فصلنامه علمی – ترویجی «نشریه انرژی ایران»
دوره ۲۱، شماره ۱، بهار ۱۳۹۷، صفحه ۱۶۶-۱۴۳

مدل سازی عملکرد و مطالعه پارامتری سیستم پیل سوختی اکسید جامد

[۱]یاور خالدیان*، [۲]روناک دقیق

چکیده

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 پیل سوختی تشریح ومدل سازی شده است و برای پیل سوختی به کار گرفته شده یک تحلیل الکتروشیمیایی مجزا انجـام شـده اسـت. آثـار پارامترهـای مختلف بر راندمان پیل، مورد مطالعه قـرار گرفتـه اسـت. در ادامـه مطالعـه پارامتری سیستم اشاره شده، تاثیر دما، فشار کاری پیل و همچنـین نسـبت نرخ جریان هوا به سوخت ورودی به پیل سوختی بر روی بازده و توان صورت گرفته است. نتایج نشانگر افزایش بازده پیل سوختی و توان خروجی آن در اثر افزایش ضریب بهره‌وری سوخت، چگالی جریان و ولتاژ واقعی پیـل سـوختی است که مقدار بهینه ضریب بهره‌وری ۰.۷ و چگالی جریان ۷۰۳۰ آمپر بر متر مربع می‌باشد. همچنین محاسبات کامل روابط مربوط به پیل سوختی اکسید 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.

تاریخ دریافت:
۱۳۹۵/۲/۳

تاریخ پذیرش:
۱۳۹۵/۵/۱۹

کلمات کلیدی:
انرژی تجدیدپذیر،
پیل سوختی اکسید جامد،
افت ولتاژ،
ولتاژ واقعی،
ضریب بهره‌وری،
توان

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد تبدیل انرژی، دانشگاه کردستان (نویسنده مسئول) mechanic.yavar@yahoo.com
۲. گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه کردستان r.daghigh@uok.ac.ir ; daghighm@gmail.com

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-20]

۱. مقدمه

در حال حاضر با توجه به بحران انرژی، محدودیت سوخت‌های فسیلی و تجدید ناپذیربودن آن‌ها و مشکلات ناشی از آلودگی‌های این نوع سوخت‌ها، استفاده از منابع جدید انرژی و تجدیدپذیر بیش 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 ناشی از احتراق سوخت‌های فسیلی می‌گردد. در سال‌های اخیر، پیل سوختی، یکی از پر بازده‌ترین منابع تولید انرژی بوده است. پیل‌های 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 می‌کنند. تولید مستقیم الکتریسیته جایگزینی برای چرخه کارنو جهت تبدیل انرژی شیمیایی حاصل از سوخت به انرژی گرمایی و مکانیکی و در نهایت الکتریسیته می‌باشد که اتلاف انرژی را به حداقل ممکن می‌رساند و به بازده تئوری دست پیدا می‌کنیم. در واقع پیل سوختی یک دستگاه الکتروشیمیایی است که طی واکنش بین هیدروژن و اکسیژن، الکتریسیته و گرما تولید می‌کند. از جمله مزایای مهم این فناوری نوین می‌توان به مواردی از جمله: پاک بودن، کارکرد بی‌صدا، عدم انتشار گازهای گلخانه‌ای، مدولار بودن، بهره‌برداری راحت، ایمنی، هزینه نصب و تعمیر و نگه‌داری پایین، عدم وجود اجزای متحرک، امکان اتصال به سیستم‌های مختلف از جمله میکرو توربین‌ها و ...، امکان استفاده در نقاط دور شبکه اشاره کرد [۱۹،۱۵،۲، ۲۵،۲۳،۲۲]. سازه و بدنه اصلی پیل سوختی از الکترولیت، الکترود آند و الکترود کاتد تشکیل شده است. واکنش‌هایی که تولید الکتریسیته می‌کنند، در الکترودها اتفاق می‌افتند. همچنین هر پیل سوختی یک الکترولیت دارد که ذرات دارای بار الکتریکی را از یک الکترود به الکترود دیگر منتقل می‌کند و یک کاتالیست که انجام واکنش در الکترودها را تسریع می‌کند[۱۱]. هیدروژن سوخت اصلی است ولی پیل‌های 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 بالای گاز 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

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-20]

۶۰۰ تا ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد است و به همین دلیل از انواع سوخت‌ها در آن می‌توان استفاده نمود[۱۴]. این پیل سوختی دو ساختار صفحه‌ای و لوله‌ای دارد و از الکترولیت جامد سرامیکی نازکی به جای الکترولیت مایع استفاده می‌شود. در دمای عملکرد بالا در پیل سوختی اکسید جامد یون‌های اکسیژن (با بار منفی) از شبکه کریستالی (عموماً ترکیبی از اکسید زیرکونیم و اکسید کلسیم) عبور می‌کنند. در کاتد مولکول‌های اکسیژن هوا با چهار الکترون ترکیب می‌شوند. وقتی یک سوخت گازی حاوی هیدروژن از آند عبور کند، یک جریان شارژ شده منفی شامل یون‌های اکسیژن از الکترولیت عبور می‌کند تا سوخت را اکسید کند. الکترون‌های ایجاد شده در آند، از یک مدار خارجی عبور می‌کنند و به کاتد می‌روند با این کار مدار الکتریکی کامل شده و انرژی برق تولید می‌شود. بازدهی پیل‌های سوختی اکسید جامد در حدود ۴۵ تا ۶۰ درصد و میزان دانسیته تولیدی در این نوع از پیل‌ها ۲۴۰ تا ۳۰۰ آمپر 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 پیل‌های سوختی اکسید جامد و ترکیب آن با سیستم‌های چند منظوره انجام گرفته است. که می‌توان به تحقیق سامیشیما و همکاران[۲۰] اشاره کرد که در این تحقیق اثر متان را بر روی خصوصیات سل (پیل سوختی) و مقدار کربن تولیدی در ترکیب گاز CH_4-CO_2 مورد بررسی قرار داده بودند و به این نتیجه رسیده بودند که افزایش غلظت متان در ترکیب گاز CH_4-CO_2 منجر به افزایش ولتاژ سل می‌شد. بوچینگر و همکاران[۴] تأثیر افزایش غلظت CH_4 در H_2 بر روی عملکرد سل پیل سوختی و میزان پایداری آن ارزیابی کردند، که نشان داده بودند افزایش غلظت متان موجب کاهش ولتاژ سل می‌شود. یو و همکاران[۱۶،۱۷،۱۸،۲۱،۲۶] پیل سوختی اکسید جامد را برای سیستم‌های تولید همزمان تحت شرایط عملکردی و پارامترهای طراحی مختلف مورد ارزیابی و با استفاده از نرم‌افزار متلب آن را شبیه سازی کرده بودند. لونگ[۱۷] سیستم ترکیبی پیل سوختی اکسید جامد با چیلر جذبی 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

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-20]

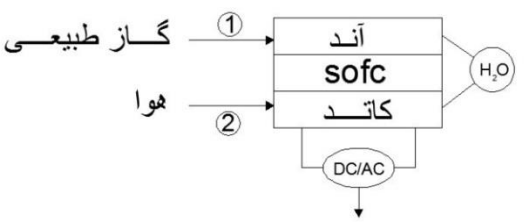
جریان، دماهای مختلف پیل، نرخ جریان سوخت ورودی و دمای هوای ورودی بر روی ولتاژ واقعی پیل سوختی مورد بررسی قرار گرفته شده است، همچنین تـأثیر ضـریب بهـره‌وری سـوخت بـر روی بـازده الکتریکی پیل سوختی و تأثیر این ضریب در چگالی جریان‌های مختلف بر روی ولتاژ پیل سوختی مورد بررسی قرار گرفت. در این سیستم هوای گرم شده وارد کاتد پیـل سـوختی مـی‌شـود. از طـرف دیگـر، سوخت وارد آند پیل سوختی می‌شود. پس از انجـام واکـنش الکتروشـیمیایی درون پیل سوختی و تولید توان، محصولات بـا دمـای بـالا تولید می‌کند.

۲. مدل‌سازی پیل سوختی اکسید جامد (SOFC)

فرضیات کلی سیستم

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.
- ولتاژ در زیر توده‌های پیل سوختی ثابت فرض شده است.



شکل ۱. اجزای پیل سوختی، ورودی و خروجی‌های آن

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-20]

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]:

$$CH_4 + H_2O \rightarrow CO + 3H_2 \quad (۱)$$

$$CO + H_2O \rightarrow CO_2 + H_2 \quad (۲)$$

که این دو واکنش به ترتیب واکنش دگرگونی۱ و بهسازی۲ نامیده می‌شوند. طبق واکنش‌های بالا گاز طبیعی متان در داخل پیل سوختی به هیدروژن تبدیل شده و سپس طبق واکنش‌های زیر در واکنش‌های پیل سوختی شرکت می‌کند واکنش‌های الکتروشیمیایی در آند وکاتد بر اساس رابطه‌های زیر رخ می‌دهد[۱۸و ۱۹]:

$$\frac{1}{2}O_2 + 2e^- \rightarrow O^{2-} \quad \text{واکنش کاتد} \quad (۳)$$

$$H_2 + O^{2-} \rightarrow H_2O + 2e^- \quad \text{واکنش آند} \quad (۴)$$

$$H_2 + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow H_2O \quad \text{واکنش کلی} \quad (۵)$$

1. reforming
2. shifting

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-20]

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

$$x \rightarrow (CH_4 + H_2O \rightarrow CO + 3H_2) \quad (۶)$$

$$y \rightarrow (CO + H_2O \rightarrow CO_2 + H_2) \quad (۷)$$

$$z \rightarrow (H_2 + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow H_2O) \quad (۸)$$

در رابطه‌های بالا، x وy وz 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:

$$[\dot{n_{CH_4}}]_{out} = [\dot{n_{CH_4}}]_{in} - x \quad (۹)$$

$$[\dot{n_{H_2O}}]_{out} = [\dot{n_{H_2O}}]_{in} - x - y + z \quad (۱۰)$$

$$[\dot{n_{H_2}}]_{out} = [\dot{n_{H_2}}]_{in} + 3x + y - z \quad (۱۱)$$

$$[\dot{n_{CO}}]_{out} = [\dot{n_{CO}}]_{in} + x - y \quad (۱۲)$$

$$[\dot{n_{CO_2}}]_{out} = [\dot{n_{CO_2}}]_{in} + y \quad (۱۳)$$

$$[\dot{n_{tot}}]_{out} = [\dot{n_{tot}}]_{in} + 2 \quad (۱۴)$$

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

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

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-20]

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

$$k_{pr} = \frac{([n_{CO}^{\cdot}]_{in} + x - y)([n_{H_2}^{\cdot}]_{in} + 3x + y - z)^3}{([n_{CH_4}^{\cdot}]_{in} - x)([n_{H_2O}^{\cdot}]_{in} - x - y + z)} p_{cell} \quad (۱۶)$$

$$k_{ps} = \frac{\left([n_{H_2}^{\cdot}]_{in} + 3x + y - z\right)\left([n_{CO_2}^{\cdot}]_{in} + y\right)}{([n_{CO}^{\cdot}]_{in} + x - y)\left([n_{H_2O}^{\cdot}]_{in} - x - y + z\right)} \; z \quad (۱۷)$$

$$= u_f \begin{pmatrix} 3x + y \\ +n_{H2O}^{in} \end{pmatrix} \quad (۱۸)$$

جدول۱: داده‌های ورودی سوخت و هوای مصرفی

حالت	دما (C)	نرخ جریان(Kg/s)	درصد مولی سوخت‌های ورودی(٪)						
			CH_4	H_2O	H_2	CO_2	CO	N_2	O_2
۱	۷۴۵	۰.۱۸۰۶	۱۳.۰۶	۱۸.۰۷	۲۸.۶۴	۲۲.۸۶	۱۶.۴۸	۸.۸۹	–
۲	۸۰۰	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 بـه صورت یک تابع چنـد جمله‌ای و بـه صورت زیر بیان می‌شود:

$$log\, k_p = AT^4 + BT^3 + CT^2 + DT^1 + E \quad (۱۹)$$

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

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-20]

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

پارامتر	مقدار
A_r	$-2{,}63121 * 10^{-11}$
B_r	$1{,}24065 * 10^{-7}$
C_r	$-2{,}25232 * 10^{-4}$
D_r	$1{,}95028 * 10^{-1}$
E_r	$-6{,}61395 * 10^{1}$
A_s	$5{,}47301 * 10^{-12}$
B_s	$-2{,}57479 * 10^{-8}$
C_s	$4{,}63742 * 10^{-5}$
D_s	$-3.915 * 10^{-2}$
E_s	$1{,}32097 * 10^{1}$
u_f	0.85

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

$$E_{re} = \frac{-\Delta G^{\circ}}{nF} + \frac{R_g T}{2F} Ln \frac{P_{H2} P_{O2}^{1/2}}{P_{H2O}} \quad (۲۰)$$

که E_{re} بیشینه ولتاژ تئوری است که ولتاژ مدار باز نامیده می‌شود و ولتاژ پیل برابر آن خواهد بود. زمانی که هیچ جریانی در مدار نباشد همان طور که دیده می‌شود با افزایش غلظت واکنش‌دهنده‌ها، بیشینه ولتاژ پیل افزایش می‌یابد.

یا این که طبق رابطه زیر به دست می‌آید:

$$E_{re} = -\frac{\Delta G}{nF} = -\frac{\Delta G}{n_{\circ} \times 4 \times 96.487}(V) \quad (۲۱)$$

$$\Delta G = \Delta H_{\circ} - \frac{T}{T_{\circ}(\Delta H_{\circ} - \Delta G_{\circ})} - \Delta c_p T \left[Ln\left(\frac{T}{T_{\circ}}\right) + \left(\frac{T_{\circ}}{T} - 1\right)\right] \quad (۲۲)$$

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-20]

که در این رابطه n_0 تعداد مول اکسیژن در هر مول سوخت، Δc_p تغییرات گرمای ویـژه واکـنش کلـی، ΔH_0 تغییرات آنتالپی درحالت استاندارد، ΔG_0 تغییرات انرژی آزاد گیبس در حالت استاندارد، F فارادی یا تعداد کولن در هر مول سوخت، T_0 دمای حالت استاندارد، T دمای کاری پیل سوختی و P_{H2} فشارهای جزئی گازها می‌باشند.

جدول ۳. داده‌های ورودی برای ولتاژ بیشینه پیل سوختی

پارامتر	مقدار
تعداد مول اکسیژن در هر مول سوخت n_0	۰.۵
دمای حالت استاندارد T_0 (K)	۲۹۸
دمای کاری پیل سوختی T (K)	۱۲۷۳

ولتاژ عملکرد پیل سوختی اکسید جامد

وقتی پیل سوختی تحت شرایط عملکردی تولید جریـان خـارجی کار می‌کند، مقداری افت ولتاژ در پیل اتفاق می‌افتد که باعث می‌شـود ولتاژ خروجی پیل همیشه کمتر از مقدار بیشینه ولتاژ باشد. افت‌ها کـه پلاریزاسیون نامیده می‌شوند معمولا عبارتند از:

۱) پلاریزاسیون فعال‌سازی Vact

۲) پلاریزاسیون اهمی Vohm

۳) پلاریزاسیون غلظت Vcon

بنابراین ولتاژ اندازه‌گیری شده در یک پیل سوختی عملی معمولا از ولتاژ برگشت‌پذیر کمتر اسـت. ولتـاژ عملکـرد پیـل سـوختی به صورت زیر تعیین می‌شود[۱۲]:

$$V_{out} = E_{re} - V_{act} - V_{ohm} - V_{conc} \qquad (۲۳)$$

در رابطه بالا افت ولتاژهـا معمولا به فشار جزئی گازها، دما و چگالی جریان در یک پیل سوختی واقعی بستگی دارد. در ادامـه بـه محاسـبه افت ولتاژ در پیل سوختی پرداخته می‌شود.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-20]

پلاریزاسیون فعال‌سازی

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 نیمه‌تجربی باتلر ـولمر به صورت زیر بیان می‌شود[۶،۷،۹،۱۰]:

$$I = I_O \left[\exp\left(\frac{V_{act}.\alpha.F.ne}{R_g T}\right) - \exp\left(-\frac{V_{act}.F.ne.(1-\alpha)}{R_g T}\right)\right] \quad (۲۴)$$

که I چگالی جریان الکتریکی است و واحد آن A/m می‌باشد. از رابطه بالا نمی‌توان به صورت مستقیم V_{act} را به دست آورد، اما برای پیل‌های سوختی با الکترود هیدروژن مقدار α برابر ۰.۵ فرض می‌شود و در نتیجه معادله ساده می‌شود:

$$V_{act} = \frac{2R_g T}{neF} \sinh^{-1}\left(\frac{I}{2I_o}\right) \quad (۲۵)$$

$$I_{o,c} = \gamma_c.\left(\frac{P_{O2}}{P_{atm}}\right)^{m_1}.exp\left(-\frac{E_{act.c}}{R_g T}\right)^{m_2} \quad (۲۶)$$

$$I_{o,A} = \gamma_A.\left(\frac{P_{H2}}{P_{atm}}\right)\left(\frac{P_{H2O}}{P_{atm}}\right).exp\left(-\frac{E_{act.A}}{R_g T}\right)^{m_3} \quad (۲۷)$$

که γ_c و γ_A پارامترهایی هستند که به جنس کاتد و آند بستگی دارند و E مقدار انرژی فعال‌سازی آند وکاتد است. R_g ثابت عمومی گازها و m_iها ضرایب ثابت هستند.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-20]

جدول ۴. مقادیر پارامترهای ورودی برای محاسبه پلاریزاسیون فعالسازی

پارامتر	مقدار
ضریب γ_c (A/m^2)	$1.149 * 10^{10}$
ضریب γ_A (A/m^2)	$2.13 * 10^8$
ضریب m_1	۰.۲۵
ضریب m_2	۱
ضریب m_3	۱
α	۰.۵
ne	۲
انرژی فعالسازی آند $E_{act,a}$ (j/mol)	۱۱۰۰۰۰
انرژی فعالسازی آند $E_{act,c}$ (j/mol)	۱۲۰۰۰۰
ثابت فارادی F (کولن/mol)	۹۶۴۸۷
فشار اتمسفر p_{atm} (pa)	$1,01 * 10^5$
ثابت عمومی گازها R_g (j/mol.k)	۸.۳۱۴

پلاریزاسیون اهمی

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 می‌یابد. تلفات اهمی به شدت تابع دماست. به خصوص در مورد الکترولیت که بخش عمده‌ای از تلفات سلول در این بخش اتفاق می‌افتد پلاریزاسیون اهمی برای آند، کاتد و الکترولیت متصل کننده داخلی به صورت زیر خواهد بود [۵،۷،۹،۱۰]:

$$V_{ohm} = \left(\sum \rho_k L_k\right) I \qquad (۲۸)$$

که ρ_k مقاومت ویژه (اهم) اجزاء پیل سوختی و L_k (متر) ضخامت یا اندازه اجزاء هستند.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-20]

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

پارامتر	مقدار
مقاومت ویژه ماده آند (اهم) (Ni-YSZ)	$\rho_A = 0.00008114\exp\left(\frac{600}{T}\right)$
مقاومت ویژه ماده کاتد (اهم) (LSM)	$\rho_C = 0.0000298\exp\left(\frac{-1392}{T}\right)$
مقاومت ویژه ماده الکترولیت (اهم) (YSZ)	$\rho_{el} = 0.0000294\exp\left(\frac{10350}{T}\right)$
مقاومت ویژه ماده اتصال داخلی(اهم) ($LaCr\ O_3$)	$\rho_{int} = 0.001256\exp\left(\frac{4690}{T}\right)$
ضخامت آند(m)	۰.۰۰۰۱
ضخامت کاتد(m)	۰.۰۰۲۲
ضخامت الکترولیت(m)	۰.۰۰۰۰۴۰
ضخامت اتصال داخلی(m)	۰.۰۰۰۰۸۵

پلاریزاسیون غلظتی

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 واکنشگرهای 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 می‌شود. 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 رابطهٔ زیر بیان می‌شود [۱]:

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-20]

$$V_{con} = \frac{R_g T}{n_e F} Ln\left(1 - \frac{I}{i_L}\right) \quad (۲۹)$$

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 ۹۰۰ A/m^2 استفاده شده است [۱].

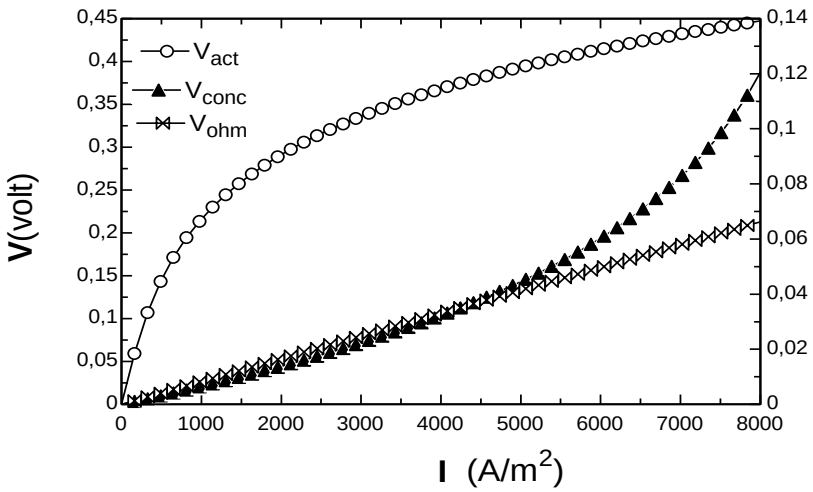
۳. روش شناسی تحقیق

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، یک پیل سوختی با ابعاد متناسب مدل سازی شده است. با توجه به واکنش‌های الکتروشیمیایی انجام شده در پیل، مقدار سوخت‌های ورودی برای واکنش‌ها در الکترود آند و کاتد و واکنش کلی تعیین شده، تا از روی این پارامترها بتوان مقدار فشار جزئی هر کدام از سوخت‌های مصرفی در پیل را به دست آورد. برای بررسی ولتاژ انتقالی پیل از معادله 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 از مقدار ولتاژ تئوری کم شده‌اند تا ولتاژ واقعی پیل به دست آید. پارامترهای توان الکتریکی و بازده حرارتی نیز باتوجه به تعاریف خاص آن‌ها مورد بررسی قرارگرفته شده‌اند.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-20]

٤. نتایج و بحث

شکل۲ مقایسه ای بین پلاریزاسیون اهمی، فعال‌سازی و غلظت در پیل سوختی اکسید جامد مـی‌باشـد. همان‌طور که از شکل پیداست، در چگالی جریان‌های پایین افت ولتاژ غالـب مربـوط بـه فعـال سـازی است. با زیاد شدن جریان و مقاومت اهمی، افت ولتاژ به دلیل این که هیدروژن به اندازه کافی نمی‌تواند در الکترود واکنش دهد، بیشتر می‌شود. شکل لگاریتمی افت ولتاژ غلظت، باعـث خـم شـدن نمـودار در چگالی جریان بالاتر می‌شود. در نمودار شکل ۲ اهمیت هر یک از افت ولتاژها و تـأثیری کـه بـر ولتـاژ کلی می‌گذاردند، نشان داده شده است. همچنین جدول ۷ 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

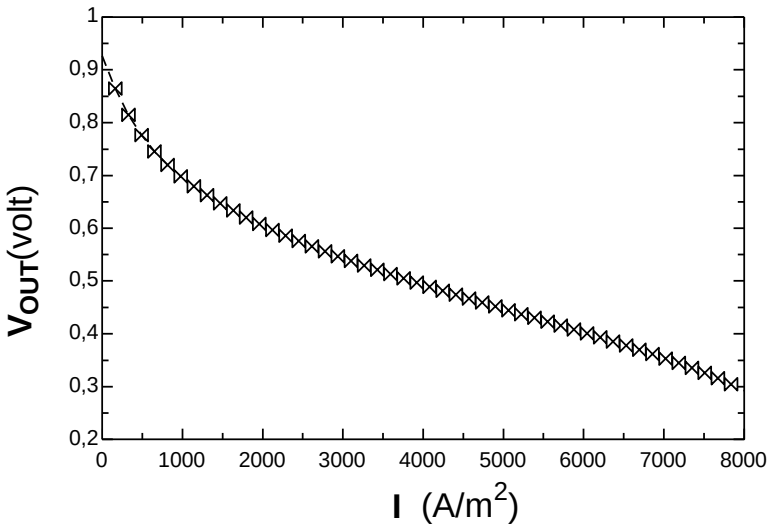
[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-20]

جدول ۷. افت ولتاژهای پیل سوختی نسبت به چگالی جریان

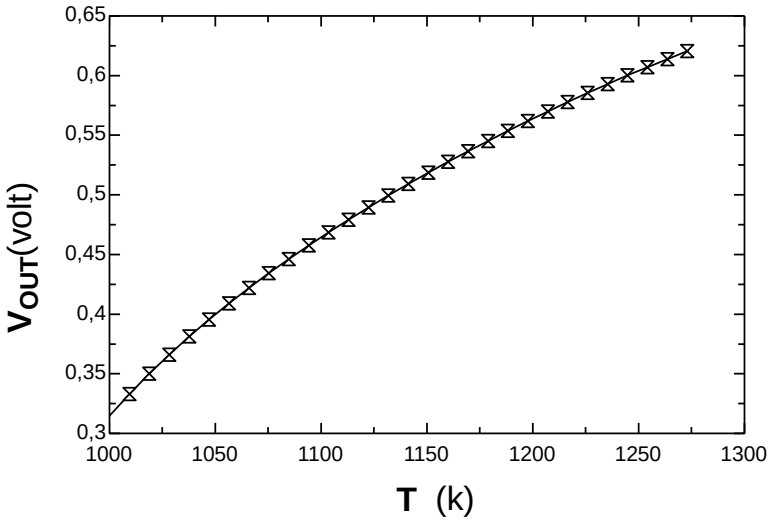
$I(A/m^2)$	$V_{act}(v)$	$V_{conc}(v)$	$V_{ohm}(v)$
۰	۰	۰	۰
۱۰۰۰	۰.۲۱۶	۰.۰۰۶۴۶	۰.۰۰۸۲۷۹
۲۰۰۰	۰.۲۹۱۲	۰.۰۱۳۸۷	۰.۰۱۶۵۶
۳۰۰۰	۰.۳۳۶۱	۰.۰۲۲۲۴	۰.۰۲۴۸۴
۴۰۰۰	۰.۳۶۸۴	۰.۰۳۲۲۴	۰.۰۳۳۱۲
۵۰۰۰	۰.۳۹۳۶	۰.۰۴۴۴۸	۰.۰۴۱۴
۶۰۰۰	۰.۴۱۴۴	۰.۰۶۰۲۵	۰.۰۴۹۶۸
۷۰۰۰	۰.۴۳۲۱	۰.۰۸۲۴۹	۰.۰۵۷۹۶
۸۰۰۰	۰.۴۴۷۵	۰.۱۲۰۵	۰.۰۶۶۲۳

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 پیچیده‌ای است. مدل سازی هر کدام از افت‌ها خود نیازمند در نظر گرفتن رفتارهای مولکولی اجزای واکنش دهنده می‌باشد. همچنین در مدلی که در تحقیق در نظر گرفته شده، همانند مدل‌های قبلی، از 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.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-20]

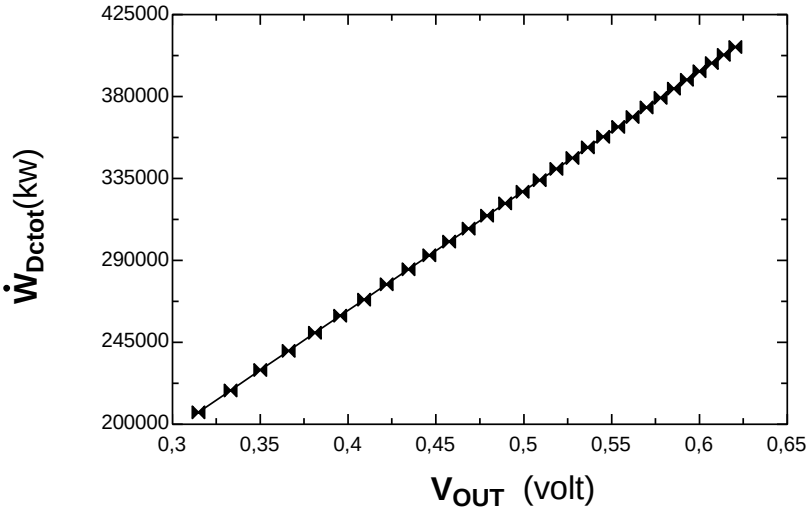


شکل۳. تغییرات ولتاژ پیل نسبت چگالی جریان در دمای ۱۲۷۳ درجه سانتی گراد



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

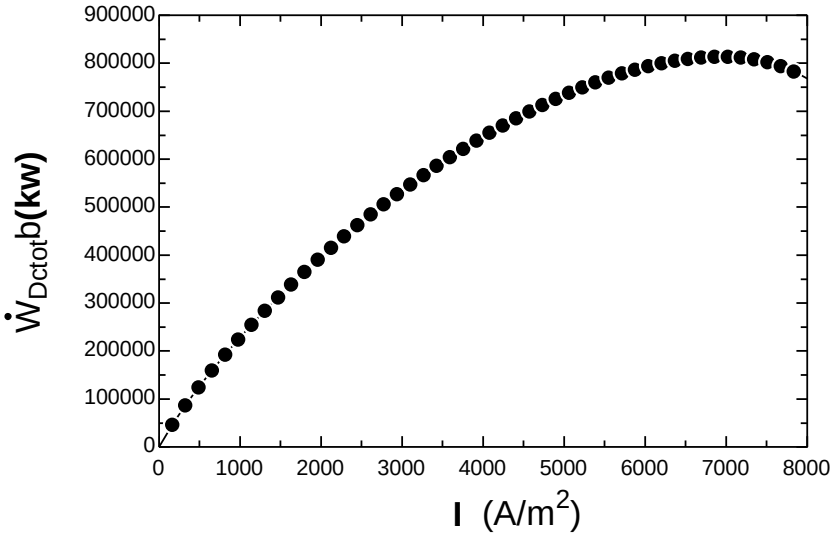
[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-20]



شکل۵. تغییرات ولتاژ واقعی پل سوختی نسبت به توان خروجی پیل

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 رابطه مستقیمی 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، توان پیل افزایش می‌یابد و به مقدار ماکزیممی می‌رسد. افزایش بیشتر شدت جریان و نزدیک شدن به چگالی جریان حدی، بر اثر افزایش فراوان افت‌ها، باعث کاهش ولتاژ و در نتیجه باعث کاهش توان پیل که سهم عمده در توان کلی پیل سوختی دارد، می‌شود. در نهایت توان کلی سیستم کاهش می‌یابد. همچنین در نقطه‌ای 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.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-20]



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

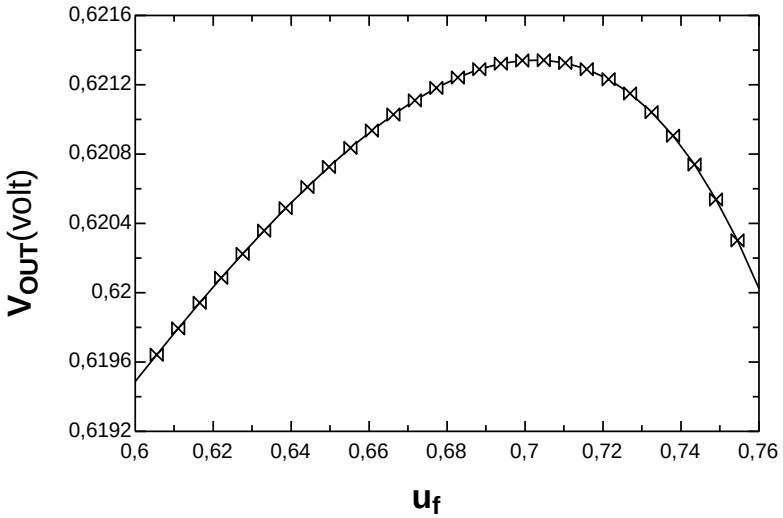
جدول ۸. تغییرات توان تولیدی مستقیم و متناوب پیل سوختی نسبت به چگالی جریان‌های مختلف

I(A/m^2)	W_{Dc}(kw)	W_{Dctot}(kw)	W_{Actot}(kw)
۰	۰	۰	۰
۱۰۰۰	۶۷.۱	۲۱۲۴۹۰	۱۹۵۴۹۱
۲۰۰۰	۱۱۵.۱	۳۶۴۳۸۵	۳۳۵۲۳۴
۳۰۰۰	۱۵۲.۵	۴۸۳۰۷۵	۴۴۴۴۲۹
۴۰۰۰	۱۸۱	۵۷۳۱۴۹	۵۲۷۲۹۷
۵۰۰۰	۲۰۰.۵	۶۳۵۰۵۵	۵۸۴۲۵۱
۶۰۰۰	۲۱۰.۳	۶۶۶۱۱۱	۶۱۲۸۲۲
۷۰۰۰	۲۰۷.۸	۶۵۸۰۵۴	۶۰۵۴۱۰
۸۰۰۰	۱۸۴.۲	۵۸۳۲۸۹	۵۳۶۶۲۶

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 بهره‌وری سوخت در یک چگالی جریان مشخص ولتاژ پایانی پیل سوختی، توان خروجی و بازده الکتریکی تا یک

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-20]

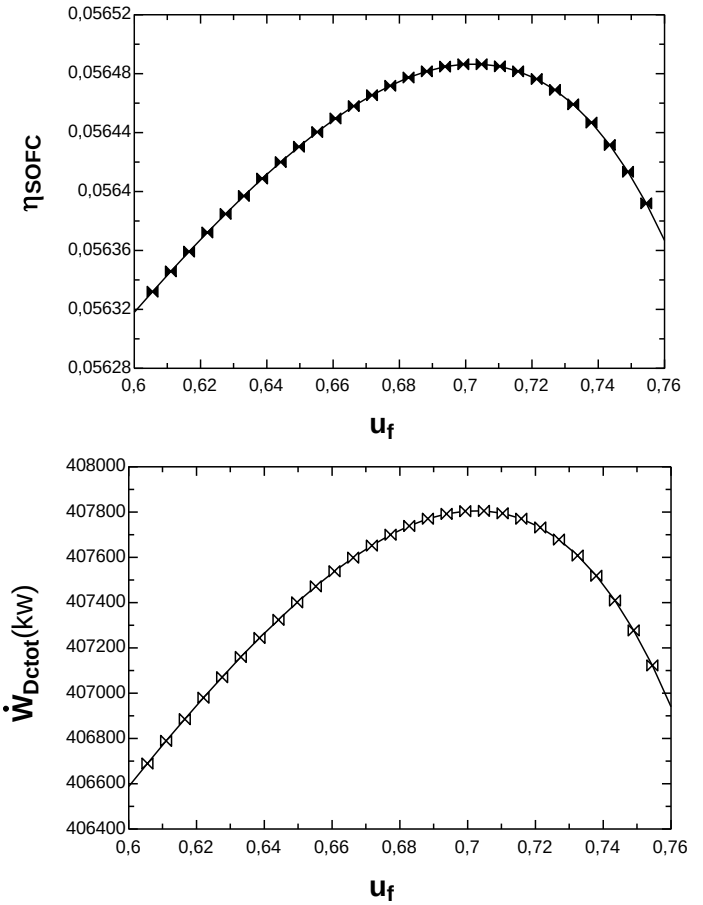
مقدار ماکزیمم افزایش و سپس کاهش می‌یابد. باتوجه به نمودارها در چگالی جریان‌های بالاتر با افـزایش ضریب بهره‌وری سوخت، مقدر ماکزیمم ولتاژ پایانی پیل سوختی کاهش می‌یابد.



شکل۷. نمودار تاثیر ضریب بهره‌وری بر روی ولتاژ پایانی پیل در چگالی جریان۲۰۰۰

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

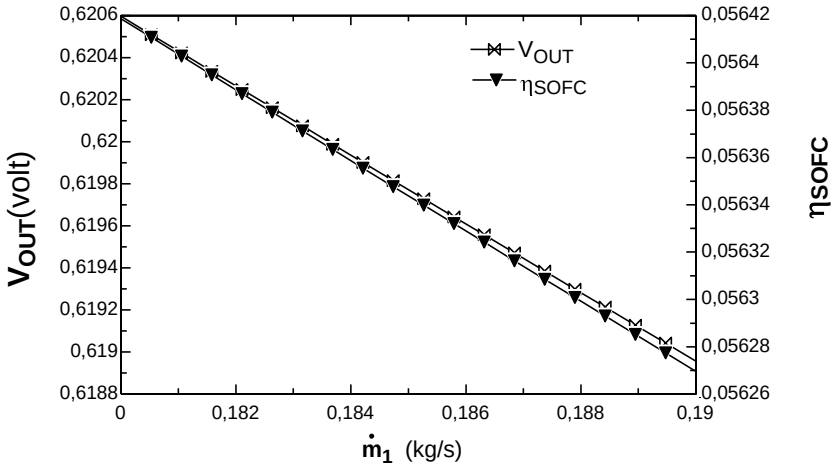
[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-20]



شکل۸ و ۹. نمودار تغییرات توان خروجی پیل سوختی و بازده الکتریکی ان نسبت به ضریب بهره‌وری سوخت

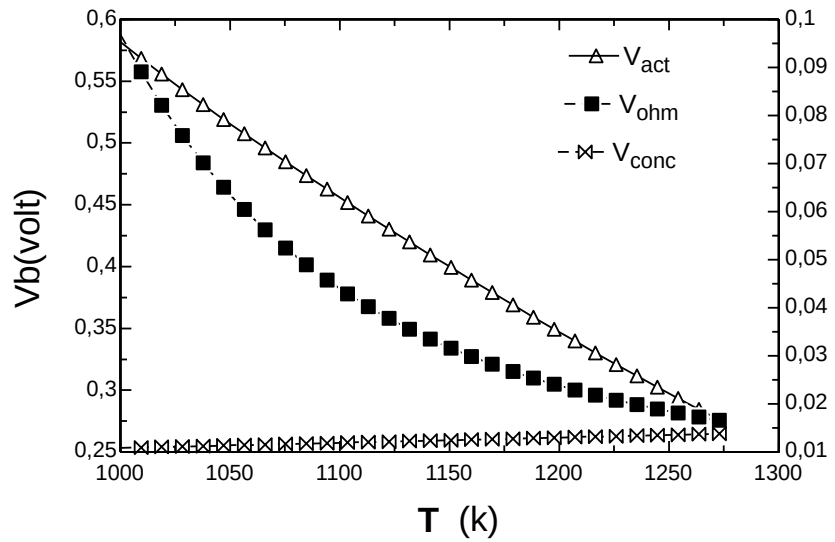
هرچقدر نرخ جریان جرم سوخت ورودی افزایش می‌یابد، احتمال اینکه سوخت یا واکنش دهنده‌ها به‌طور کامل به فراورده تبدیل نشوند بیشتر می‌شود، و این به معنی افزایش افت‌های مختلف پیل سوختی به خصوص افت غلظتی است که نتیجه آن کاهش پتانسیل کلی پیل سوختی و متناسب با آن کاهش بازده الکتریکی پیل سوختی است. که این تاثیر در شکل۱۰ مشخص است.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-20]



شکل۱۰. 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 افـزایش و مقدار افت‌های فعالسازی و اهمیک کاهش می‌یابد که این تغییـرات را مـی‌تـوان در نمـودار شـکل ۱۱ مشاهده نمود.



شکل۱۱. مقادیر تغییرات بازده نسبت به ضریب بهره وری

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-20]

۵. نتیجه‌گیری

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 می‌گردد. 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 می‌گردد که نتیجه کلی آن کاهش ولتاژ عملکردی و توان خروجی آن می‌گردد.

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.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-20]

[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.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-20]

[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 Tōkyō. *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.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-20]