

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

محمد مجیدی مجیدیان<sup>۱</sup>، مهدی حمزه‌ای<sup>۲\*</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مکانیک، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران

<sup>۲</sup> استادیار، گروه مکانیک، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران

دریافت: زمستان ۹۵ پذیرش: بهار ۹۶

### چکیده

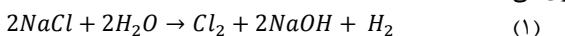
الکترولایزر واحد کلرآلکالی از طریق الکترولایزر آب‌نمک خالص محصولات کلر، هیدروژن و کاستیک تولید می‌نماید. الکترولایزر از لحاظ انرژی مصرفی، یکی از پرصرف‌ترین تجهیزات در صنعت می‌باشد که پرداختن به عوامل موثر در کاهش مصرف انرژی ضروری می‌نماید. در این پژوهش با استفاده از مدل سازی الکترولایزر به عنوان یک حجم 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 می‌یابد. در این پژوهش، الکترولایزر یک واحد کلرآلکالی بررسی شده است. ابتدا نتایج در دمای عملیاتی ۸۰ درجه سانتی‌گراد و فشار ۴ بار را به دست 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

می‌شود. واکنش کلی فرآیند به صورت زیر است که در دو طرف آند و کاتد روی می‌دهد.



### ۲- پژوهش‌های پیشین

استوت و همکاران [۱] به منظور بررسی پتانسیل عملکرد تولید هیدروژن در مقیاس بزرگ به مدل سازی یک بعدی الکترولایزر پرداخته است. این مدل الکترولایزر اجازه می‌دهد تا ولتاژ اعمال، دمای خروجی گاز و بهره‌وری الکترولایزر را برای هر نرخ جریان گاز و رودی مشخص، چگالی یا شدت جریان، مساحت سلول فعل، تلفات حرارت خارجی و راندمان را به دست آورد.

کو و همکاران [۲] یک مدل الکترولایزر برای تحلیل سیستم تولید هیدروژن با استفاده از یک سلول الکترولایز 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.

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

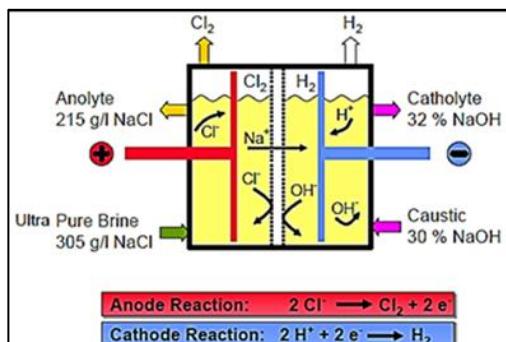
الکترولایزر غشایی نوعی از الکترولایزر هست که در مقایسه با الکترولایزرهای سلول جیوهای و سلول دیافرگمی مصرف انرژی کمتر و راندمان بالاتری دارد. کاهش انرژی مصرفی سل و افزایش راندمان انرژی، از طریق تمرکز بر روی دما و افزایش راندمان اکسرژی با تمرکز بر روی فشار میسر گردیده است. اثربخشی غشاء به عنوان یک تجهیز 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 به دلیل مکانیسم‌های 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 لایه‌های فلورید است. خواص فیزیکی و الکتروشیمیایی و قابلیت تبادل یونی ممبرین‌ها به طور گسترده‌ای می‌تواند متفاوت باشد.

در فرآیند الکترولایز، محلول کلرید سدیم در آب به وسیله عبور جریان مستقیم تجزیه شده و به کلر، هیدروژن و محلول سود تبدیل می‌گردد. در این نوع الکترولایزرا 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 کل در طرف آند آزاد

برای جایگزینی مصرف انرژی برق نسبت به زیرسیستم چرخه مس-کلر نگه می‌دارد. همچنین استفاده از رآکتور فتوکاتالیستی ترکیبی به جای 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 الکتروولایزر غشایی برای محلول آب‌نمک و عوامل مؤثر بر آن را بررسی نمود.

### ۳- مشخصات الکتروولایزر

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



شکل ۱: شماتیکی از الکتروولایزر 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 الکتروولایزر غشای پلیمری

پارامتر	مقدار
P <sub>Cl<sub>2</sub></sub>	1(bar)
P <sub>H<sub>2</sub></sub>	1(bar)
T <sub>membrane</sub>	80 (°C)
E <sub>act<sub>anod</sub></sub>	76(Kj/mol)
E <sub>act<sub>cathod</sub></sub>	18 (Kj/mol)
λ <sub>a</sub>	۱۴
λ <sub>c</sub>	۱۰
L <sub>membrane</sub>	100(μm)
Electrode effective area	100(cm <sup>2</sup> )
NaCl concentration	40%
J <sub>a</sub>	1.7×105 (A/m <sup>2</sup> )
J <sub>c</sub>	4.6×103 (A/m <sup>2</sup> )
F	96486(C/mol)

### ۴- مدل‌سازی

ترسیم شود. سپس با استفاده از داده‌های تجربی، شرایط اپتیمم عملیاتی برای الکتروولیز 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 بر حسب زمان مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته و برای بهبود شرایط عملیاتی پیشنهادهایی ارائه شده است.

الحسن سلام [۴] در پژوهشی به تجزیه و تحلیل کاهش اتفاقات سیستم الکتروولایزر 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 به صورت جداگانه موردنبررسی قرار گرفته است.

شن [۵] در این تحقیق سعی در بهبود عملکرد الکتروولایزر از دو جنبه افزایش فعالیت الکتروشیمیایی الکترودها و کاهش مقاومت کل سلول الکتروولیتی دارد. این مقاله یک مدل مختصر برای توصیف عملکرد الکتروولیز آب با استفاده از ترکیب ترمودینامیکی، جنبشی و اثرات مقاومت الکتریکی فرآیند الکتروولیز آب را برای اولین بار پیشنهاد می‌کند. در مقایسه با معادله جنبشی باترولالمر، این مدل دارای پارامترهای کمتر و بیان راحت‌تر است که می‌تواند به راحتی در شبیه‌سازی سلول‌های مختلف الکتروولیتی با شرایط عملیاتی مختلف استفاده شود. در مقایسه با معادله تافل، این مدل از یکتابع لگاریتمی در بیان ریاضی خود است. علاوه بر یک مزیت تئوری توصیف عملکرد الکتروولیز آب را در دو جریان عملیاتی بالا و پایین ارائه می‌نماید.

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

تاهیر و همکاران [۷] در پژوهشی، آنالیز انرژی، اکسرژی، الکتروشیمیایی و آنالیز اقتصادی رآکتور تولید هیدروژن فوتوكاتالیستی ترکیبی را که قادر است جایگزین زیرسیستم الکتروولایزر سیکل مس-کلر باشد بررسی کردند. مطالعه پارامتری به منظور بررسی اثرات تغییر چگالی جریان، درجه حرارت رآکتور، فاصله الکتروود و درجه حرارت محیط در میزان تولید هیدروژن، هزینه‌های تولید هیدروژن و راندمان انرژی و اکسرژی رآکتور انجام‌شده است. نتایج بدست‌آمده 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، ۰.۶۷ به ۰.۱۸ ولت، ۰.۰۰۶ به ۰.۰۲۲ ولت، ۰.۰۰۶ به ۰.۰۱۹ ولت با افزایش چگالی جریان از ۰.۵ به ۱.۵ آمپر بر سانتی مترمربع افزایش یافته است. میزان تولید هیدروژن و هزینه تولید هیدروژن به ترتیب از ۱.۲۸ به ۱.۴۷ به ۳.۳۶ سنت بر کیلوگرم با افزایش دمای رآکتور ۳.۲۸ به ۳.۴۰ درجه کلوین افزایش می‌یابد. با افزایش دمای محیط، راندمان اکسرژی تولید هیدروژن ترکیبی فوتوكاتالیستی رآکتور از ۵.۲۵ به ۳.۹ درصد کاهش می‌یابد. نتایج بدست‌آمده از این تحقیق نشان می‌دهد که رآکتور فوتوكاتالیستی ترکیبی در خود، پتانسیل سیار زیادی

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 انترپوپی تولیدی  $V_{irr}$  از رابطه زیر حاصل می شود.

$$V_{irr} = 2F \left( V_{act,a} + V_{act,c} + V_{ohmic} \right) \quad (11)$$

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

از این رو  
 $E_{heat} = \dot{Q}_{gen} = 0$  (12)

اما در صورتی که  $T\Delta S < v_{irr}$  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

$$\dot{Q}_{gen} = \frac{J}{2F} (T\Delta S - V_{irr}) \quad (13)$$

همچنین میزان انرژی گرمایی از رابطه زیر قابل محاسبه است که در آن  $R$  مقاومت حرارتی کل الکترولایزر می باشد.

$$\dot{Q}_{loss} = \frac{1}{R_t} (T - T_0) \quad (14)$$

انرژی حرارتی آب خروجی از الکترولایزر برابر است با

$$\dot{Q}_{H2O,out} = \dot{Q}_{gen} - \dot{Q}_{loss} \quad (15)$$

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 (16) محاسبه می گردد.

$$\Psi_{energy} = \frac{LHV_{cl_2} \times \dot{N}_{cl_2}}{E_{elec} + Q_{heat,membrane}} \quad (16)$$

که در آن  $LHV_{cl_2}$  ارزش گرمایی پایین کلر می باشد.  $\dot{N}_{cl_2}$  دبی تولید کلر در آند است و  $Q_{heat,membrane}$  مقدار گرمای هدررفت در غشا می باشد. در این محاسبات از گرمایی 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 (17) به دست می آید [۴.۸].

$$\dot{N}_{cl_2} = \dot{N}_{H_2} = \frac{J}{2F} \quad (17)$$

بازدهی اکسرژی سل نیز همانطور که قبل از گفته شد با به دست آوردن دو جزء اکسرژی فیزیکی و اکسرژی شیمیایی قابل محاسبه می باشد. اکسرژی شیمیایی قبل توضیح داده شد. اکسرژی فیزیکی برای گونه نیز با رابطه (18) به دست می آید.

$$Ex_{ph,i} = C_{p,i} T_o \left( \frac{T_i}{T_o} - 1 - \ln \left( \frac{T_i}{T_o} \right) + \ln \left( \frac{P_i}{P_o} \right) \right) \quad (18)$$

بازدهی اکسرژی سل برای تولید کلر با استفاده از رابطه (19) به دست می آید

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 می شود که در این پژوهش به عوامل موثر بر آن ها پرداخته شده است.

معادله کلی ولتاژ از رابطه ۲ به دست می آید.

$$V_{total} = V_{a,a} + V_{a,c} + V_{ohm} + V_o \quad (2)$$

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 قلیابی یا ولتاژ تجزیه می باشد که از روابط زیر به دست می آید.

$$V_{a,c} = \frac{RT}{F} \ln \left( \frac{J}{2J_{a,c}} + \sqrt{\frac{J}{2J_{a,c}} + 1} \right) \quad (3)$$

که در رابطه فوق

$$J_{a,c} = J_c^{Ref} \exp \left( \frac{-E_{a,c}}{RT} \right) \quad (4)$$

که  $J$  نشانگر دانسیته جریان می باشد.

ولتاژ اهمی سل بر مبنای معادله زیر به دست می آید.

$$V_{ohm} = JR_m \quad (5)$$

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

$$R_m = \int_0^L \frac{dx}{\sigma_x} \quad (6)$$

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

$$\sigma_x = [0.5139 \lambda(X) \\ - 0.326] \exp \left[ 1263 \left( \frac{1}{303} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (7)$$

$\lambda$  و  $T$  به ترتیب محتویات آب در فصل مشترک غشا با آند و کاتد می باشد [۹].

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

$$V_o = 1.2229 - 8.5 \times 10^{-4} (T_m - 298) \quad (8)$$

$T_m$  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 می آید.

$$E_{elec} = JV = EX_{elec} \quad (9)$$

انرژی الکتریکی و اکسرژی الکتریکی مقادیر یکسانی در سل الکترولایزر دارند از این رو با رابطه بالا اکسرژی الکتریکی هم به دست می آید.

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 می آید.

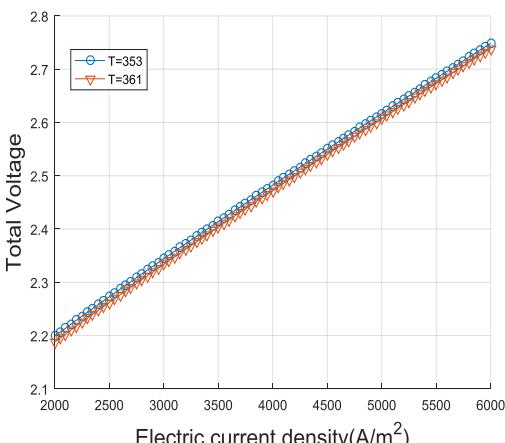
$$\dot{Q}_{gen} = \dot{Q}_{loss} + \dot{Q}_{H2O,out} \quad (10)$$

انرژی، بازدهی اکسرژی، انرژی مصرفی را بر حسب دانسیته جریان، در دمای 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 ارونده بررسی شده است. این واحد در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد، فشار ۴ بار، ضخامت ۷۰۰ میکرون و با چگالی جریان ۵۵۰۰ آمپر بر مترا مربع 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 قابل دسترس ۳۶۱ درجه کلوین مقایسه نموده و نتایج بیان می‌گردد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود با افزایش ۸ درجه‌ای دما، در چگالی ۵۵۰۰ آمپر بر مترا مربع، کل ولتاژ مصرفی تقریباً ثابت می‌ماند (شکل ۲). همچنین مقدار انرژی مصرفی تقریباً ثابت می‌یابد (شکل ۳) اما راندمان انرژی حدود ۶ درصد افزایش می‌یابد (شکل ۴). 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 (شکل ۶)، در همان چگالی جریان، راندمان اکسرژی از ۱۳۸ به ۱۶ افزایش می‌یابد.

در جدول ۲ مقایسه بین مقادیر انرژی و اکسرژی در دمای چگالی‌های جریان عملیاتی به صورت خلاصه ارائه شده است. همچنین در جدول ۳ مقایسه بین تغییرات دما و چگالی عملیاتی مختلف در دو ولتاژ ۲۰۰۰ A/m<sup>2</sup> و ۶۰۰۰ A/m<sup>2</sup> به دست آورده است.



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

$$\Psi_{energy} = \frac{\dot{N}_{cl_2} Ex_{cl_2}}{Ex_{elec}} \quad (19)$$

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 گرمایی هدررفت در غشا می‌باشد. در این محاسبات از گرمایی 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 [۴۸].

$$\dot{N}_{cl_2} = \dot{N}_{H_2} = \frac{J}{2F} \quad (20)$$

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

$$Ex_{ph,i} = C_{p,i} T_o \left( \frac{T_i}{T_o} - 1 - \ln\left(\frac{T_i}{T_o}\right) + \ln\left(\frac{P_i}{P_o}\right) \right) \quad (21)$$

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

$$\Psi_{energy} = \frac{\dot{N}_{cl_2} Ex_{cl_2}}{Ex_{elec}} \quad (22)$$

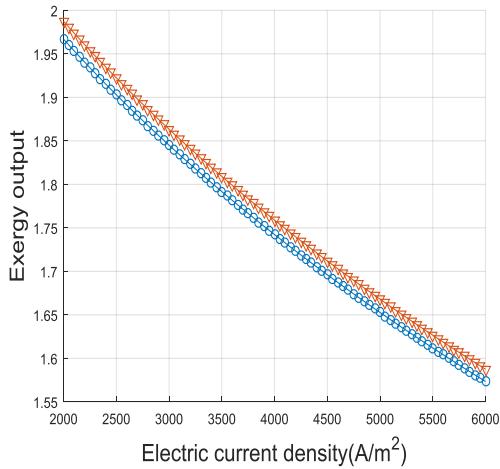
## ۵- شرایط مرزی

فرض‌های ترمودینامیکی به کار 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 خطأ<sup>۱</sup> و حل معادلات با استفاده از کامپیوترا کامپیوتویی می‌باشد. و با توسعه معادلات بقای جرم، انرژی و اکسرژی، الگوریتم طراحی برای الکترولایزر غشایی نوشته شده 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

<sup>1</sup>. q-iteration



شکل ۵: مقدار راندمان اکسرژی بر حسب 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

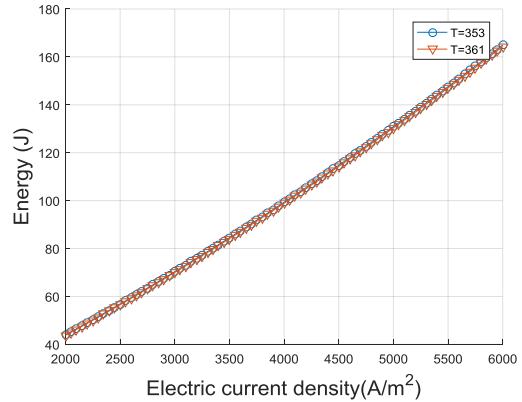
راندمان اکسرژی		راندمان انرژی		انرژی (J)		چگالی جریان
361K	353K	361K	353K	361K	353K	
1.70	1.68	0.548	0.48	44	44	2000A/m <sup>2</sup>
1.37	1.35	0.438	0.382	164	164	6000A/m <sup>2</sup>

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

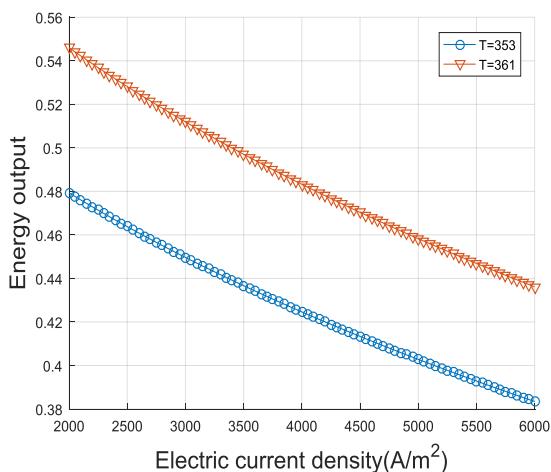
ولتاژ کل (V)		ولتاژ فعالسازی آند (V)		ولتاژ فعالسازی کاتد (V)		چگالی جریان
361K	353K	361K	353K	361K	353K	
2.195	2.20	0.628	0.632	0.143	0.144	2000A/m <sup>2</sup>
2.725	2.73	0.662	0.665	0.175	0.175	6000A/m <sup>2</sup>

#### ۸- اعتبار سنجی

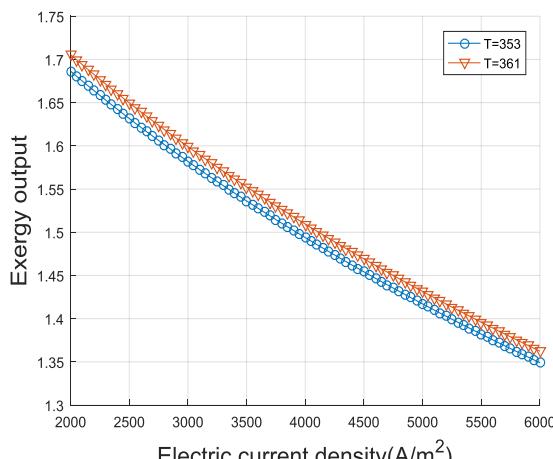
ارزیابی اعتبار مدل سازی انجام شده برای الکترولایزر قلیایی با غشا تبادلی با مقایسه نتایج بدست آمده در این تحقیق با داده های گزارش شده در مطالعات تجربی موجود در منابع علمی صورت گرفت. همخوانی قابل قبولی بین نتایج تجربی و محاسبات عددی وجود دارد. مقادیر بدست آمده برای انرژی سل با مقادیر تجربی قابل قیاس می باشد. در مورد نتایج بدست آمده برای اکسرژی در دماهای بالا تفاوت با مقادیر تجربی وجود دارد. در حالی که در دماهای واقعی عملیاتی ۸۵ درجه سلسیوس بازدهی در دامنه ۷۰-۴۰ درصد در فشارها و ضخامت های غشا مختلف محاسبه می شود. مقایسه با نتایج تجربی نشان می دهد که مقادیر گزارش شده معتبر می باشند.



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



شکل ۲: مقدار راندمان انرژی بر حسب دانسیته جریان در دمای فعلی و دمای پیشنهادی



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

[۳] کلباسی، منصور، تقی، 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 Pressure Electrolyzer System For Hydrogen Production", *Jurnal Teknologi*, vol 75: 8 , 2015, Page 65– 69.

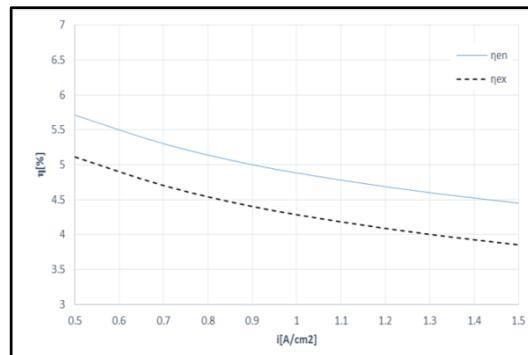
[5] Shen; Muzhong, Bennett; Nick, Ding; Yulong, Scott; Keith, " A Concise Model For Evaluating Water Electrolysis", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol 36 , 2011, Page 14335 – 14341

[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.*



شکل ۶: راندمان انرژی و اکسرژی برای الکترولیز تولید هیدروژن

برای تعیین اعتبار نتایج از مقایسه مقالات مشابه [۷] از جمله مقالاتی که در آن آنالیز انرژی و اکسرژی انجام شده است می‌توان به مقاله تاہیر 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 تغییرات 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.