فصلنامه علمی – ترویجی «نشریه انرژی ایران» دوره ۲۱، شماره ۱، بهار ۱۳۹۷، صفحه ۱۶۶–۱۴۲

مدل سازی عملکرد و مطالعه پارامتری سیستم پیل سوختی اکسید جامد

^۱ياور خالديان^{*}، ^۲روناک دقيق

	چکیدہ
تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۲/۳	در این مطالعه، عملکرد پیل سوختی اکسید جامد لولهای با سوخت هیدروژن
,,,,,,,	و تأثیر پارامترهای مختلف بر روی آن بررسی شده است .کلیه اجـزای ایـن
تاريخ پذيرش:	پیل سوختی تشریح ومدل سازی شده است و برای پیل سوختی به کار گرفته
١٣٩۵/۵/١٩	شده یک تحلیل الکتروشیمیایی مجزا انجـام شـده اسـت. آثـار پارامترهـای
	مختلف بر راندمان پیل، مورد مطالعه قرار گرفته است. در ادامه مطالعه
	پارامتری سیستم اشاره شده، تاثیر دما، فشار کاری پیل و همچنین نسبت
کلمات کلیدی:	نرخ جریان هوا به سوخت ورودی به پیل سوختی بر روی بازده و توان صورت
نىرژى تجدىدپذير،	گرفته است. نتایج نشانگر افزایش بازده پیل سوختی و توان خروجی آن در اثر
پیل سوختی اکسید جامد، انسبایا	افزایش ضریب بهرهوری سوخت، چگالی جریان و ولتاژ واقعی پیل سوختی
افت ولتارّ، ولتارّ واقعی،	است که مقدار بهینه ضریب بهرهوری ۰.۷ و چگالی جریان ۷۰۳۰ آمپر بر متر
ر در کا ضریب بهرهوری،	مربع می باشد. همچنین محاسبات کامل روابط مربوط به پیل سوختی اکسید
توان	جامد در سه بخش مجزای بهینـه سـازی، الکتروشـیمیایی وحرارتـی مـورد
	بررسی قرار گرفته است. برای صحت کار، نتایج حاضر با نتایج مراجع معتبر
	مقایسه شده و مطابقت خوبی مشاهده شده است.

nechanic.yavar@yahoo.com (، دانشجوی کارشناسی ارشد تبدیل انرژی، دانشگاه کردستان (نویسنده مسئول) ۲. گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه کردستان (aghighm@gmail.com

۱. مقدمه

در حال حاضر با توجه به بحران انرژی، محدودیت سوختهای فسیلی و تجدید نایدیربودن آنها و مشکلات ناشی از آلودگیهای این نوع سوختها، استفاده از منابع جدید انـرژی و تجدیدیـذیر بـیش از پیش مورد توجه قرار گرفته است. در همین راستا دیدگاه نوینی برای استفاده از هیدروژن با توجه به خصوصیات منحصر به فرد آن ایجاد شده است. کاربرد هیدروژن به عنوان سوخت، موجب کاهش آلایندههای زیست محیطی و حذف اکسیدهای کربن و گوگرد ناشبی از احتارق سوختهای فسیلی می گردد. در سال های اخیر، پیل سوختی، یکی از پر بازدهترین منابع تولید انرژی بوده است. پیل های سوختی فناوری جدیدی برای تولید انرژی هستند که بدون ایجاد آلودگیهای زیست محیطی و صوتی، از ترکیب مستقیم بین سوخت و اکسیدکننده، انرژی الکتریکی با بازدهی بالا تولید می کنند. تولید مستقیم الکتریسیته جایگزینی برای چرخه کارنو جهت تبدیل انـرژی شـیمیایی حاصـل از سـوخت بـه انرژی گرمایی و مکانیکی و در نهایت الکتریسیته میباشد که اتلاف انرژی را به حداقل ممکن میرساند و به بازده تئوری دست پیدا می کنیم. در واقع پیل سوختی یک دستگاه الکتروش یمیایی است که طی واکنش بین هیدروژن و اکسیژن، الکتریسیته و گرما تولید می کند. از جمله مزایای مهم این فناوری نوین می توان به مواردی از جمله: پاک بودن، کارکرد بی صدا، عدم انتشار گازهای گلخانهای، مدولار بودن، بهرهبرداری راحت، ایمنی، هزینه نصب و تعمیر و نگ داری پ ایین، عدم وجود اجزای متحرک، امکان اتصال به سیستمهای مختلف از جمله میکرو توربینها و ...، امکان استفاده در نقاط دور شبكه اشاره كرد [۱۹٬۱۵٬۲٬۲۵٬۲۰]. سازه و بدنه اصلي پيل سـوختي از الكتروليـت، الكتـرود أنـد و الكترود كاتد تشكيل شده است. واكنشهايي كه توليد الكتريسيته مي كنند، در الكترودها اتفاق مي افتند. همچنین هر پیل سوختی یک الکترولیت دارد که ذرات دارای بار الکتریکی را از یک الکترود به الکترود ديگر منتقل مي كند و يک كاتاليست كه انجام واكنش در الكترودها را تسريع مي كند[۱۱]. هيدروژن سوخت اصلی است ولی پیل های سوختی به اکسیژن هم نیاز دارند. از میان انواع پیل سوختی، نوع اکسید جامد به دلیل راندمان بالا، آلودگی کم، تنوع سوخت مصرفی و از همه مهمتر دمای بـالای گـاز خروجی، بهترین گزینه برای استفاده در سیستمهای ترمودینامیکی به شمار میرود[۱۴]. به همین دلیل در سالهای اخیر، این تکنولوژی بسیار مورد توجه قرار گرفته است. محدوده دمای عملکرد این پیل ۶۰۰ تا ۱۰۰۰ درجه سانتی گراد است و به همین دلیل از انواع سوختها در آن می توان استفاده نمود[۱۴]. این پیل سوختی دو ساختار صفحهای و لولهای دارد و از الکترولیت جامد سرامیکی ناز کی به جای الکترولیت مایع استفادہ می شود. در دمای عملکرد بالا در پیـل سـوختی اکسـید جامـد یـونهـای اکسیژن (با بار منفی) از شبکه کریستالی (عموماً ترکیبے) از اکسـید زیرکـونیم و اکسـید کلسـیم) عبـور می کنند. در کاتد مولکول های اکسیژن هوا با چهار الکترون ترکیب می شوند. وقتی یک سوخت گازی حاوی هیدروژن از آند عبور کند، یک جریان شارژ شده منفی شامل یون های اکسیژن از الکترولیت عبور می کند تا سوخت را اکسید کند. الکترون های ایجاد شده در آند، از یک مدار خارجی عبور می کنند و به کاتد می روند با این کار مدار الکتریکی کامل شده و انرژی برق تولید می شود. بازدهی پیل های سوختی اکسید جامد در حدود ۴۵ تا ۶۰ درصد و میزان دانسیته تولیدی در این نوع از پیلها ۲۴۰ تـ ۳۰۰ آمپ ر است. طول عمر این نوع پیل سوختی بیش از ۴۰۰۰۰ ساعت است[۱۳]. ترکیب این پیلها با سیستمهای دیگر بازده الکتریکی را به طور چشمگیری افزایش میدهد. اخیراً تحقیقات و کارهای زیادی بر روی پیل های سوختی اکسید جامد و ترکیب آن با سیستمهای چند منظوره انجام گرفته است. که می توان به تحقیق سامیشیما و همکاران[۲۰] اشاره کرد کـه در ایـن تحقیـق اثـر متـان را بـر روی خصوصیات سل (پیل سوختی) و مقدار کربن تولیدی در ترکیب گاز CH₄-CO₂ مورد بررسی قرار داده بودند و به این نتیجه رسیده بودند که افزایش غلظت متان در ترکیب گاز CH₄-CO₂ منجر به افزایش ولتاژ سل می شد. بوچینگر و همکاران[۴] تأثیر افزایش غلظت CH4 در H₂ بر روی عملکرد سل پیـل سوختی و میزان پایداری آن ارزیابی کردند، که نشان داده بودند افزایش غلظت متان موجب کاهش ولتاژ سل می شود. یو و همکاران[۲۶،۲۱،۱۸،۱۷،۱۶] پیل سوختی اکسید جامد را برای سیستمهای تولید همزمان تحت شرایط عملکردی و پارامترهای طراحی مختلف مورد ارزیابی و با استفاده از نرمافزار متلب أن را شبیه سازی کرده بودند. لونگ[۱۷] سیستم ترکیبی پیل سوختی اکسید جامد با چیلر جـذبی را مورد بررسی قرار داد.

در این تحقیق، مدل پیل سوختی اکسید جامد، مدل سازی شده و مورد تحلیل و بررسی قرارگرفته است. سوخت مصرفی پیل سوختی گاز طبیعی میباشد. ابتدا روابط الکتروشیمیایی پیل سوختی مدل سازی شدهاند و سپس این مدل سازی در نرم افزار EES به صورت کد نوشته شده است. در ادامه به مطالعه پارامتری پیل سوختی پرداخته شده است، تأثیر پارامترهای مختلف از جمله چگالی جریان، دماهای مختلف پیل، نرخ جریان سوخت ورودی و دمای هوای ورودی بر روی ولتاژ واقعی پیل سوختی مورد بررسی قرار گرفته شده است، همچنین تأثیر ضریب به رموری سوخت بر روی بازده الکتریکی پیل سوختی و تأثیر این ضریب در چگالی جریانهای مختلف بر روی ولتاژ پیل سوختی مورد بررسی قرار گرفت. در این سیستم هوای گرم شده وارد کاتد پیل سوختی می شود. از طرف دیگر، سوخت وارد آند پیل سوختی می شود. پس از انجام واکنش الکتروشیمیایی درون پیل سوختی و تولید توان، محصولات با دمای بالا تولید می کند.

۲. مدلسازی پیل سوختی اکسید جامد (SOFC)

فرضيات كلى سيستم

فرضیات در نظر گرفته شده برای مدلسازی پیل سوختی: - ازتوزیع دما، فشار و اجزای شیمیایی درو نپیل صرف نظر شده است. - از نشتی گاز داخل سیستم به بیرون صرف نظر شده است. - جریان سیال در کلیه اجزای پیل پایدار در نظر گرفته شده است. - رفتار تمامی گازهای موجود در پیل به صورت گاز ایدهال فرض شده است. - از تغییرات انرژیهای جنبشی و پتانسیل صرفنظر شده است. - دمای گازهای خروجی آند و کاتد یکسان و برابر دمای کاری پیل سوختی فرض شده است.



شکل ۱. اجزای پیل سوختی، ورودی و خروجیهای آن

مدل پیل سوختی اکسید جامد مورد مطالعه در این مقاله، بر اساس مدل توسعه یافته پیل سوختی اکسید جامد لولهای میباشد یک مشخصه مثبت برای پیلهای سوختی اکسید جامد توانایی استفاده هم زمان از هیدروژن و مونواکسیدکربن به عنوان سوخت است. به دلیل دمای عملیاتی بالا در این نوع پیل، امکان تولید سوخت مورد نیاز پیل از هیدروکربنهاییمانندگاز طبیعی در داخل پیل وجود دارد. در این تحقیق از بهبود دهنده داخلی مستقیم استفاده شده است. واکنشهای انجام شده در این فرایند به صورت زیر است [۳و ۲۲]:

$$CH_4 + H_2O \rightarrow CO + 3H_2 \tag{1}$$

$$\rm CO + H_2O \rightarrow \rm CO_2 + H_2$$
 (Y)

که این دو واکنش به ترتیب واکنش دگرگونی۱ و بهسازی۲ نامیده می شوند. طبق واکنش های بالا گاز طبیعی متان در داخل پیل سوختی به هیدروژن تبدیل شده و سپس طبق واکنش های زیر در واکنش های پیل سوختی شرکت میکند واکنش های الکتروشیمیایی در آند وکاتد بر اساس رابطه های زیر رخ می دهد[۱۹ و ۱۹]:

$$\frac{1}{2}O_2 + 2e^- \to O^{2-} \text{ or } \mathcal{O}_2$$

$$H_2 + O^{2-} \to H_2O + 2e^{-}$$
 واكنش أند (۴)

1. reforming

2. shifting

1

ساز و کار واکنش بهسازی داخلی متان و دگرگونی آب و گاز در داخل پیل سوختی طبق معادلات تعادلی زیر است[۳و ۸]:

$$x \to (CH_4 + H_2O \to CO + 3H_2) \tag{8}$$

$$y \to (CO + H_2O \to CO_2 + H_2) \tag{V}$$

$$z \to (H_2 + \frac{1}{2}O_2 \to H_2O) \tag{(A)}$$

در رابطههای بالا، x و y و z بهترتیب نرخ مولی پیشرفت واکنشهای بهسازی، دگرگونی و واکنش کلی پیل است. با موازنه جرمی گازهای مختلف در تعادل، طبق روابط زیر نرخ مولی گازهای خروجی از پیل سوختی به دست خواهد آمد:

$$[n_{CH_4}]_{out} = [n_{CH_4}]_{in} - x \tag{9}$$

$$[n_{H_2O}]_{out} = [n_{H_2O}]_{in} - x - y + z \tag{(1)}$$

$$[n_{H_2}]_{out} = [n_{H_2}]_{in} + 3x + y - z \tag{11}$$

$$[n_{CO}^{\cdot}]_{out} = [n_{CO}^{\cdot}]_{in} + x - y \tag{11}$$

$$[n_{CO_2}^{\cdot}]_{out} = [n_{CO_2}^{\cdot}]_{in} + y \tag{17}$$

$$[n_{tot}]_{out} = [n_{tot}]_{in} + 2 \tag{14}$$

با توجه به معادلات بالا فشار جزئیگازهای خروجی از آند و کاتد با استفاده از رابطه زیر به دست میآیند:

$$p_i^{out} = \frac{n_i^{out}}{n_{tot}^{out}} p_{cell}$$
(۱۵)

واکنشهای بهسازی و دگرگونی واکنشهای تعادلی بوده و مقدار اجزای آنها به دمای ترکیب اولیه و دمای نهایی واکنشها بستگی دارد. رابطه بین مقدار اجزای در تعادل، ترکیب تعادل و دمای نهایی آن توسط ثابت تعادل برقرار مــیشود. برای دو واکنش بهسازی و دگرگونی ثابتهای تعادل به صورت زیر تعریف میشوند:

$$k_{pr} = \frac{([n_{CO}]_{in} + x - y)([n_{H_2}]_{in} + 3x + y - z)^3}{([n_{CH_4}]_{in} - x)([n_{H_2O}]_{in} - x - y + z)} p_{cell}$$
(19)

$$k_{ps} = \frac{\left(\left[n_{H_2}\right]_{in} + 3x + y - z\right)\left(\left[n_{CO_2}\right]_{in} + y\right)}{\left(\left[n_{CO}\right]_{in} + x - y\right)\left(\left[n_{H_2O}\right]_{in} - x - y + z\right)} z$$
(1V)

$$= u_f \begin{pmatrix} 3x + y \\ +n_{H2O}^{in} \end{pmatrix} \tag{1A}$$

جدول ۱: دادههای ورودی سوخت و هوای مصرفی

حالت	دما	نرخ	درصد مولی سوختهای ورودی(٪)						
	(C)	جريان(Kg/s)							
			CH ₄	H ₂ O	H ₂	CO ₂	CO	N_2	O ₂
١	V40	۰.۱۸۰۶	18.09	۱۸.۰۷	17.94	22.72	19.41	٨.٨٩	-
۲	٨٠٠	۰.۶۷۱۹	-	-	-	-	-	۷۹	۲۱

ثابت تعادل برای یک مخلوط گاز ایده ال با توجه به رابطه بالا فقط تابعی از دماست. بنا بر این برای واکنش بهسازی بخار و دگرگونی، k_p به صورت یک تابع چند جملهای و به صورت زیر بیان می شود:

$$\log k_p = AT^4 + BT^3 + CT^2 + DT^1 + E$$
 (19)

که A,B,C,D,E ثابتهای تجربی هستند. و u_f ضریب بهرموری سوخت است.

مقدار	پارامتر
$-2,63121 * 10^{-11}$	Ar
$1,24065 * 10^{-7}$	Br
$-2,25232 * 10^{-4}$	Cr
$1,95028 * 10^{-1}$	Dr
$-6,61395 * 10^{1}$	Er
$5,47301 * 10^{-12}$	As
$-2,57479 * 10^{-8}$	Bs
4,63742 * 10 ⁻⁵	Cs
$-3.915 * 10^{-2}$	Ds
1,32097 * 10 ¹	Es
0.85	u_f

جدول ۲. دادههای تجربی برای واکنش بهسازی و دگرگونی [۲۰]

برای محاسبهٔ ولتاژ پیل سوختی از معادله مشهور نرنست که به صورت زیر میباشد استفاده می شود [۱۲]:

$$E_{re} = \frac{-\Delta G^{\circ}}{nF} + \frac{R_g T}{2F} Ln \frac{P_{H2} P_{O2}^{1/2}}{P_{H2O}}$$
(Y•)

$$\sum_{re} E_{re} = \frac{-\Delta G^{\circ}}{nF} + \frac{R_g T}{2F} Ln \frac{P_{H2} P_{O2}^{1/2}}{P_{H2O}}$$
(Y•)

$$\sum_{re} E_{re} = \frac{P_{H2}}{n} \sum_{re} E_{re} + \frac{\Delta G}{nF} = -\frac{\Delta G}{nF} = -\frac{\Delta G}{n} \sum_{re} E_{re} + \frac{\Delta G}{n} \sum_{re} E_{re} + \frac{P_{H2}}{n} \sum_{re} E_{re} + \frac{P_{H$$

$$\Delta G = \Delta H_{\circ} - \frac{T}{T_{\circ} (\Delta H_{\circ} - \Delta G_{\circ})} - \Delta c_p T \left[Ln \left(\frac{T}{T_{\circ}} \right) + \left(\frac{T_{\circ}}{T} - 1 \right) \right]$$
(YY)

که در این رابطه n تعداد مول اکسیژن در هر مول سوخت، Δc_p تغییرات گرمای ویژه واکنش کلی، δf که در این رابطه δr تعدار آنتالپی درحالت استاندارد، ΔG تغییرات انرژی آزاد گیبس در حالت استاندارد، F فارادی یا ΔH تعداد کولن در هر مول سوخت، T_{H2} فشارهای حالت استاندارد، T دمای کاری پیل سوختی و P_{H2} فشارهای جزئی گازها میباشند.

	6
پارامتر	مقدار
تعداد مول اکسیژن در هر مول سوخت ∘n	۵. •
دمای حالت استاندارد <i>۲۰</i> (K)	247
دمای کاری پیل سوختی T (K)	1774

جدول ۳. دادههای ورودی برای ولتاژ بیشینه پیل سوختی

ولتاژعملكردپيلسوختىاكسيدجامد

وقتی پیل سوختی تحت شرایط عملکردی تولید جریان خارجی کار می کند، مقداری افت ولتاژ در پیل اتفاق میافتد که باعث می شود ولتاژ خروجی پیل همیشه کمتر از مقدار بیشینه ولتاژ باشد. افتها که پلاریزاسیون نامیده می شوند معمولا عبارتند از: ۱) پلاریزاسیون فعال سازی Vact ۲) پلاریزاسیون فعال سازی کمتر است. ۳) پلاریزاسیون غلظت Von ولت اژ عملکرد پیل سوختی به صورت زیر تعیین می شود[۱۲]: ۷) در ۲۳)

در رابطه بالا افت ولتاژها معمولا به فشار جزئی گازها، دما و چگالی جریان در یک پیل سوختی واقعی بستگی دارد. در ادامه به محاسبه افت ولتاژ در پیل سوختی پرداخته می شود.

پلاريزاسيون فعالسازي

پلاریزاسیون فعال سازی V_{act} به سرعت انجام واکنش الکتروشیمیایی بر روی سطح الکترود وابسته است. در واکنشهای الکتروشیمیایی نیز مانند واکنشهای شیمیایی، واکنشگرها باید از سد انرژی فعالسازی عبور کنند. اتلاف حاصل از پلاریزاسیون فعالسازی در دانسیته جریان پایین قابل ملاحظه است و با افزایش دانسیته جریان به میزان کمی افزایش مییابد. پلاریزاسیون فعالسازی توسط رابطه نیمه تجربی باتلر ولمر به صورت زیر بیان می شود [۱۰،۹،۷۰۶]:

$$I = I_0 \left[\exp\left(\frac{V_{act}.\alpha.F.ne}{R_g T}\right) - \exp\left(-\frac{V_{act}.F.ne.(1-\alpha)}{R_g T}\right) \right]$$
(Yf)

که I چگالی جریان الکتریکی است و واحد آن A/m می باشد. از رابطه بالا نمی توان به صورت مستقیم V_{act} را به دست آورد، اما برای پیلهای سوختی با الکترود هیدروژن مقدار α برابر ۵.۵ فرض می شود و در نتیجه معادله ساده می شود:

$$V_{act} = \frac{2R_g T}{neF} \sinh^{-1}(\frac{I}{2I_o}) \tag{Ya}$$

$$I_{o,c} = \gamma_c \cdot (\frac{P_{02}}{P_{atm}})^{m_1} \cdot exp(-\frac{E_{act.c}}{R_g T})^{m_2}$$
(YF)

$$I_{o,A} = \gamma_A \cdot \left(\frac{P_{H2}}{P_{atm}}\right) \left(\frac{P_{H2O}}{P_{atm}}\right) \cdot exp\left(-\frac{E_{act.A}}{R_g T}\right)^{m_3} \tag{YY}$$

که γ_c و γ_A پارامترهایی هستند که به جنس کاتد و آند بستگی دارند و E مقدار انرژی فعال سازی آنـد و کاتد است. R_g ثابت عمومی گازها و m_i ها ضرایب ثابت هستند.

مقدار	پارامتر
$1.149 * 10^{10}$	(A/m²) γ_c ضريب
2.13 * 10 ⁸	ضريب γ _A (A/m ²)
۰.۲۵	ضريب m ₁
١	ضريب m ₂
١	ضريب m ₃
۵. ۰	α
۲	ne
11	انرژی فعالسازی آند j/mol) E _{act,a})
17	انرژی فعالسازی آند j/mol) E _{act,c})
95471	ثابت فارادیF (mol/کولن)
1,01 * 10 ⁵	فشار اتمسفر patm)
٨.٣١۴	ثابت عمومی گازها (j/mol.k)

جدول ۴. مقادیر پارامترهای ورودی برای محاسبه پلاریزاسیون فعالسازی

پلار يزاسيون اهمي

این افت ولتاژ نتیجه مقاومت الکترودها و صفحات اتصال دهنده در برابر جریان الکترونها و مقاومت الکترولیت در برابر جریان یونهاست. از آنجا که این افت ولتاژ به صورت مستقیم با دانسیته جریان پیل متناسب است به آن پلاریزاسیون اهمی گفته میشود. با افزایش دانسیته جریان پیل، این افت ولتاژ نیز به تدریج افزایش می ابد. تلفات اهمی به شدت تابع دماست. به خصوص در مورد الکترولیت که بخش عمدهای از تلفات ساول در این بخش اتفاق می افتد پلاریزاسیون اهمی برای آند، کاتد و الکترولیت متصل کننده داخلی به صورت زیر خواهد بود [۵۰،۹٬۰۰]:

$$V_{ohm} = \left(\sum \rho_k L_k\right) I \tag{YA}$$
که μ_k مقاومت و بژه (اهم) اجزاء بیل سوختی و L_k (متر) ضخامت با اندازه اجزاء هستند.

مقدار	پارامتر
$ \rho_A = 0.00008114 \exp\left(\frac{600}{T}\right) $	مقاومت ویژه ماده آند (اهم) (Ni-YSZ)
$ \rho_c = 0.0000298 \exp\left(\frac{-1392}{T}\right) $	مقاومت ویژه ماده کاتد (اهم) (LSM)
$\rho_{el} = 0.0000294 \text{exp}(\frac{10350}{T})$	مقاومت ويژه ماده الكتروليت (اهم) (YSZ)
$ \rho_{int} = 0.001256 \exp{(\frac{4690}{T})} $	مقاومت ويژه ماده اتصال داخلي(اهم) (LaCr O ₃)
•.•••)	ضخامت آند(m)
•.•• **	ضخامت کاتد(m)
• • • • • • • • •	ضخامت الكتروليت(m)
•.••••\D	ضخامت اتصال داخلی(m)

جدول ۵. پارامترهای ورودی برای محاسبه پلاریزاسیون اهمیک [۲۶]

پلاريزاسيون غلظتي

اگر واکنش گرها به مقدار کافی به الکترود نرسد، نوعی افت در میزان پتانسیل در الکترود به وجود میآید و شاهد به وجود آمدن یک گرادیان غلظت خواهیم بود .گونههای واکنش دهنده در پیل سوختی باید از کانالهای سوخت و هوا از طریق محیط متخلخل الکترود به محل انجام واکنش انتقال یابند. در این حالت مکانیزم غالب انتقال، نفوذ است. به علاوه، محصولات واکنش الکتروشیمیایی که در آند ایجاد می شوند، پس از کاهش دادن غلظت سوخت در این ناحیه، مقاومت غلظتی را افزایش می دهند. عوامل فراوانی در به وجود آمدن گرادیان غلظت مؤثرند از جمله: نفوذ آهسته واکنش گرهای گازی در حفرههای کاتالیست، انحلال واکنشگرها در الکترولیت، خروج آهسته محصول واکنش از الکترولیت.

در عمل انتقال کند واکنشگرها به مکانهای فعال انجام واکنش سبب کند شدن فرآیند می شود. در شرایط عادی عملکرد پیل، مقادیر مربوط به این افت ولتاژ بسیار کم است. این اتلاف در چگالی جریان بالا اثر بیشتری دارد، زیرا رساندن سوخت به میزان کافی به مکانهای انجام واکنش با مشکل زیادی رو به رو می شود . این پلاریزاسیون با کمیتی به نام چگالی جریان حدی به صورت رابط و زیار بیان می شود [۱]:

$$V_{con} = \frac{R_g T}{n_e F} Ln \left(1 - \frac{I}{i_L} \right) \tag{Y9}$$

که i_L چگالی جریان حدی است که در آن نرخ مصرف سوخت برابر با مقدار آن در زمانی است که بیشترین سرعت تغذیه سوخت برقرار است و این در زمانی اتفاق می افتد که غلظت روی سطح به صفر برسد، یعنی تمام واکنش دهندهها مصرف شود. در این جا برای مدل سازی پلاریزاسیون غلظتی از مقدار چگالی جریان حدی برابر $A \cdot A$ استفاده شده است [۱].

۳. روش شناسی تحقیق

درمقاله حال حاضر به مدلسازی و بررسی عملکرد پیل سوختی اکسید جامد و پارامترهای موثر بر خروجیهای مهم این پیل سوختی پرداخته شده است. با توجه به کاربرد پیل سوختی و خروجیهای مورد استفاده در هر پیل سوختی، پارامترهایی که در هر پیل سوختی خیلی مهم هستند عبارت اند از: مقدار ولتاژ تحویل داده شده یا انتقالی، حداقل توان الکتریکی، بازده الکتریکی پیل سوختی.که دراین مقاله با استفاده از نرم افزار EES یک پیل سوختی اکسید جامد مدل سازی ریاضی شده و عوامل موثر بر پارامترهای مهم پیل مورد بررسی قرار گرفته شده است. ابتدا با توجه به مطالعات و بررسی مقالات انجام شده در زمینه پیلهای سوختی اکسید جامد مدل سازی ریاضی شده و عوامل موثر واکنش ها در الکترود آند و کاتد و واکنش کلی تعیین شده، تا از روی این پارامترها بتوان مقدار فشار واکنش ها در الکترود آند و کاتد و واکنش کلی تعیین شده، تا از روی این پارامترها بتوان مقدار فشار ساده شده نرنست استفاده شده و با توجه به این که در حالت واقعی در هر پیل سوختی یک سری ساده شده نرنست استفاده شده و با توجه به این که در حالت واقعی در هر پیل سوختی یک سری افتها و بازگشت ناپذیریها وجود دارد این افتها باتوجه به فرمولهای تجربی موجود حساب شدهاند و افتها و بازگشت ناپذیریها وجود دارد این افتها باتوجه به فرمولهای تجربی موجود حساب شده دو از مقدار ولتاژ تئوری کم شدهاند تا ولتاژ واقعی پیل به دست آید. پارامترهای توان الکتریکی و بازده

٤. نتايج و بحث

شکل۲ مقایسه ای بین پلاریزاسیون اهمی، فعالسازی و غلظت در پیل سوختی اکسید جامد میباشد. همان طور که از شکل پیداست، در چگالی جریانهای پایین افت ولتاژ غالب مربوط به فعال سازی است. با زیاد شدن جریان و مقاومت اهمی، افت ولتاژ به دلیل این که هیدروژن به اندازه کافی نمی تواند در الکترود واکنش دهد، بیشتر میشود. شکل لگاریتمی افت ولتاژ غلظت، باعث خم شدن نمودار در چگالی جریان بالاتر میشود. در نمودار شکل ۲ اهمیت هر یک از افت ولتاژها و تأثیری که بر ولتاژ کلی می گذاردند، نشان داده شده است. همچنین جدول ۲ مقادیر هر یک از این افت ولتاژها را نسبت به تغییرات چگالی جریان نشان میدهد.



شکل۲. نمودار تغییرات افت پیل سوختی نسبت به چگالی جریان در دمای ۱۲۷۳ درجه سانتی گراد

جدول ۲۰ افت ولتارهای پیل شوختی نشبت به چکالی جریان				
I(A/m ²)	V _{act} (v)	V _{conc} (v)	V _{ohm} (v)	
•	•	•	•	
1	•.718	•.••\$*\$	•.••	
7	•.7917	•.• ١٣٨٧	•.• 1808	
٣٠٠٠	•.٣٣۶١	•.• ٢٢٢۴	•.• ٢ ۴ ٨ ۴	
4	۲۶۸۴. •	•.•٣٢٢۴	•.•٣٣١٢	
۵۰۰۰	•.٣٩٣۶	•.• ۴۴۴۸		
6	•.4144	•.•۶•۲۵	•.• 4988	
٧	•.4771	• .• ٨٢۴٩	۰.۰۵۷۹۶	
٨٠٠٠	۰.۴۴۷۵	۰.۱۲۰۵	•.•\$\$77	

جدول ۲. افت ولتاژهای پیل سوختی نسبت به چگالی جریان

شکل ۳ اثر چگالی جریان بر ولتاژ را در پیل نشان میدهد، همان طور که از نمودار مشخص است با افزایش چگالی جریان مقدار ولتاژ واقعی پیل سوختی به دلیل افزایش افتهای فعال سازی، اهمی و غلظتی کاهش مییابد. همچنین برای اعتبار سنجی نتایج، نتایج عددی با نتایج تجربی مقایسه شده است. نمودار شکل ۴ تغییرات ولتاژ واقعی پیل سوختی را نسبت به تغییرات دمای کارکرد پیل سوختی نشان میدهد. مطابق این شکل افزایش دمای پیل سوختی اکسید جامد لوله ای، باعث افزایش ولتاژ آن میشود. در دادههای تجربی نیز روند مشابه وجود دارد و درستی نتایج را تأیید می کند، اما اختلاف ناچیز ایجاد شده ناشی از عوامل مختلفی است. در عمل، فرآیند الکتروشیمیایی شامل مکانیزم واکنش دهنده می باشد. همچنین در مدلی که در تحقیق در نظر گرفتن رفتاره ای مولکولی اجزای توزیع دما، فشار و اجزای شیمیایی روی پیل، اختلاف دما و فشار بین ورودی وخروجی آند و کاتد، همراه بودن نیتروژن و دیگر گازهای موجود در هوا با اکسیژن صرف نظر شده است.



شکل۴. تغییرات ولتاژ پیل نسبت به تغییرات دمای کارکرد پیل سوختی



شکل۵ نمودار تغییرات ولتاژ پیل سوختی نسبت به تغییرات توان خروجی پیل سوختی را نشان میدهد، همان طور که از نمودار مشخص است ولتاژ پیل سوختی با توان خروجی آن رابطـه مسـتقیمی دارد. با توجه به این که چگالی جریان سرعت انتقال الکترون در واحد مساحت فعال پیل میباشد. شکل ۶ اثر شدت چگالی جریان بر توان تولیدی سیستم را نشان میدهد. هنگامی که فاکتور مصرف سوخت و فاکتور مصرف هوا و همچنین دمای عملیاتی پیل سوختی ثابت باشد، با افزایش چگالی جریان، تـوان پیل افزایش مییابد و به مقدار ماکزیممی میرسد. افزایش بیشـتر شـدت جریـان و نزدیـک شـدن بـه چگالی جریان حدی، بر اثر افزایش فراوان افتها، باعث کاهش ولتاژ و در نتیجه باعـث کـاهش تـوان پیل که سهم عمده در توان کلی پیل سوختی دارد، میشود. در نهایت توان کلی سیستم کاهش مییابد. همچنین در نقطه ای که چگالی جریان به مقدار چگالی جریان حدی میرسد، به دلیل افزایش میزان افت ولتاژ ناشی از غلظت و کاهش شدید ولتاژ عملکردی پیل، توان پیل سوختی مقدار صفر میشود.



شکل۶. تاثیر چگالی جریان بر توان تولیدی سیستم پیل سوختی اکسید جامد

I(A/m ²)	W _{Dc} (kw)	W _{Dctot} (kw)	WActot(kw)
•	•	•	•
1	۶۲.۱	71749.	195491
7	116.1	۳۶۴۳۸۵	٣٣۵٢٣۴
۳۰۰۰	167.6	422.10	444479
4	١٨١	572169	۵۲۷۲۹۷
۵۰۰۰	۵.۰۰۲	۶۳۵۰۵۵	014201
۶	۲۱۰.۳	888111	817722
٧٠٠٠	۸.۷۰۲	801.04	8.061.
λ	184.2	۵۸۳۲۸۹	036826

جدول ۸. تغییرات توان تولیدی مستقیم و متناوب پیل سوختی نسبت به چگالی جریانهای مختلف

شکل ۷، ۸ و ۹ به ترتیب اثر ضریب بهرهوری سوخت بر روی ولتاژ پایانی پیل سوختی، توان خروجی و بازده الکتریکی آن را نشان میدهد. همان طور که از نمودارها مشخص است با افزایش ضریب بهرموری سوخت در یک چگالی جریان مشخص ولتاژ پایانی پیل سوختی، توان خروجی و بازده الکتریکی تا یک مقدار ماکزیمم افزایش و سپس کاهش مییابد. باتوجه به نمودارها در چگالی جریانهای بالاتر با افـزایش ضریب بهرهوری سوخت، مقدر ماکزیمم ولتاژ پایانی پیل سوختی کاهش مییابد.



شکل۷. نمودار تاثیر ضریب بهرهوری بر روی ولتاژ پایانی پیل در چگالی جریان ۲۰۰۰

با افزایش دمای هوای ورودی پیل دمای گازهای داخل پیل افزایش مییابد ودر نتیجه میزان افتهای سلول کاهش مییابد که نتیجه کلی آن افزایش ولتاژ پایانی سلول سوختی است. که این نتایج در شکل۹ و جدول ۴ آمده شدهاند.



شکل ۸ و ۹. نمودار تغییرات توان خروجی پیل سوختی و بازده الکتریکی ان نسبت به ضریب بهرهوری سوخت

هرچقدر نرخ جریان جرم سوخت ورودی افزایش مییابد، احتمال اینکه سوخت یا واکنش دهندهها بهطور کامل به فراورده تبدیل نشوند بیشتر میشود، و این به معنی افزایش افتهای مختلف پیل سوختی به خصوص افت غلظتی است که نتیجه آن کاهش پتانسیل کلی پیل سوختی و متناسب با آن کاهش بازده الکتریکی پیل سوختی است. که این تاثیر در شکل ۱۰ مشخص است.



شکل ۱۰. تغییرات نرخ جریان جرم سوخت ورودی بر ولتاژ پایانی پیل سوختی و بازده الکتریکی آن

با افزایش دمای پیل سوختی به دلیل افزایش بازگشتناپذیری، میزان افت ولتاژ غلظتی افزایش و مقدار افتهای فعالسازی و اهمیک کاهش مییابد که این تغییرات را میتوان در نمودار شکل ۱۱ مشاهده نمود.



شکل۱۱. مقادیر تغییرات بازده نسبت به ضریب بهره وری

٥. نتيجه گيري

در این مقاله پیل سوختی اکسید جامد مدل سازی ریاضی انجام شد. نتایج حاصل از نمودارها نشان میدهند. که با افزایش ضریب بهرهوری سوخت مقدار توان خروجی، ولتاژ واقعی و همچنین بازده الکتریکی پیل سوختی افزایش یافته تا این که به یک مقدار بیشینه میرسد و از این نقطه به بعد افزایش مقدار این ضریب باعث کاهش این پارامترها می گردد. از این دادهها میتوان نتیجه گرفت که برای استفاده از پیلهای سوختی در سیستمها چند منظوره باید مقدار بهینه ضریب بهره وری سوخت انتخاب گردد. همچنین نتایج حاصل از نمودارها نشان میدهند که نباید مقدار دبی سوخت مصرفی بیشتر از مقدار ایدهال آن گردد، به دلیل این که افزایش بیش از حد مقدار سوخت مصرفی موجب افزایش افتهای غلظتی، اهمیک و فعال سازی می گردد که نتیجه کلی آن کاهش ولتاژ عملکردی و توان خروجی آن می گردد.

منابع

- [1] Akkaya A.V. (2007). "Electrochemical Model for Performance Analysis of a Tubular SOFC", *International Journal of Energy Research*, 31(1), pp. 79-98.
- [2] Al-Sulaiman F.A., Dincer I. and F. Hamdullahpur (2010). "Energy Analysis of a Trigeneration Plant Based on Solid Oxide Fuel Cell and Organic Rankine cycle". *International Journal of Hydrogen Energy*, 35(10), pp.5104-5113.
- [3] Bavarsad P.G. (2007). "Energy and Exergy Analysis of Internal Reforming Solid Oxide Fuel Cell–gas Turbine Hybrid System". *International Journal of Hydrogen Energy*, 32(17), pp. 4591-4599.
- [4] Buchinger G., Kraut J., Raab T., Griesser S., Lawlor V., Haiber J. and D. Meissner (2007). "Operating Micro-Tubular SOFCs Containing Nickel Based Anodes With Blends of Methane and Hydrogen. In Clean Electrical Power, 2007. ICCEP'07". International Conference on, IEEE. pp. 450-455
- [5] Campanari S. (2001). Thermodynamic Model and Parametric Analysis of a Tubular SOFC Module", *Journal of power sources*, 92(1), pp. 26-34.
- [6] Campanari S. and P. Iora (2004). Definition and Sensitivity Analysis of a Finite Volume SOFC Model for a Tubular Cell Geometry", *Journal of Power Sources*, 132(1), pp.113-126.
- [7] Campanari S. and P. Iora (2005). "Comparison of Finite Volume SOFC Models for the Simulation of a Planar Cell Geometry", *Fuel Cells*, 5(1), pp.34-51.

- [8] Chan S.H., Ho H.K. and Y. Tian (2002). Modelling of Simple Hybrid Solid Oxide Fuel Cell and Gas Turbine Power Plant", *Journal of Power Sources*, 109(1), pp.111-120.
- [9] Chan S.H., Khor K.A. and Z.T. Xia (2001). "a Complete Polarization Model of a Solid Oxide Fuel Cell and its Sensitivity to the Change of Cell Component Thickness", *Journal of Power Sources*, 93(1), pp. 130-140.
- [10] Colpan C.O., Dincer I. and F. Hamdullahpur (2007). "Thermodynamic Modeling of Direct Internal Reforming Solid Oxide Fuel Cells Operating with Syngas", *International Journal of Hydrogen Energy*, 32(7), pp.787-795.
- [11] Ghoenciu A.F. (2002). "Review of Fuel Processing Catalysts for Hydrogen Production in PEM Fuel Cell Systems", *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, 6(5), pp.389-399.
- [12] Handbook, F.C. (2004). EG&G Technical Services. Inc., Albuquerque, NM, DOE/NETL-2004/1206.
- [13] James L. and D. Andrew (2003). *Fuel Cell Systems Explained, Chichster*, John Wiley & Sons Ltd.
- [14] Larminie J., A. Dicks and M. S.McDonald (2003), *Fuel Cell Systems Explained*, vol. 2, New York, Wiley.
- [15] Larminie J., Dicks A. and M.S. McDonald (2003). *Fuel Cell Systems Explained*, Vol. 2, New York: Wiley.
- [16] Leal, E.M. and J.L. Silveira (2002). "Study of Fuel Cell Co-generation Systems Applied to a Dairy Industry", *Journal of Power Sources*, 106(1), pp.102-108.
- [17] Liu Y. and K.C. Leong (2006). "Numerical Study of an Internal-reforming Solid Oxide Fuel Cell and Adsorption Chiller Co-generation System". *Journal* of power sources, 159(1), pp.501-508.
- [18] Margalef P. and S. Samuelsen (2010). Integration of a Molten Carbonate Fuel Cell with a Direct Exhaust Absorption Chiller", *Journal of Power Sources*, 195(17), pp.5674-5685.
- [19]Rosen M.A. (1990). "Comparison based on Energy and Exergy Analyses of the Potential Cogeneration Efficiencies for Fuel Cells and Other Electricity Generation Devices". *International journal of hydrogen energy*, 15(4), pp.267-274.
- [20] Sameshima S., Furukawa N., Hirata Y. and T. Shimonosono (2014). "Cell Performance of SOFC Using CH 4–CO 2 mixed Gases", *Ceramics International*, 40(4), pp. 6279-6284.
- [21] Silveira J.L., Leal E. M. and L.F. Ragonha (2001). Analysis of a Molten Carbonate Fuel Cell: Cogeneration to Produce Electricity and Cold Water", *Energy*, 26(10), pp.891-904.
- [22] Singhal S.C. and K. Kendall (Eds.). (2003). "High-temperature Solid Oxide Fuel Cells: Fundamentals, Design and Applications: Fundamentals", *Design and Applications*. Elsevier.

- [23] Verda V. and M.C. Quaglia (2008). "Solid Oxide Fuel Cell Systems for Distributed Power Generation and Cogeneration", *International Journal of Hydrogen Energy*, 33(8), pp.2087-2096.
- [24] Weber C., Maréchal F., Favrat D. and S. Kraines (2006). Optimization of an SOFC-based Decentralized Polygeneration System for Providing Energy Services in an Office-building in Tökyö. *Applied Thermal Engineering*, 26(13), pp.1409-1419.
- [25] Yu Z., Han J. and X. Cao (2011), "Investigation on Performance of an Integrated Solid Oxide Fuel Cell and Absorption Chiller Tri-generation System", *International Journal of Hydrogen Energy*, 36(19), pp.12561-12573.
- [26] Yu Z., Han J., Cao X., Chen W. and B. Zhang (2010), Analysis of Total Energy System based on Solid Oxide Fuel Cell for Combined Cooling and Power Applications", *international journal of hydrogen energy*, 35(7), pp.2703-2707.