و اگسرژی

انرژی ورودی به الکترولایزر از مجموع انرژی الکتریکی و حرارتی حاصل می شود و انرژی خروجی از آن، مجموع انرژی هیدروژنی و حرارتی آب خروجی است. در مجموع، انرژی ورودی به الکترولایزر و انرژی خروجی از آن با افزایش چگالی جریان، افزایش می یابد. در محدوده چگالی جریان خیلی پایین، تقاضای انرژی الکتریکی، با افزایش چگالی جریان، به صورت غیر خطی افزایش می یابد در حالی که انرژی حرارتی ورودی و انرژی خروجی از الکترولایزر به صورت خطی زیاد می شوند. بنابراین، با افزایش چگالی جریان، کل انرژی ورودی به الکترولایزر (مجموع الکتریکی و حرارتی) بیشتر از انرژی خروجی از آن افزایش می یابد. از این رو، بازدهی انرژی الکترولایزر با افزایش چگالی جریان کاهش می یابد. همچنین از آنجایی که میزان انرژی الکتریکی ورودی به الکترولایزر بیشتر از میزان انرژی حرارتی آن است و عبارتی الکترولایزر در حالت اگسزوترمیک کار می کند و نیز با توجه به آنکه انرژی الکتریکی با اگسرژی آن با هم برابر است، روند تغییرات بازدهی انرژی و اگسرژی تقریباً به یک صورت خواهد بود. از طرفی، نزدیک بودن بازدهی انرژی و اگسرژی به یکدیگر نشاندهنده عملکرد بهتر سیستم می باشد. تغییرات بازدهی انرژی و اگسرژی الکترولایزرهای غشا پلیمری در شکل های (۴) و (۵) نشان داده شده است. با توجه به توضیحات ارائه شده و نمودارهای مذکور، می توان دریافت که با افزایش دما، به دلیل نزدیک شدن بازده انرژی به بازده اگسرژی سیستم، الکترولایزرها عملکرد بهتری خواهند داشت.



شکل ۴) بازدهی انرژی و اگسرژی الکترولایزر غشا پلیمری در دمای ۳۷۳ کلوین



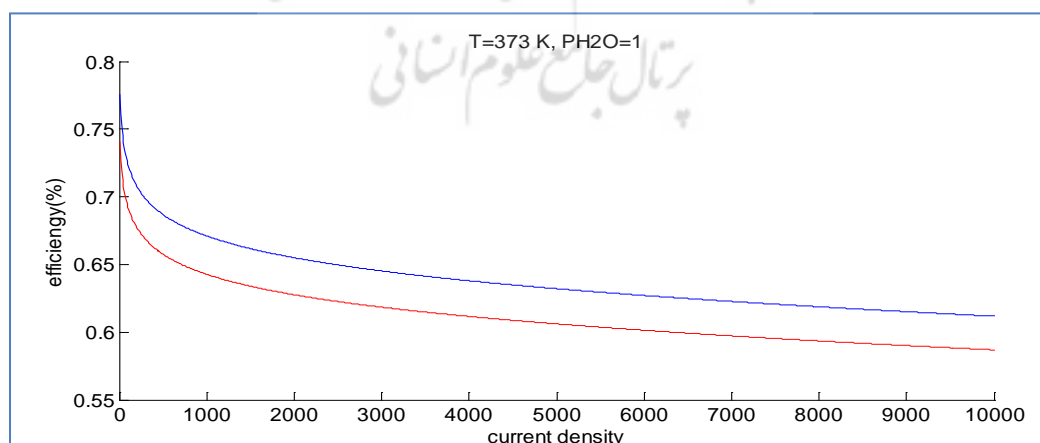
شکل ۵) بازدهی انرژی و اگسرژی الکترولایزر غشا پلیمری در دمای ۳۵۳ کلوین

در دمای عملکردی بالاتر، الکترودهای الکترولایزر فعالتر می باشند. به بیان دیگر، با افزایش دما، چگالی جریان تبادل بالاتر می رود و بنا بر این افت پتانسیل فعالسازی کمتر می شود. بعبارتی، پتانسیل الکترولایزر با افزایش دما کاهش می یابد که این امر سبب کاهش انرژی الکتریکی ورودی به الکترولایزر و افزایش بازدهی سیستم می گردد. ولی افزایش دما در الکترولایزرهای غشا پلیمری به دو دلیل نمی تواند تا بی نهایت ادامه داشته باشد: اول اینکه، جهت افزایش رسانندگی پروتونی در این نوع از الکترولایزرها به آب در فاز مایع نیاز می باشد و دوم اینکه، مرغوبترین غشا در الکترولایزرهای تبادل

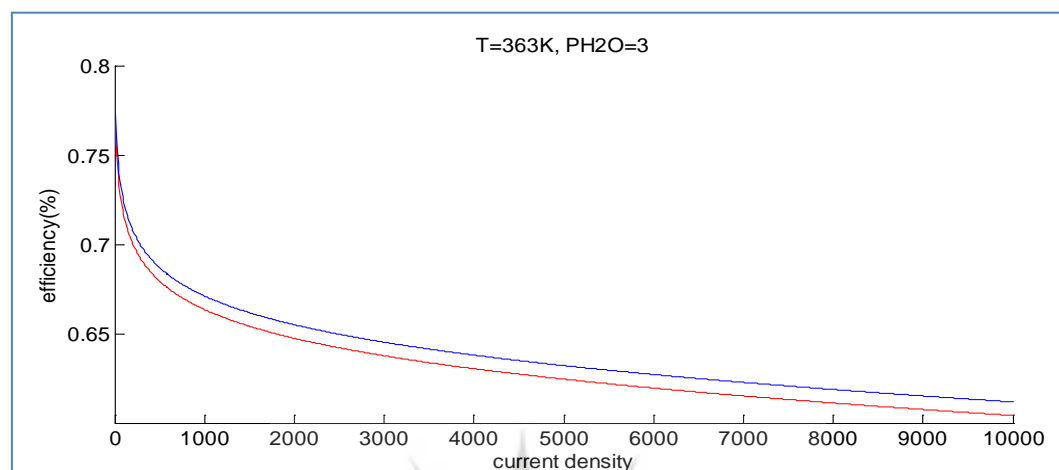
یونی غشای نافیونی است. این غشا در دماهای بالاتر از ۱۰۰ درجه سانتی گراد آسیب دیده و ممکن است پاره گردد که به دلیل رسانا بودن آن سبب کاهش شدید عملکرد الکترولیزر و انجام نشدن واکنش های الکتروشیمیایی در آن می شود و از آنجایی که محدوده عملکردی نافیون ها بین ۶۰ تا ۱۰۰ درجه سانتی گراد است، بهترین دمای عملکردی الکترولیزرهای غشا پلیمری برابر ۱۰۰ سانتی گراد خواهد بود. لازم به ذکر است که نزدیک شدن بازده انرژی به بازده اگسرژی نشاندهنده کم شدن تخریب اگسرژی و نزدیک شدن بازده عملیاتی به بازده تئوری در الکترولیزرهای غشا پلیمری می گردد که بدین وسیله می توان قابلیت گرفتن کار مفید در سیستم را افزایش داد.

### روند تغییرات فشار بر بازدهی انرژی و اگسرژی

تغییرات فشار در هریک از الکترودهای الکترولیزر سبب تغییر غلظت مولفه های واکنش دهنده در آنها می شود. از آنجایی که انتقال هیدروژن در غشای الکترولیزر با استفاده از مولکول های آب انجام پذیر است و شرط انتقال آب در غشا اختلاف غلظت آن در دو طرف غشا یعنی در آند و کاتد می باشد، اختلاف فشار عامل مهمی در عملکرد الکترولیزر می باشد. همچنین همانگونه که از روابط تئوریک حاکم بر الکترولیزر مشخص است، به ازای یک دمای ثابت، رسانندگی الکترولیزر به طور غیر خطی با تغییرات فشار آب در آند و کاتد الکترولیزر تغییر می کند. از این رو، تغییرات فشار به طور غیر خطی بر روی پتانسیل الکترولیزر تاثیر می گذارد که این امر سبب تغییرات انرژی الکتریکی ورودی به الکترولیزر و همچنین بازدهی انرژی و اگسرژی سیستم می شود. از آنجایی که فشار هیدروژن و اکسیژن در اثر عوامل مختلف عملکردی و بر اساس واکنش های انجام شده در الکترولیزر تغییر می یابد، تغییرات فشار آب ورودی مورد بررسی قرار داده شده است. روند تغییرات بازدهی انرژی و اگسرژی در الکترولیزرهای غشا پلیمری با ثابت در نظر گرفته شدن دمای عملکردی آن و تغییرات فشار آب ورودی از ۱ اتمسفر به سه اتمسفر در شکل های (۶) و (۷) نشان داده شده است.



شکل ۶) بازدهی انرژی و اگسرژی الکترولیزر غشا پلیمری در فشار ۱



شکل ۷) بازدهی انرژی و اگسرژی الکترولایزر غشا پلیمری در فشار ۳

همانگونه که از مقایسه شکل‌های (۶) و (۷) مشخص شده است، با افزایش فشار از ۱ اتمسفر به ۳ اتمسفر، بازده اگسرژی سیستم به بازده انرژی نزدیک می‌شود که این موضوع بیانگر عملکرد سیستم می‌باشد. لازم به ذکر است که فشار ۵ اتمسفری برای آب ورودی به الکترولایزر مورد بررسی قرار گرفت و نتایج حاصل به صورت تقریبی با فشار ۱ اتمسفری با هم برابر بود. دلیل این امر آن است که با افزایش فشار آب میزان انتقال هیدروژن و همچنین میزان اتم‌هایی که شکسته می‌شوند بیشتر می‌شود. به همین دلیل، بازدهی از فشار ۳ اتمسفر نسبت به فشار ۱ اتمسفر افزایش می‌یابد. اما در صورتی که فشار آب بیش از اندازه زیاد باشد، بالا رفتن غلظت آب باعث می‌شود که طغیان آب به وجود آید و سایت‌های انجام واکنش مسدود گردد و این امر کارایی الکترولایزر را کاهش می‌دهد. بنابراین، بهترین فشار آب ورودی به الکترولایزر در بازه مورد مطالعه ۳ اتمسفر در نظر گرفته می‌شود.

### نتیجه گیری

الکترولایزر وسیله تبدیل انرژی الکتریکی به انرژی شیمیایی است که می‌تواند به عنوان یک بار DC غیر خطی حساس به ولتاژ در نظر گرفته شود. این مبدل‌های انرژی به پنج دسته اصلی الکترولایزرهای قلیایی سنتی و پیشرفته، الکترولایزرهای غشا پلیمری، الکترولایزرهای غشای غیر آلی و الکترولایزرهای اکسید جامد تقسیم بندی می‌شوند که در میان آنها الکترولایزرهای غشا پلیمری به دلایل ذکر شده در مقاله از مزیت‌های نسبی برخوردار است که استفاده از آنها را رایج تر نموده است. در این پژوهش، ابتدا بر اساس معادلات الکتروشیمیایی - مکانیکی حاکم بر سیستم الکترولایزرهای غشا پلیمری مدل‌سازی انرژی - اگسرژی سیستم انجام شده و بر اساس آنالیز اگسرژی سیستم میزان بهینه پارامترهای عملکردی سیستم مشخص شده و مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. یکی از نتایج بدست آمده از مدل‌سازی این است

که با افزایش چگالی جریان الکترولایزر و یا عبارتی افزایش تعداد هیدروژن های تولیدی، پتانسیل الکترولایزر افزایش می یابد. از دیگر نتایج حاصل از پژوهش این است که با افزایش دما به دلیل نزدیک شدن بازده انرژی به بازده آگسرژی سیستم، الکترولایزرها عملکرد بهتری خواهند داشت. بنابراین، میزان دمای بهینه سیستم برابر ۲۷۳ کلوین می باشد. از طرفی، با افزایش فشار از ۱ اتمسفر به ۳ اتمسفر، بازده آگسرژی سیستم به بازده انرژی نزدیک می گردد.

### منابع

- [۱] انرژی (مبانی، منابع، فناوری های پیشرفته و محیط زیست) (۱۳۸۶)، احمد نوزاد گلی، محمد قنادی مراغه، افشین بور بور اژدری، پژوهشگاه علوم و فنون هسته ای.
- [۲] بهینه سازی ساخت پیل سوختی غشا پلیمری و تاثیر آن بر عملکرد سیستم ترکیبی پیل سوختی- توربین بادی (۱۳۹۰)، سمیه احمدی، دانشگاه صنعتی شریف، گروه مهندسی سیستم های انرژی.
- [۳] شورای جهانی انرژی، منابع انرژی تجدید پذیر نوین، انتشارات اطلس، ۱۳۷۵.
- [۴] مدل سازی سیستم ترکیبی توربین بادی- پیل سوختی و سهم پیل سوختی در تامین تقاضای الکتریکی در یک منطقه نمونه (۱۳۹۱)، سمیه احمدی، محمد رضایی میرقائد، رامین روشندل، مجله علمی پژوهشی مهندسی و مدیریت انرژی، ۱۲-۱۹.
- [۵] موسسه تکنولوژی گاز آمریکا، گاز طبیعی به زبان غیر فنی، موسسه مطالعات بین المللی انرژی، ۱۳۸۰.
- [6] Dynamic modelling of a proton exchange membrane (PEM) electrolyzer Haluk Görgün,, International Journal of Hydrogen Energy, Volume 31, Issue 1, Pages 29–38.
- [7] Dynamic modeling and simulation of a proton exchange membrane electrolyzer for hydrogen production, A. Awasthia, Keith Scottb, S. Basu, International Journal of Hydrogen Energy, Volume 36, Issue 22, November 2011, Pages 14779–14786.
- [8] Efficient multi-metallic anode catalysts in a PEM water electrolyzer, K.B. Kokoha, E. Mayousseb, T.W. Napporna, K. Servata, N. Guilletb, E. Soyezc, A. Grosjeanc, A. Rakotondrainibéc, J. Paul-Josephc, International Journal of Hydrogen Energy, 2014,39(5), Pages 1924–1931.
- [9] Electrochemical characterization of a PEM water electrolyzer based on a sulfonated polysulfone membrane, S. Siracusano, V. Baglio, F. Lufrano, P. Staiti, A.S. Aricò, Journal of Membrane Science, Volume 448, Pages 209–214.
- [10] Experimental study on porous current collectors of PEM electrolyzers Hiroshi Ito, Tetsuhiko Maeda , Akihiro Nakano, Chul Min Hwang, Masayoshi Ishida, Atsushi Kato, Tetsuya Yoshid, international journal of hydrogen energy 37 (2012) 7418-7428.
- [11] Fuel cell system L. J. M. J. Blomen, Michael N. Mugerwa, Plenum press, New York, 2000.
- [12] Hydrogen Fuel for surface transportation Society of automotive engineers Inc., Norbech M.J., 1996.
- [13] Implementing molecular catalysts for hydrogen production in proton exchange membrane water electrolyzers, Minh Thu Dinh Nguyen, Alireza Ranjbari, Laure Catala, Franc ois Brisset, Pierre Mille, Ally Aukauloo, Coordination Chemistry Reviews 256 (2012) 2435–2444.

- [14] Optimization of components and assembling in a PEM electrolyzer stack, S. Siracusano, A. Di Blasia, V. Baglio, G. Brunaccina, N. Briguglio, A. Stasia, R. Ornelasb, E. Trifonib, V. Antonuccia, A.S. Aricò, International Journal of Hydrogen Energy, Volume 36, Issue 5, Pages 3333–3339.
- [15] Performance of a Standalone Wind-Hydrogen Power System for Regions with Seasonal Wind Profile: A Case Study in Khaf Region, S. Ahmadi, M. R. Mirghaed, R. Roshandel, Sustainable Energy Technologies and Assessments, xxx(2014) xxx-xxx, (Available online 26 March 2014.)
- [16] Quantitative analysis of irreversibilities causes voltage drop in fuel cell (simulation & modeling), Ghadamian H, Saboohi Y., Electrochemical Acta, 2004; 50:699-704.
- [17] Renewable energy & power web site: <http://fj.blogspot.com/1388/09/23/post-24>, 2013.
- [18] The effects of ionomer content on PEM water electrolyser membrane electrode assembly performance, Wu Xu, Keith Scott, international journal hydrogen energy (35)2010, 12029-12037.

