

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

محمد مجدی مجدیان<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

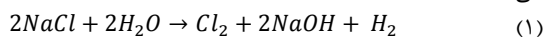
### چکیده

الکترولیزر واحد کلرآلکالی از طریق الکترولیز آب نمک خالص محصولات کلر، هیدروژن و کاستیک تولید می‌نماید. الکترولیزر از لحاظ انرژی مصرفی، یکی از پرمصرف‌ترین تجهیزات در صنعت می‌باشد که پرداختن به عوامل موثر در کاهش مصرف انرژی ضروری می‌نماید. در این پژوهش با استفاده از مدل سازی الکترولیزر 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 پروژه، الکترولیزر 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، الکترولیزر، دما، انرژی، اکسرژی

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 الکترولیزر پرداخته است. این مدل الکترولیزر اجازه می‌دهد تا ولتاژ عامل، دمای خروجی گاز و بهره‌وری الکترولیزر را برای هر نرخ جریان گاز ورودی مشخص، چگالی یا شدت جریان، مساحت سلول فعال، تلفات حرارت خارجی و راندمان را به دست آورد.

کو و همکاران [۲] یک مدل الکترولیزر برای تحلیل سیستم تولید هیدروژن با استفاده از یک سلول الکترولیز اکسید جامد ارائه کرده است و تأثیرات پارامترهای اصلی بر اساس مدل توسعه یافته 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 درون ریز و برون ریز 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

### ۱- مقدمه

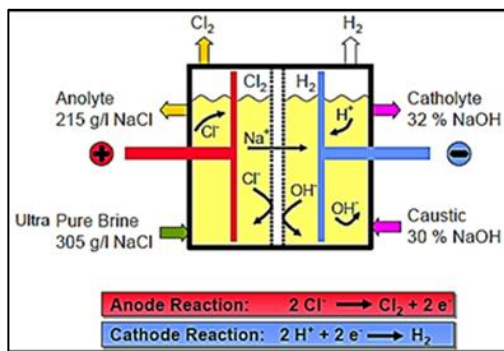
الکترولیزر غشایی نوعی از الکترولیزر هست که در مقایسه با الکترولیزرهای سلول جیوه‌ای و سلول دیافراگمی مصرف انرژی کمتر و راندمان بالاتری دارد. کاهش انرژی مصرفی سل و افزایش راندمان انرژی، از طریق تمرکز بر روی دما و افزایش راندمان اکسرژی با تمرکز بر روی فشار میسر گردیده است. اثربخشی غشاء به عنوان یک تجهیز 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 الکترولیزر غشایی به دلیل مکانیسم‌های نفوذ در غشا و لایه نفوذ اطراف الکترودها فعال تر 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 به وسیله عبور جریان مستقیم تجزیه شده و به کلر، هیدروژن و محلول سود تبدیل می‌گردد. در این نوع الکترولیزرها 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 آب نمک اشباع، گاز کلر در طرف آند آزاد

برای جایگزینی مصرف انرژی برق نسبت به زیرسیستم چرخه مس-کالر نگه می‌دارد. همچنین استفاده از رآکتور فوتوکاتالیستی ترکیبی به جای برق در چرخه مس-کالر بیشتر با محیط زیست سازگار است. با بررسی مقالات فوق می‌توان به این نتیجه رسید که با مدل سازی و برنامه نویسی عددی مناسب می‌توان عملکرد الکترولیزر غشایی برای محلول آب نمک و عوامل مؤثر بر آن را بررسی نمود.

### ۳- مشخصات الکترولیزر

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



شکل ۱: شماتیکی از الکترولیزر و نحوه جداسازی کلر

در جدول شماره ۱ برخی پارامترها و ثوابت مورد نیاز آورده شده است و برای بررسی روند تغییرات، یک بازه از دانسیته جریان از ۲۰۰ تا ۶۰۰ آمپر بر مترمربع در نظر گرفته شده است.

جدول ۱: پارامترهای ثابت مورد استفاده جهت مدل سازی انرژی و اکسرژی سیستم الکترولیزر غشا پلیمری

پارامتر	مقدار
$P_{Cl_2}$	1 (bar)
$P_{H_2}$	1 (bar)
$T_{membrane}$	80 (°C)
$E_{act,anod}$	76 (Kj/mol)
$E_{act,cathod}$	18 (Kj/mol)
$\lambda_a$	۱۴
$\lambda_c$	۱۰
$L_{membrane}$	100 (μm)
Electrode effective area	100 (cm <sup>2</sup> )
NaCl concentration	40%
$J_a$	1.7×10 <sup>5</sup> (A/m <sup>2</sup> )
$J_c$	4.6×10 <sup>3</sup> (A/m <sup>2</sup> )
F	96486 (C/mol)

### ۴-مدلسازی

ترسیم شود. سپس با استفاده از داده‌های تجربی، شرایط اپتیمم عملیاتی برای الکترولیزر آب نمک حاصل گردیده است. در این مطالعه تغییرات فشار طرف آند، فشار طرف کاتد، اختلاف فشار طرف کاتد و طرف آند، دمای آب نمک خروجی، دمای سود خروجی و نیز تغییرات غلظت آب نمک خروجی همگی برحسب 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 اتلافات سیستم الکترولیزر فشار بالا برای تولید هیدروژن با استفاده از روابط اصلی ترمودینامیک و الکتروشیمیایی مربوطه و مدل سازی در برنامه متلب پرداخته است. اضافه ولتاژ در آند و کاتد و اضافه ولتاژ اهمیک به صورت جداگانه مورد بررسی قرار گرفته است.

شن [۵] در این تحقیق سعی در بهبود عملکرد الکترولیزر از دو جنبه‌ی افزایش فعالیت الکتروشیمیایی الکترودها و کاهش مقاومت کل سلول الکترولیتی دارد. این مقاله یک مدل مختصر برای توصیف عملکرد الکترولیزر آب با استفاده از ترکیب ترمودینامیکی، جنبشی و اثرات مقاومت الکتریکی فرآیند الکترولیزر آب را برای اولین بار پیشنهاد می‌کند. در مقایسه با معادله جنبشی باتلرولمر، این مدل دارای پارامترهای کمتر و بیان راحت تر است که می‌تواند به راحتی در شبیه سازی سلول های 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 الکترولیزر 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 الکتروند است. هندسه صفحه مش دار با آزیست 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 جایجایی لایه میکرو همرفتی از سطح الکتروند 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 الکترولیزر سیکل مس-کالر باشد بررسی کردند. مطالعه پارامتری به منظور بررسی اثرات تغییر چگالی جریان، درجه حرارت رآکتور، فاصله الکتروند و درجه حرارت محیط در میزان تولید هیدروژن، هزینه‌های تولید هیدروژن و راندمان انرژی و اکسرژی رآکتور انجام شده است. نتایج به دست آمده 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 افزایش یافته 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 کلون افزایش می‌یابد. با افزایش دمای محیط، راندمان اکسرژی تولید هیدروژن ترکیبی فوتوکاتالیستی رآکتور از ۵.۲۵ به ۳.۹ درصد کاهش می‌یابد. نتایج به دست آمده از این تحقیق نشان می‌دهد که رآکتور فوتوکاتالیستی ترکیبی در خود، پتانسیل بسیار زیادی

که در آن  $\dot{Q}_{gen}$  انرژی حرارتی تولید شده در سلول،  $\dot{Q}_{loss}$  انرژی حرارتی تلف شده و  $\dot{Q}_{H_2O, out}$  انرژی حرارتی آب خروجی از کتروولایزر می باشد.

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

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

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.

$$E_{heat} = \dot{Q}_{gen} = 0 \quad (12)$$

اما در صورتی که  $v_{irr} < T\Delta S$  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 کتروولایزر 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  $R_t$  برابر مقاومت حرارتی کل کتروولایزر می باشد.

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

$$\dot{Q}_{H_2O, OUT} = \dot{Q}_{gen} - \dot{Q}_{loss} \quad (15)$$

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 (۱۶) 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 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 می آید [۴۰].

$$\dot{N}_{Cl_2} = \dot{N}_{H_2} = \frac{J}{2F} \quad (17)$$

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 می آید.

$$Ex_{ph,i} = C_{p,i}T_0 \left( \frac{T_i}{T_0} - 1 - \ln\left(\frac{T_i}{T_0}\right) + \ln\left(\frac{P_i}{P_0}\right) \right) \quad (18)$$

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

معادلات بقای جرم، بقای انرژی و موازنه اکسرژی معادلات حاکم بر این بخش است. کل انرژی مصرفی کتروولایزر 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.

$$V_{total} = V_{a,a} + V_{a,c} + V_{ohm} + V_0 \quad (2)$$

که در این رابطه  $V_{a,a}$  ولتاژ اکتیواسیون آند،  $V_{a,c}$  ولتاژ اکتیواسیون کاتد،  $V_{ohm}$  ولتاژ اهمی سل و  $V_0$  ولتاژ حالت استاندارد سل کتروولایزر قلیایی 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 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].

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

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

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

$$V_0 = 1.2229 - 8.5 \times 10^{-4}(T_m - 298) \quad (8)$$

$T_m$  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 کتروولایزر 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 کتروولایزر بر اساس معادله زیر بیان می گردد. بازدهی انرژی سل برای تولید کلر با استفاده از رابطه زیر به دست می آید.

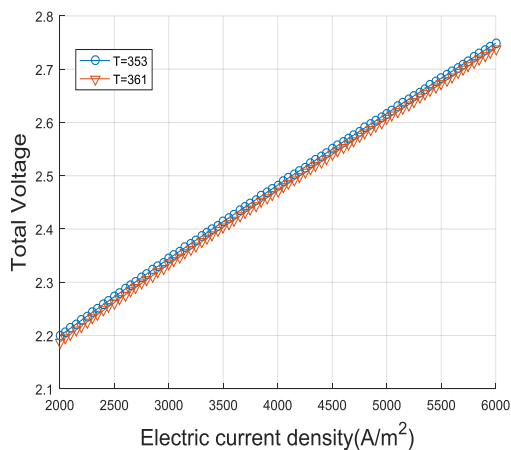
$$\dot{Q}_{gen} = \dot{Q}_{loss} + \dot{Q}_{H_2O, out} \quad (10)$$

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 ارونده بررسی شده است. این واحد در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد، فشار ۴ بار، ضخامت ۷۰۰ میکرون 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 کلون با دمای قابل‌دسترس ۳۶۱ درجه کلون 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 (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 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 ۲۰۰۰ A/m<sup>2</sup> و ۶۰۰۰ A/m<sup>2</sup> ذکر شده است.



شکل ۲: مقدار ولتاژ مصرفی برحسب 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 گرمای هدررفت 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].

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

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

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

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

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

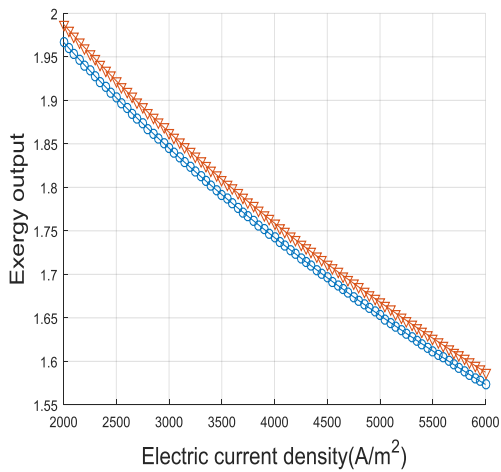
#### ۵- شرایط مرزی

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 خطا و حل معادلات با استفاده از کدنویسی کامپیوتری 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

1. q-iteration



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

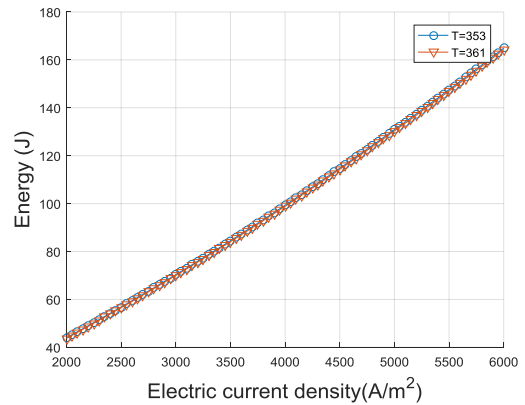
راندمان اکسرژی		راندمان انرژی		انرژی (J)		چگالی جریان
361K	353K	361K	353K	361K	353K	
1.70	1.68	0.548	0.48	44	44	2000A/m <sup>2</sup>
1.37	1.35	0.438	0.382	164	164	6000A/m <sup>2</sup>

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

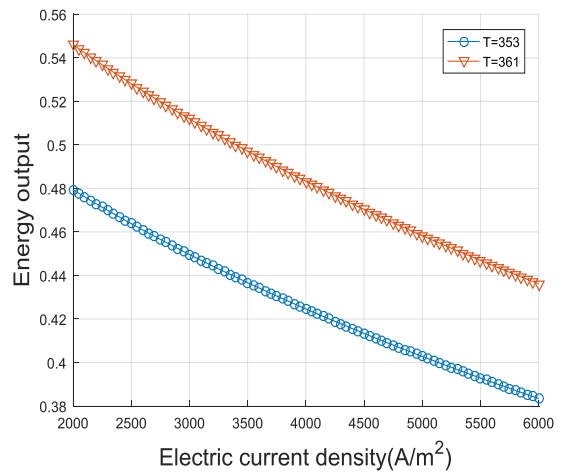
ولتاژ کل (V)		ولتاژ فعالسازی آند (V)		ولتاژ فعالسازی کاتد (V)		چگالی جریان
361K	353K	361K	353K	361K	353K	
2.195	2.20	0.628	0.632	0.143	0.144	2000A/m <sup>2</sup>
2.725	2.73	0.662	0.665	0.175	0.175	6000A/m <sup>2</sup>

### ۸- اعتبار سنجی

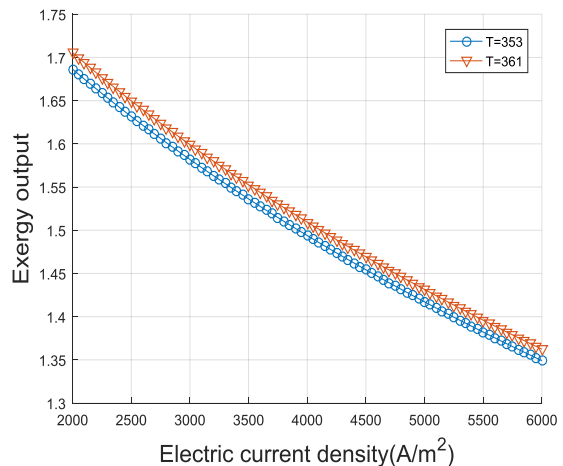
ارزیابی اعتبار مدل‌سازی انجام شده برای الکترولایزر قلیایی با غشا تبادل با مقایسه نتایج به دست آمده در این تحقیق با داده‌های گزارش شده در مطالعات تجربی موجود در منابع علمی صورت گرفت. همخوانی قابل قبولی بین نتایج تجربی و محاسبات عددی وجود دارد. مقادیر به دست آمده برای انرژی سل با مقادیر تجربی قابل قیاس می‌باشد. در مورد نتایج به دست 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 ۴۰-۷۰ درصد در فشارها و ضخامت‌های غشا مختلف محاسبه می‌شود. مقایسه با نتایج تجربی نشان می‌دهد که مقادیر گزارش شده معتبر می‌باشند.



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



شکل ۲: 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

[۳] کلباسی، منصور، تقوی، فیروزه، بهینه سازی شرایط عملیاتی واحد الکترولیز صنایع کلریارس، 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 Production", *Jurnal Teknologi*, vol 75:8 ,2015, Page 65– 69.

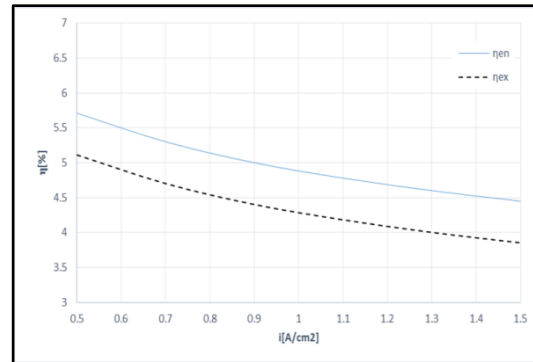
[5] Shen; Muzhong, Bennett; Nick, Ding; Yulong, Scott; Keith, " A Concise Model For Evaluating Water Electrolysis", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol 36 ,2011, Page 14335 – 14341

[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, Shimpalae 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 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 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.