تاثیر پارامترهای مختلف بر راندمان انرژی و اکسرژی در الکترولایزر غشایی واحد کلرآلکالی

محمد مجدی مجدیان[۱]، مهدی حمزه‌ای[۲*]

[۱] دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مکانیک، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران
[۲] استادیار، گروه مکانیک، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران

دریافت: زمستان ۹۵ پذیرش: بهار ۹۶

چکیده

الکترولایزر واحد کلرآلکالی از طریق الکترولیز آب‌نمک خالص محصولات کلر، هیدروژن و کاستیک تولید می‌نماید. الکترولایزر از لحاظ انرژی مصرفی، یکی از پرمصرف‌ترین تجهیزات در صنعت می‌باشد که پرداختن به عوامل موثر در کاهش مصرف انرژی ضروری می‌نماید. دراین پژوهش با استفاده از مدل سازی الکترولایزر به عنوان یک حجم کنترل و حل معادلات عددی به وسیله نرم افزار متلب مشخص می‌شود که در یک چگالی جریان مشخص با افزایش دما و کاهش ضخامت ولتاژ کل مصرفی و انرژی مصرفی کاهش می یابد. در این پروژه، الکترولایزر یک واحد کلرآلکالی بررسی شده است. ابتدا نتایج در دمای عملیاتی ۸۰ درجه سانتی‌گراد و فشار ۴ بار را به‌دست آورده سپس با حالت قابل حصول در دمای ۸۸ درجه سانتی‌گراد و فشار ۴.۵ بار، یعنی به میزانی که به غشا آسیبی نرسد، مقایسه صورت گرفته است. نتایج نشان می‌دهد افزایش دما و کاهش ضخامت غشا باعث کاهش راندمان انرژی و افزایش فشار موجب افزایش راندمان اکسرژی می‌گردد.

* **عهده‌دار مکاتبات: mo_majdi@yahoo.com**

کلمات کلیدی: کلرآلکالی، الکترولایزر، دما، انرژی، اکسرژی

۱- مقدمه

الکترولایزر غشایی نوعی از الکترولایزر هست که در مقایسه با الکترولایزرهای سلول جیوه‌ای و سلول دیافرگمی مصرف انرژی کمتر و راندمان بالاتری دارد. کاهش انرژی مصرفی سل و افزایش راندمان انرژی، از طریق تمرکز بر روی دما و افزایش راندمان اکسرژی با تمرکز بر روی فشار میسر گردیده است. اثربخشی غشاء به عنوان یک تجهیز جدا کننده در بین محفظه‌های آند و کاتد در جریان فعلی، راندمان یک سل را تعریف می‌کند. در ضخامت‌های بالا اثر افزایش دما در کاهش ولتاژ کل سل الکترولایزر غشایی به‌دلیل مکانیسم های نفوذ در غشا و لایه نفوذ اطراف الکترودها فعال‌تر و مشهودتر است. غشاهای استفاده شده از نوع دوقطبی با گردش طبیعی می‌باشد. ترکیب شیمیایی غشا بر اساس ماتریس لایه-های فلورید است. خواص فیزیکی و الکتروشیمیایی و قابلیت تبادل یونی ممبرین‌ها به طور گسترده‌ای می‌تواند متفاوت باشد.

در فرآیند الکترولیز، محلول کلرید سدیم در آب به‌وسیله عبور جریان مستقیم تجزیه‌شده و به کلر، هیدروژن و محلول سود تبدیل می‌گردد. در این نوع الکترولایزرها یون سدیم با عبور از غشاء تبادل کاتیونی به سمت کاتد حرکت می‌کند. در سل غشایی، آنولایت و کاتولایت توسط غشا از یکدیگر جدا گشته و با ورود آب‌نمک اشباع، گاز کلر در طرف آند آزاد می‌شود. واکنش کلی فرآیند به‌صورت زیر است که در دو طرف آند و کاتد روی می‌دهد.

$$2NaCl + 2H_2O \rightarrow Cl_2 + 2NaOH + H_2 \qquad (۱)$$

۲- پژوهش های پیشین

استوت و همکاران [۱] به‌منظور بررسی پتانسیل عملکرد تولید هیدروژن در مقیاس بزرگ به مدل‌سازی یک‌بعدی الکترولایزر پرداخته است. این مدل الکترولایزر اجازه می‌دهد تا ولتاژ عامل، دمای خروجی گاز و بهره‌وری الکترولایزر را برای هر نرخ جریان گاز ورودی مشخص، چگالی یا شدت‌جریان، مساحت سلول فعال، تلفات حرارت خارجی و راندمان را به دست آورد.

کو و همکاران [۲] یک مدل الکترولیز برای تحلیل سیستم تولید هیدروژن با استفاده از یک سلول الکترولیز اکسید جامد ارائه کرده است و تأثیرات پارامترهای اصلی بر اساس مدل توسعه‌یافته را بررسی نموده است. پارامترهای اساسی مورد بررسی در این پژوهش عبارت از غلظت جاری، پایداری خاص منطقه، دما، فشار، شکست مولکولی و میزان جریان‌های درون‌ریز و برون‌ریز است.

کلباسی [۳] فرآیند کلرآلکالی و تکنولوژی الکترولیز غشایی و نیز شرایط عملیاتی واحد الکترولیز غشایی در صنایع کلر پارس را طی آزمایش‌هایی مورد بررسی قرار داده تا از این طریق تصویر دقیقی از آن

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1398.6.1.2.2]

ترسیم شود. سپس با استفاده از داده‌های تجربی، شرایط اپتیمم عملیاتی برای الکترولیز آب‌نمک حاصل گردیده است. در این مطالعه تغییرات فشار طرف آند، فشار طرف کاتد، اختلاف فشار طرف کاتد و طرف آند، دمای آب‌نمک خروجی، دمای سود خروجی و نیز تغییرات غلظت آب‌نمک خروجی همگی برحسب زمان مورد تجزیه و تحلیل قرارگرفته و برای بهبود شرایط عملیاتی پیشنهادهایی ارائه‌شده است.

الحسن سلام [۴] در پژوهشی به تجزیه و تحلیل کاهش اتلافات سیستم الکترولایزر فشار بالا برای تولید هیدروژن با استفاده از روابط اصلی ترمودینامیک و الکتروشیمیایی مربوطه و مدل‌سازی در برنامه متلب پرداخته است. اضافه ولتاژ در آند و کاتد و اضافه ولتاژ اهمیک به‌صورت جداگانه موردبررسی قرارگرفته است.

شن [۵] در این تحقیق سعی در بهبود عملکرد الکترولایزر از دو جنبه‌ی افزایش فعالیت الکتروشیمیایی الکترودها و کاهش مقاومت کل سلول الکترولیتی دارد. این مقاله یک مدل مختصر برای توصیف عملکرد الکترولیز آب با استفاده از ترکیب ترمودینامیکی، جنبشی و اثرات مقاومت الکتریکی فرآیند الکترولیز آب را برای اولین بار پیشنهاد می‌کند. در مقایسه با معادله جنبشی باتلروالمر، این مدل دارای پارامترهای کمتر و بیان راحت‌تر است که می‌تواند به‌راحتی در شبیه‌سازی سلول‌های مختلف الکترولیتی با شرایط عملیاتی مختلف استفاده شود. در مقایسه با معادله تافل، این مدل از یک تابع لگاریتمی در بیان ریاضی خود استفاده نمی‌کند و یک مزیت تئوری توصیف عملکرد الکترولیز آب را در دو جریان عملیاتی بالا و پایین ارائه می‌نماید

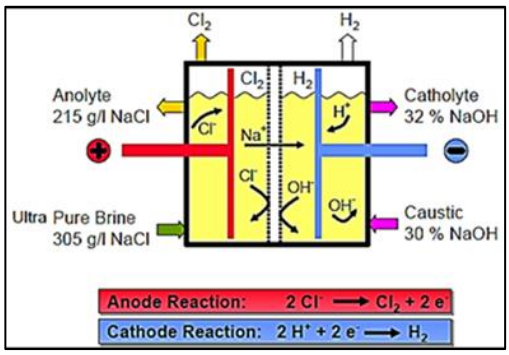
اودسی [۶] و همکارانش نشان دادند که به‌طور متوسط مکانیزم کنترل ضریب انتقال جرم در فرآیندهای الکتروشیمیایی در طول تولید هیدروژن، وابسته به هندسه الکترود است. هندسه صفحه مش دار با آزبست با توجه به جدا شدن حباب‌ها از سطح فعال، در سرعت نفوذ کم نشان‌دهنده یک مزیت اندکی در مقایسه با هندسه مش است. علاوه بر این، افزایش سرعت نفوذ با توجه به جابجایی لایه میکرو همرفتی از سطح الکترود منجر به کاهش میانگین ضریب انتقال جرم می‌شود.

تاهیر و همکاران [۷] در پژوهشی، آنالیز انرژی، اکسرژی، الکتروشیمیایی و آنالیز اقتصادی رآکتور تولید هیدروژن فوتوکاتالیستی ترکیبی را که قادر است جایگزین زیرسیستم الکترولیز سیکل مس-کلر باشد بررسی کردند. مطالعه پارامتری به‌منظور بررسی اثرات تغییر چگالی جریان، درجه حرارت رآکتور، فاصله الکترود و درجه حرارت محیط در میزان تولید هیدروژن، هزینه‌های تولید هیدروژن و راندمان انرژی و اکسرژی رآکتور انجام‌شده است. نتایج به‌دست‌آمده از آنالیز نشان می‌دهد که افت ولتاژ در محلول آنولیت، محلول کاتولیت، آند، کاتد، ممبرین تبادل کاتیونی به ترتیب از ۰.۰۰۵ به ۰.۰۱۶ ولت، ۰.۰۰۴ به ۰.۰۱۳ ولت، ۱.۶۷ به ۲.۱۶۸ ولت، ۰.۱۸ به ۰.۲۲ ولت، ۰.۰۶ به ۰.۱۹ ولت با افزایش چگالی جریان از ۰.۵ به ۱.۵ آمپر بر سانتی مترمربع افزایش‌یافته است. میزان تولید هیدروژن و هزینه تولید هیدروژن به ترتیب از ۱.۲۸ به ۱.۴۷ لیتر بر ثانیه و از ۳.۲۸ به ۳.۳۶ سنت بر کیلوگرم با افزایش دمای رآکتور از ۲۹۰ به ۳۴۰ درجه کلوین افزایش می‌یابد. با افزایش دمای محیط، راندمان اکسرژی تولید هیدروژن ترکیبی فوتوکاتالیستی رآکتور از ۵.۲۵ به ۳.۹ درصد کاهش می‌یابد. نتایج به‌دست‌آمده از این تحقیق نشان می‌دهد که رآکتور فوتوکاتالیستی ترکیبی در خود، پتانسیل بسیار زیادی برای جایگزینی مصرف انرژی برق نسبت به زیرسیستم چرخه مس- کلر نگه می‌دارد. همچنین استفاده از رآکتور فوتوکاتالیستی ترکیبی به‌جای برق در چرخه مس–کلر بیشتر با محیط‌زیست سازگار است.

با بررسی مقالات فوق می‌توان به این نتیجه رسید که با مدل‌سازی و برنامه‌نویسی عددی مناسب می‌توان عملکرد الکترولایزر غشایی برای محلول آب‌نمک و عوامل مؤثر بر آن را بررسی نمود.

۳- مشخصات الکترولایزر

اتاقک سل برای تولید ۱۰۰۰ تن متریک در روز NaOH صد درصد از ۱۲ الکترولایزر غشایی نوع BM2.7 استفاده می‌کند که هر کدام دارای ۱۶۳ سلول دوقطبی می‌باشد. برای کاهش محاسبات، تنها یک سلول دو قطبی از الکترولایزر مدلسازی شده است. یک سلول دوقطبی الکترولایزر در شکل ۱ نشان داده شده است. جنس الکترود آند مورد استفاده تیتانیوم و از نوع لوور است همچنین الکترود کاتد از جنس نیکل و از نوع مش است.



شکل ۱: شماتیکی از الکترولایزر و نحوه جداسازی کلر

در جدول شماره ۱ برخی پارامترها و ثوابت مورد نیاز آورده شده است و برای بررسی روند تغیرات، یک بازه از دانسیته جریان از ۲۰۰۰ تا ۶۰۰۰ آمپر بر مترمربع در نظر گرفته شده است.

جدول ۱: پارامترهای ثابت مورد استفاده جهت مدل‌سازی انرژی و اکسرژی سیستم الکترولایزر غشا پلیمری

پارامتر	مقدار
P_{Cl_2}	1(bar)
P_{H_2}	1(bar)
$T_{membrane}$	80 (℃)
$E_{act_{anod}}$	76(Kj/mol)
$E_{act_{cathod}}$	18 (Kj/mol)
λ_a	۱۴
λ_c	۱۰
$L_{membrane}$	100(μm)
Electrode effective area	100(cm2)
NaCl concentration	40%
J_a	1.7×105 (A/m2)
J_c	4.6×103 (A/m2)
F	96486(C/mol)

۴-مدلسازی

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1398.6.1.2.2]

معادلات بقای جرم، بقای انرژی و موازنه اکسرژی معادلات حاکم بر این بخش است.کل انرژی مصرفی الکترولایزر از دو بخش انرژی الکتریکی و انرژی گرمایی تشکیل می‌شود که در این پژوهش به عوامل موثر بر آن-ها پرداخته شده است.

معادله کلی ولتاژ از رابطه ۲ به دست می آید.

$$V_{total} = V_{a,a} + V_{a,c} + V_{ohm} + V_O \qquad (۲)$$

که در این رابطه $V_{a,a}$ ولتاژ اکتیواسیون آند، $V_{a,c}$ ولتاژ اکتیواسیون کاتد، V_{ohm} ولتاژ اهمی سل و V_O ولتاژ حالت استاندارد سل الکترولایزر قلیایی یا ولتاژ تجزیه می‌باشد که از روابط زیر به دست می آید.

$$V_{a,c} = \frac{RT}{F} Ln\left(\frac{J}{2J_{a,c}} + \sqrt{\frac{J}{2J_{a,c}} + 1}\right) \qquad (۳)$$

که در رابطه فوق

$$J_{a,c} = J_c^{Ref} exp\left(\frac{-E_{a,c}}{RT}\right) \qquad (۴)$$

که j نشانگر دانسیته جریان می‌باشد.

ولتاژ اهمی سل بر مبنای معادله زیر به دست می‌آید.

$$V_{ohm} = JR_m \qquad (۵)$$

که R_m مقاومت غشا می باشد و از انتگرال زیر محاسبه می‌شود.

$$R_m = \int_0^L \frac{dx}{\sigma_X} \qquad (۶)$$

که در آن L ضخامت غشا مورد استفاده می‌باشد. σ_X رسانندگی یونی غشای تبادل یونی است و از رابطه زیر محاسبه می گردد[۸] .

$$\sigma_X = [0.5139\,\lambda\,(X) - 0.326]\, exp\left[1263\left(\frac{1}{303} - \frac{1}{T}\right)\right] \qquad (۷)$$

λ_a و λ_c به ترتیب محتویات آب در فصل مشترک غشا با آند و کاتد می باشد[۹].

ولتاژ حالت استاندارد سل الکترولایزر قلیایی یا ولتاژ تجزیه، حداقل ولتاژ مورد نیاز برای شروع واکنش است که از معادله زیر به دست می‌آید [۱۰] .

$$V_o = 1.2229 - 8.5 \times 10^{-4}(T_m - 298) \qquad (۸)$$

T_m بیانگر دمای غشا است که در اینجا با دمای سل برابر گرفته شده است.

حال با استفاده از ولتاژ کل سیستم، انرژی الکتریکی مصرفی سل از رابطه زیر به دست می‌آید.

$$E_{elec} = JV = EX_{elec} \qquad (۹)$$

انرژی الکتریکی و اکسرژی الکتریکی مقادیر یکسانی در سل الکترولایزر دارند از این رو با رابطه بالا اکسرژی الکتریکی هم به‌دست می‌آید.

بر اساس مدل ظرفیت گرمایی فشرده، تراز انرژی حرارتی در سلول الکترولایزر بر اساس معادله زیر بیان می گردد. بازدهی انرژی سل برای تولید کلر با استفاده از رابطه زیر به دست می‌آید.

$$\dot{Q}_{gen} = \dot{Q}_{loss} + \dot{Q}_{H2o,out} \qquad (۱۰)$$

که در آن $\dot{Q}_{gen}$ انرژی حرارتی تولید شده در سلول، $\dot{Q}_{loss}$ انرژی حرارتی تلف شده و $\dot{Q}_{H2o\,.\,out}$ انرژی حرارتی آب خروجی از الکترولایزر می باشد.

پتانسیل برگشت ناپذیر در عملکرد الکترولایزر غشا پلیمری به دلیل گرمای ناشی از انتروپی تولیدی V_{irre} از رابطه زیر حاصل می شود.

$$V_{irr} = 2\,F\left(V_{act\,.\,a} + V_{act\,.\,c} + V_{ohmic}\right) \qquad (۱۱)$$

در صورتی‌که $v_{irr} \geq T\Delta S$ گرمای برگشت ناپذیر سلول برابر میزان انرژی لازم جهت شکست مولکول‌های آب باشد، نیازی به هیچ گرمای خارجی وجود ندارد.

از این رو

$$E_{heat} = \dot{Q}_{gen} = 0 \qquad (۱۲)$$

اما در صورتی‌که $V_{irr} < T\Delta S$ گرمای تولید شده قادر به تامین تقاضای انرژی مورد نیاز سلول نباشد، به انرژی گرمایی مازاد احتیاج می باشد. از این رو، گرمای ورودی به الکترولایزر برابر است با

$$\dot{Q}_{gen} = \frac{J}{2\,F}\,(T\Delta S - V_{irr}) \qquad (۱۳)$$

همچنین میزان انرژی گرمایی از رابطه زیر قابل محاسبه است که در آن R_t برابر مقاومت حرارتی کل الکترولایزر می‌باشد.

$$\dot{Q}_{loss} = \frac{1}{R_t}(T - T_0) \qquad (۱۴)$$

انرژی حرارتی آب خروجی از الکترولایزر برابر است با

$$\dot{Q}_{H2O,OUT} = \dot{Q}_{gen} - \dot{Q}_{loss} \qquad (۱۵)$$

با توجه به این که انرژی گرمایی مازاد در صورت لزوم نیز مقداری ناچیز است در ادامه از آن چشم پوشی شده است. راندمان انرژی سل برای تولید کلر از رابطه (۱۶) محاسبه می‌گردد.

$$\Psi_{energy} = \frac{LHV_{cl_2} \times \dot{N}_{cl_2}}{E_{elec} + Q_{heat,membrane}} \qquad (۱۶)$$

که در آن LHV_{cl_2} ارزش گرمایی پایین کلر می‌باشد. $\dot{N}_{cl_2}$ دبی تولید کلر در آند است و $Q_{heat,membrane}$ مقدار گرمای هدررفت در غشا می-باشد. در این محاسبات از گرمای هدررفت غشا به دلیل مقادیر ناچیز آن در مقابل انرژی الکتریکی مصرفی صرف نظر شده است.

دبی تولید کلر بر حسب دانسیته جریان طبق رابطه (۱۷) به دست می‌آید[۴،۸].

$$\dot{N}_{cl_2} = \dot{N}_{H_2} = \frac{J}{2F} \qquad (۱۷)$$

بازدهی اکسرژی سل نیز همانطور که قبلا گفته شد با به دست آوردن دو جزء اکسرژی فیزیکی و اکسرژی شیمیایی قابل محاسبه می-باشد. اکسرژی شیمیایی قبلا توضیح داده شد. اکسرژی فیزیکی برای گونه i نیز با رابطه (۱۸) به دست می‌آید.

$$Ex_{ph,i} = C_{p,i}T_o\left(\frac{T_i}{T_O} - 1 - Ln\left(\frac{T_i}{T_O}\right) + Ln\left(\frac{P_i}{P_o}\right)\right) \qquad (۱۸)$$

بازدهی اکسرژی سل برای تولید کلر با استفاده از رابطه (۱۹) به دست می‌آید

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1398.6.1.2.2]

$$\Psi_{energy} = \frac{\dot{N}_{cl_2} Ex_{cl_2}}{Ex_{elec}} \quad (۱۹)$$

که در آن LHV_{cl_2} ارزش گرمایی پایین کلر می‌باشد. $\dot{N}_{cl_2}$ دبی تولید کلر در آند است و $Q_{heat,membrane}$ مقدار گرمای هدرفت در غشا می‌باشد. در این محاسبات از گرمای هدررفت غشا به دلیل مقادیر ناچیز آن در مقابل انرژی الکتریکی مصرفی صرف نظر شده است.

دبی تولید کلر بر حسب دانسیته جریان طبق رابطه (۲۰) به دست می‌آید[۴،۸].

$$\dot{N}_{cl_2} = \dot{N}_{H_2} = \frac{J}{2F} \quad (۲۰)$$

بازدهی اکسرژی سل نیز همانطور که قبلا گفته شد با به دست آوردن دو جزء اکسرژی فیزیکی و اکسرژی شیمیایی قابل محاسبه می‌باشد. اکسرژی شیمیایی قبلا توضیح داده شد. اکسرژی فیزیکی برای گونه i نیز با رابطه (۲۱) به دست می‌آید.

$$Ex_{ph,i} = C_{p,i}T_o\left(\frac{T_i}{T_O} - 1 - Ln\left(\frac{T_i}{T_O}\right) + Ln\left(\frac{P_i}{P_o}\right)\right) \quad (۲۱)$$

بازدهی اکسرژی سل برای تولید کلر با استفاده از رابطه (۲۲) به دست می‌آید:

$$\Psi_{energy} = \frac{\dot{N}_{cl_2} Ex_{cl_2}}{Ex_{elec}} \quad (۲۲)$$

.

۵- شرایط مرزی

فرض های ترمودینامیکی به‌کار رفته در این مسئله این است که سیستم تجمع جرم ندارد یعنی حجم کنترل است. همچنین قوانین بقای انرژی و جرم و اکسرژی بر سیستم حاکم است و همچنین از افت ولتاژ محلول آنولیت و کاتولیت صرفنظر شده است.

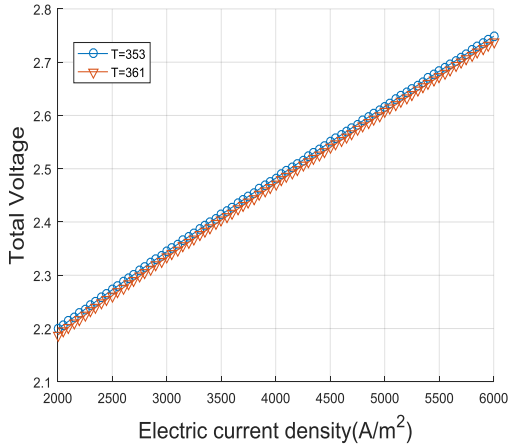
۶- روش حل

روش حل با اعمال اصل پایداری انرژی و اکسرژی و روابط مرتبط بین دانسیته جریان- ولتاژ و انرژی مصرفی سل به صورت مرحله‌ای سعی و خطا[1] و حل معادلات با استفاده از کدنویسی کامپیوتری می‌باشد. و با توسعه معادلات بقای جرم، انرژی و اکسرژی، الگوریتم طراحی برای الکترولایزر غشایی نوشته‌شده است. هدف اصلی در این روش برقراری یک ارتباط بین چگالی جریان با ولتاژ مصرفی در دما، فشار و ضخامت‌های مختلف غشا است و نمودارهای پتانسیل، انرژی الکتریکی ورودی، بازدهی انرژی، بازدهی اکسرژی، انرژی مصرفی را برحسب دانسیته جریان، در دماها و فشارهای مختلف به دست آورده و آن‌ها تحلیل کرده تا فشار و دمای بهینه را تعیین کند.

۷- نتایج و بحث

جهت مقایسه تغییرات ولتاژ، انرژی مصرفی، راندمان انرژی و اکسرژی با چگالی جریان در دو دمای عملیاتی و دمای قابل حصول، عملکرد این پارامترها در واحد کلرآلکالی پتروشیمی اروند بررسی شده است. این واحد در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد، فشار ۴ بار، ضخامت ۷۰۰میکرون و با چگالی جریان ۵۵۰۰ آمپر بر مترمربع در حال فعالیت است که با توجه به بررسی‌های انجام‌شده در زمینه استحکام غشا، این غشاها توانایی مقاومت تا دمای ۸۸ درجه سانتی‌گراد را دارا هستند. در این قسمت تغییرات فوق را در دمای فعلی ۳۵۳ درجه کلوین با دمای قابل‌دسترس ۳۶۱ درجه کلوین مقایسه نموده و نتایج بیان می‌گردد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود با افزایش ۸ درجه‌ای دما، در چگالی ۵۵۰۰ آمپر بر مترمربع، کل ولتاژ مصرفی ۰.۰۲ ولت کاهش می‌یابد (شکل ۲). همچنین مقدار انرژی مصرفی تقریباً ثابت می‌ماند (شکل۳) اما راندمان انرژی حدود ۶ درصد افزایش می‌یابد (شکل۴). نتایج آنالیز اکسرژی نشان می‌دهد که تغییرات دما تأثیری بر راندمان اکسرژی ندارد اما با تغییر فشار سل از ۴ بار (شکل ۵) به ۴.۵ بار (شکل۶)، در همان چگالی جریان، راندمان اکسرژی از ۱.۳۸ به ۱.۶ افزایش می‌یابد.

در جدول ۲ مقایسه بین مقادیر انرژی و اکسرژی در دماها و چگالی‌های جریان عملیاتی به صورت خلاصه ارائه شده است. همچنین در جدول ۳ مقایسه بین تغییرات دما و چگالی عملیاتی مختلف در دو ولتاژ ۲۰۰۰A/m2 و ۶۰۰۰ A/m2 ذکر شده است.

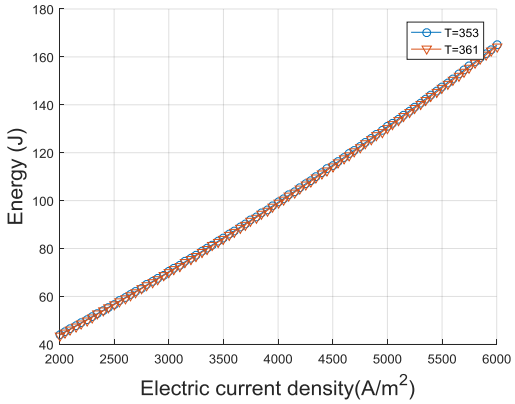


شکل ۲: مقدار ولتاژ مصرفی برحسب دانسیته جریان در دمای فعلی و دمای پیشنهادی

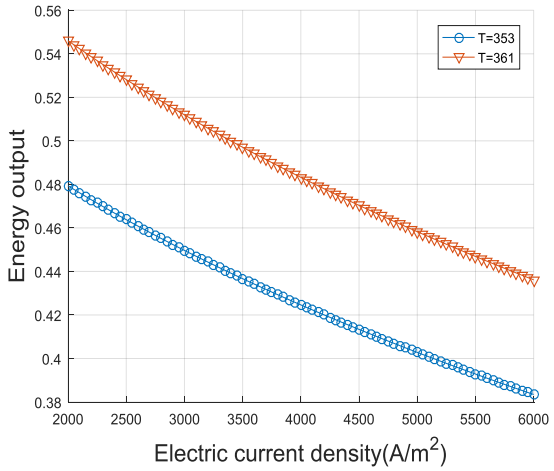
[1] . q-iteration

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

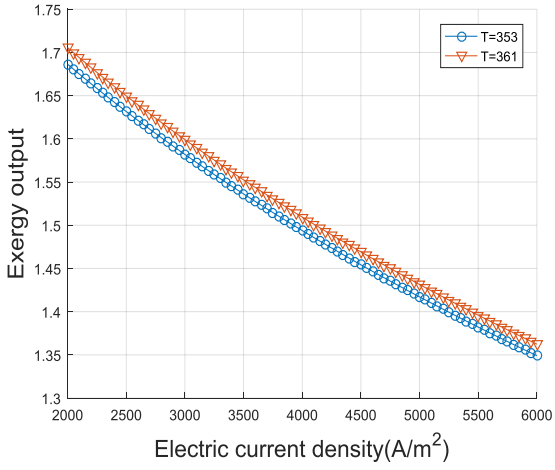
[DOR: 20.1001.1.20089813.1398.6.1.2.2]



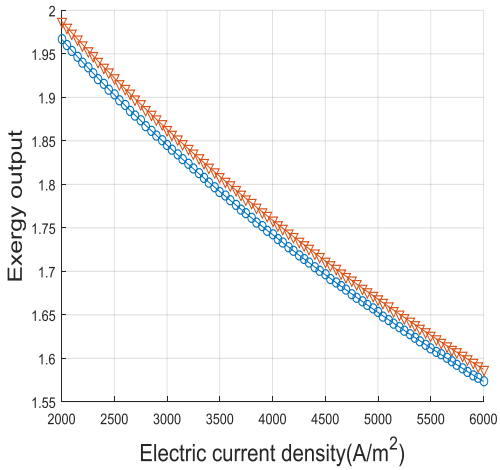
شکل ۳: مقدار انرژی مصرفی برحسب دانسیته جریان در دمای فعلی و دمای پیشنهادی



شکل ۳: مقدار راندمان انرژی برحسب دانسیته جریان در دمای فعلی و دمای پیشنهادی



شکل ۴: مقدار راندمان اکسرژی برحسب دانسیته جریان در دمای فعلی و دمای پیشنهادی و در فشار ۴ بار



شکل ۵: مقدار راندمان اکسرژی برحسب دانسیته جریان در دمای فعلی و دمای پیشنهادی و در فشار ۴.۵ بار

جدول ۲: مقایسه تغییرات انرژی و راندمان انرژی و اکسرژی در دما و چگالی جریان عملیاتی مختلف

راندمان اکسرژی		راندمان انرژی		انرژی (J)		چگالی جریان
361K	353 K	361K	353K	361K	353 K	
1.70	1.68	0.548	0.48	44	44	**2000A/m2**
1.37	1.35	0.438	0.382	164	164	**6000A/m2**

جدول ۳: مقایسه تغییرات ولتاژ در دما و چگالی عملیاتی مختلف

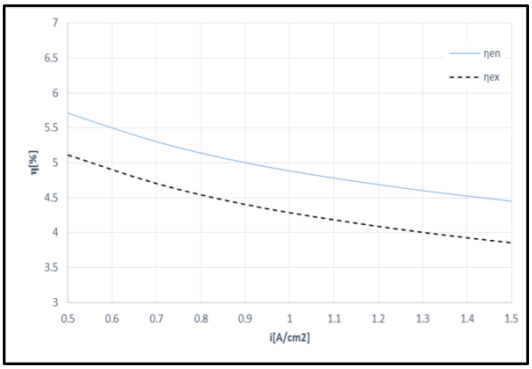
ولتاژ کل (V)		ولتاژ فعالسازی آند (V)		ولتاژ فعالسازی کاتد (V)		چگالی جریان
361K	**353K**	**361K**	**353K**	**361K**	**353K**	
2.195	2.20	0.628	0.632	0.143	0.144	**2000A/m2**
2.725	2.73	0.662	0.665	0.175	0.175	**6000A/m2**

۸- اعتبار سنجی

ارزیابی اعتبار مدل‌سازی انجام‌شده برای الکترولایزر قلیایی با غشا تبادلی با مقایسه نتایج به‌دست‌آمده در این تحقیق با داده‌های گزارش‌شده در مطالعات تجربی موجود در منابع علمی صورت گرفت. همخوانی قابل قبولی بین نتایج تجربی و محاسبات عددی وجود دارد. مقادیر به‌دست‌آمده برای انرژی سل با مقادیر تجربی قابل قیاس می‌باشد. در مورد نتایج به‌دست‌آمده برای اکسرژی در دماهای بالا تفاوت با مقادیر تجربی وجود دارد. درحالی‌که در دماهای واقعی عملیاتی ۸۵ درجه سلسیوس بازدهی در دامنه ۴۰-۷۰ درصد در فشارها و ضخامت‌های غشا مختلف محاسبه می‌شود. مقایسه با نتایج تجربی نشان می‌دهد که مقادیر گزارش‌شده معتبر می‌باشند.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1398.6.1.2.2]



شکل ۶: راندمان انرژی و اکسرژی برای الکترولایز تولید هیدروژن

برای تعیین اعتبار نتایج از مقایسه مقالات مشابه [۷] ازجمله مقالاتی که در آن آنالیز انرژی و اکسرژی انجام‌شده است می‌توان به مقاله تاهیر اشاره نمود. که در این مقاله تأثیر دانسیته جریان بر راندمان انرژی و اکسرژی برای تولید هیدروژن با استفاده از الکترولیز آب خالص انجام شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود روند تغیرات مشابه است.

مراجع

[1] Stoots, Carl M, E. O'Brien, James, G. McKellar, Michael, L. Hawkes, Grant, "Engineering Process Model for High-Temperature Electrolysis System ", *Idaho National Laboratory*, 2525 N , Page 1-20.

[2] KOH, JaeHwa, YOON DuckJoo &. OH, Chang H, " Simple Electrolyzer Model Development for High-Temperature Electrolysis System Analysis Using Solid Oxide Electrolysis Cell", *Journal of Nuclear Science and Technology*, vol.47, no.7, 2010, p 599 – 607.

[۳] کلباسی، منصور، تقوی، فیروزه، *بهینه سازی شرایط عملیاتی واحد الکترولیز صنایع کلرپارس*، دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر(پلی تکنیک تهران)، ۱۳۸۳.

[4] Alhassan, Abdol Rahim; Salami Tijani;; A.H., Badrol Hisam; Mohd Khairulddin " A Study of the Loss Characteristic of a High Rressure Electrolyzer System For Hydrogem Prodution", *Jurnal Teknologi*, vol 75: 8 , 2015, Page 65– 69.

[5] Shen; Muzhong, Bennett; Nick, Ding; Yulong, Scott; Keith, " A Concise Model For Evaluating Water Electrolysis", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol 36 , 2011, Page 14335 – 14341

[6] Eudésio O. Vilar, Eliane B.Cavalcanti and Izabelle L.T. Albuquerque, *A Mass Transfer Study with Electrolytic Gas Production*, Transfer, Prof. Mohamed El-Amin, InTech , 2011.

[7] Tahir Abdul Hussain Ratlamwala and Ibrahim Dincer, "Electrochemical, Energy, Exergy And Exergoeconomic Analyses of Hybrid Photocatalytic Hydrogen Production Reactor for Cu-Cl Cycle", *7th International Exergy, Energy and Environment Symposium*, Page 1 – 8.

[8] Dutta S, Shimpalaee S, Zee JWV," Numerical prediction of mass-exchange between cathode and anode channels in pem fuel cell", *Int J Heat Mass Transfer*, Vol 44, No 20, 2001, Page 29 – 42.

[9] Barbir F, Molter T, Dalton L. "Efficiency and weight trade-off analysis of regenerative fuel cells as energy storage for aerospace applications", *Int J.*

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1398.6.1.2.2]