

آنالیز حساسیت و بهبود عملکرد پیل سوختی غشا پلیمری

مهرداد قصبه‌ای و مهرزاد شمس*

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۷/۷ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۹/۱۸

چکیده

با افزایش آلودگی زیست‌محیطی استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر اهمیت بالایی پیدا کرده است. پیل سوختی غشا پلیمری، یکی از روش‌های تولید انرژی تجدیدپذیر است که به دلیل بسیاری از مزایای آن، مانند انتشار کم آلودگی و راندمان بالا، در طیف وسیعی از زمینه‌ها به کار رفته است. در پیل سوختی، ابعاد اجزاء نقش مهمی در عملکرد آن دارد. در این پژوهش، حل عددی در حالت پایا، سه‌بعدی، دوفاز و دما ثابت انجام شد. اثر ابعاد سطح مقطع کانال، ضخامت غشا، ضخامت لایه نفوذ گاز، ضخامت لایه کاتالیست و اندازه شانه کانال بر عملکرد پیل سوختی غشا پلیمری مطالعه گردید. این آنالیز شامل مطالعه دو شاخص حداکثر چگالی توان و میانگین چگالی جریان است که در طیف وسیعی از ولتاژهای عملیاتی بررسی می‌گردد. نتایج نشان می‌دهد که تعیین ابعاد مناسب برای اجزاء پیل، تأثیر زیادی بر بهبود عملکرد می‌گذارد. با مقایسه اثر ابعاد بر روی این شاخص‌ها، رتبه‌بندی متفاوتی به دست می‌آید. کاهش عرض کانال و ضخامت غشا پلیمری بیش‌ترین نقش را در تعیین عملکرد پیل دارد. تطابق خوبی بین نتایج شبیه‌سازی عددی و داده‌های تجربی حاصل گردید.

کلمات کلیدی: پیل سوختی غشا پلیمری، چگالی توان، چگالی جریان، آنالیز حساسیت، مدیریت آب

مقدمه

می‌شود [۱]. پیل سوختی یک فناوری بدون آلودگی زیست‌محیطی برای تولید انرژی است. با این حال، نیاز به بهبود بیشتر برای استفاده تجاری دارد. از این رو، طی سال‌های اخیر پژوهش‌های متعددی حول این موضوع صورت گرفته است. در مطالعه اشرفی و همکاران [۲] پویایی قطرات در میدان جریان با کانال‌های مستقیم و مارپیچ، مورد بررسی قرار گرفت و کانال‌های شیب‌دار و پخ‌دار به ترتیب برای میدان جریان مستقیم و مارپیچ به منظور بهبود حذف آب در کانال‌ها پیشنهاد شدند. در مطالعه بااو و همکاران [۳] مدلی از میدان جریان

امروزه با توجه به محدودیت سوخت‌های فسیلی و همچنین افزایش آلودگی زیست محیط ناشی از مصرف آن‌ها، نیاز به یک منبع انرژی جایگزین بیش از پیش مورد توجه قرار گرفته است. پیل سوختی غشا پلیمری وسیله‌ای الکتروشیمیایی است که در آن انرژی شیمیایی واکنش دهنده‌ها به صورت مستقیم به انرژی الکتریکی تبدیل

*مسئول مکاتبات

آدرس الکترونیکی shams@kntu.ac.ir

شناسه دیجیتال: (DOI: 10.22078/pr.2020.3945.2799)

تایماز [۱۱] یک پیل با میدان‌های جریان مارپیچ برای بررسی عملکرد ایجاد شد. نتایج نشان داد که حداکثر چگالی توان با تخلخل ۰/۶ لایه نفوذ گاز، رطوبت نسبی ۰/۱۰، سمت آند و ۰/۱۰۰ سمت کاتد و فشار عملیاتی ۳ atm به دست می‌آید. در مقاله‌ای، کین و همکاران [۱۲] یک پیل را به صورت عددی مورد بررسی قرار دادند و توان لازم برای جبران افت فشار پیل با توجه به مشخصات یک کمپرسور واقعی مطالعه شد. نتایج این مطالعه نشان داد که توان پیل سوختی و توان مورد نیاز کمپرسور با فشار کارکرد سیستم افزایش می‌یابد. در این مطالعه، فشار بهینه ۱/۲ atm معرفی شد. ونگ و همکاران [۱۳] به طور تجربی اثر پارامترهای مؤثر در پیل سوختی با هندسه ثابت را بررسی کردند و اثر مثبت افزایش رطوبت، دما و فشار عملیاتی در عملکرد پیل را نشان دادند. جارونگیت و همکاران [۱۴] به بهینه‌سازی فشار و دمای کارکرد پرداختند و میزان بهینه برای فشار و دما به ترتیب ۳ atm و K ۳۹۳ اعلام کردند. تقیانی و همکاران [۱۵]، اثر فشار مونتاژ بر عملکرد پیل را بررسی کردند. آنها نشان دادند که پیشرانی لایه نفوذ گاز به کانال جریان، با فشار مونتاژ، عملکرد پیل را کاهش می‌دهد و فشار مونتاژ تأثیر کمی بر پروفایل دما در سطح رابط کاتالیست-غشا سمت کاتد و اثر قابل توجه بر تلفات اهمی و غلظتی در چگالی‌های جریان بالا دارد. وو و همکاران [۱۶] اثر لایه نفوذ گاز برآمده را مورد بررسی قرار دادند و نشان دادند که در شرایط بهینه، افت فشار را تا ۳۵٪ کاهش می‌دهد و عملکرد تا ۲۵٪ افزایش می‌یابد. یانگ و همکاران [۱۷] با استفاده از الگوریتم ژنتیک، به بهینه‌سازی هندسه کانال و شانه پرداختند. نتایج بهینه‌سازی نشان داد که پیل با نسبت پهنای کانال به شانه ۲/۸ به ۰/۵ و ۴/۲ به ۰/۳ بهترین عملکرد را نشان می‌دهد. ونگ و همکاران [۱۸] به صورت عددی اثر اندازه کانال بر عملکرد سلول با میدان‌های جریان مارپیچ را بررسی کردند.

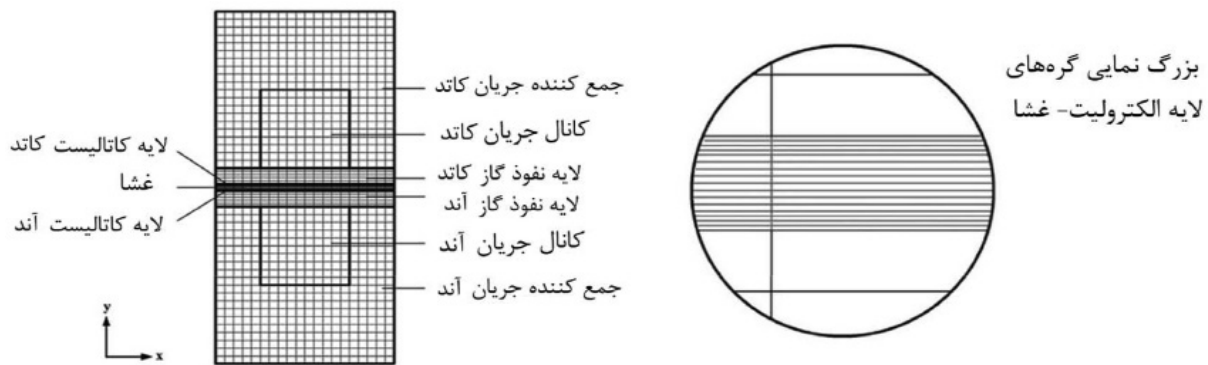
فلز فوم ارائه گردید و با سایر میدان جریان‌های متعارف مقایسه شد. نتایج نشان دادند که در میدان جریان فوم فلزی با ساختار متخلخل مناسب سیلاب کاهش می‌یابد. کلانتری و همکاران [۴] در یک مدل دو بعدی دو فاز به بررسی ویژگی انتقال و توزیع آب در پیل پرداختند. طبق نتایج آن‌ها، نفوذپذیری لایه نفوذ گاز در سمت کاتد و زاویه تماس، به طور قابل توجهی سطح اشباع آب در سمت کاتد را تحت تأثیر قرار می‌دهد. حیدری و همکاران [۵] اثر تعداد و ارتفاع بافل در امتداد کانال‌های جریان را از نظر عددی مطالعه کردند. مطالعه آنان، نشان داد که انسداد کامل کانال‌های جریان کاتد با ۵ بلوک و ارتفاع ۵ cm توان خالص را ۳۰٪ افزایش می‌دهد. فن و همکاران [۶] به بهینه‌سازی کانال بافل‌دار سمت کاتد پرداختند و نشان دادند که برای پیل با بافل‌هایی در زاویه ۳۰° و عرض ۵ mm و فاصله ۶ mm از هم، بیشترین اثر مثبت بافل دیده می‌شود. افشاری و ضیاعی‌راد [۷] کانال‌های موازی با مقاطع دوزنقه، برای میدان جریان خنک‌کننده پیل پیشنهاد کردند. نتایج شبیه‌سازی آنان نشان داد که حداکثر دمای سطح، شاخص یکنواختی دما و دما خنک‌کننده در یک سلول با مقاطع دوزنقه‌ای، پایین تر از یک سلول مشابه با مقطع مستطیلی است. دوی و همکاران [۸] اثر جریان زیر شانه در میدان جریان مارپیچ با کانال فرعی و میدان مارپیچ متعارف را شبیه‌سازی کردند. به دلیل بهبود جریان در زیر شانه میدان جریان با کانال فرعی، بیشینه چگالی جریان و چگالی توان به ترتیب ۱۸/۸۵٪ و ۲۳/۷۴٪ افزایش یافت. آوجی اوغلو و همکاران [۹] تأثیر درصد پلاتین در کاتالیزور را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که چگالی توان پیل با افزایش نسبت پلاتین به کربن لایه کاتالیست معمولی از ۰/۲ به ۰/۷ در ولتاژ ۰/۴۵ V، از ۰/۲۸ Wcm⁻² به ۰/۶۴ Wcm⁻² افزایش یافت. در مقاله‌ای از ابراهیمی و همکاران [۱۰] بهینه‌سازی نحوه توزیع پلاتینیوم روی لایه کاتالیستی صورت گرفت و بهبود ۰/۷٪ در چگالی توان حاصل گردید. در مطالعه اکر کهوه چی و

و اندازه شانه‌ی کانال است و توابع هدف بیشینه چگالی توان و بیشترین چگالی جریان میانگین، در ولتاژهای ۰/۹، ۰/۸، ۰/۷۵، ۰/۶، ۰/۴ و ۰/۲ V است.

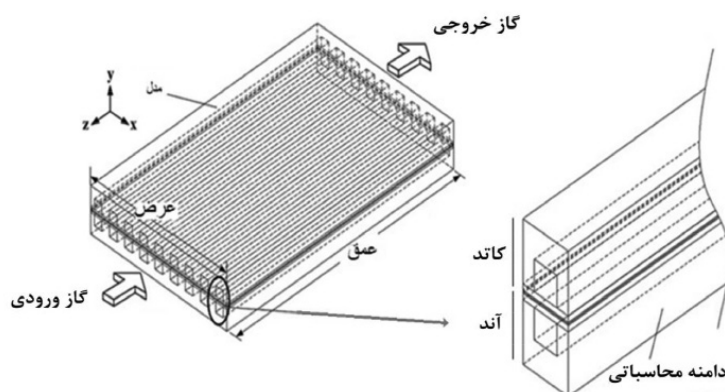
مدل مورد مطالعه

طرحواره پیل سوختی تک کانال مستقیم و جریان مخالف در شکل ۱ نشان داده شده است. ابعاد پیل سوختی $2/4 \times 2/88 \times 125 \text{ mm}^3$ به ترتیب از چپ به راست در راستای x, y, z است. این مدل در واقع بیانگر یک کانال تکراری از یک پیل سوختی جریان مخالف بزرگتر است. مساحت مقطع عبوری از مجموعه غشا الکترولیت معادل $300 \text{ mm}^2 = 125 \times 2/4$ به دست می‌آید. شکل‌های ۱ و ۲ نواحی حل و شبکه‌بندی پیل مورد مطالعه را نشان می‌دهند. در این پژوهش، جهت آنالیز حساسیت پیل سوختی غشا پلیمری مطالعه عددی در شرایط پایا و دما ثابت انجام شد.

نتایج نشان داد که اندازه کانال کوچک‌تر، حذف آب مایع، توان خروجی سلول و کار پمپ را افزایش می‌دهد و اندازه مقطع کانال $0/535 \text{ mm}$ در $0/535$ بهینه است. سالا و همکاران [۱۹] در یک شبیه‌سازی عددی بر روی کانال جریان پیل، آنالیز حساسیت انجام دادند و نشان دادند برای چگالی جریان پایین کانال عریض و برای چگالی جریان بالا، کانال باریک مناسب است. محمودی‌مهر و همکاران [۲۰] با تحلیل عددی پیل سوختی تک کاناله، نشان دادند برای همه شرایط عملیاتی پیل، نمی‌توان یک هندسه بهینه معرفی کرد و با تغییر شرایط، ویژگی‌های هندسه بهینه نیز تغییر می‌کند. در این پژوهش، حل عددی در حالت سه‌بعدی و دو فاز در جهت آنالیز حساسیت پیل سوختی غشا پلیمری انجام شد. پارامترهای مورد بررسی در این بررسی، ارتفاع و عرض کانال، ضخامت لایه نفوذ گاز، ضخامت غشا پلیمری، ضخامت لایه کاتالیست



شکل ۲ شبکه‌بندی



شکل ۱ نواحی مختلف پیل سوختی پلیمری

در نرم‌افزار فلونت [۲۱] شبیه‌سازی شده است. واکنش‌های ۱ و ۲ به ترتیب در سطح کاتالیست سمت آند و کاتد صورت می‌گیرد.



رابطه ۳ پیوستگی جرم در پیل سوختی را نشان می‌دهد. جمله‌های منبع این رابطه در لایه کاتالیست تولید می‌شوند.

$$\nabla \cdot (\varepsilon \rho \vec{u}) = S_m \quad (۳)$$

در رابطه ۳ چگالی و سرعت و جمله منبع به ترتیب با ρ و S نمایش داده شده است. رابطه‌های ۴ و ۵ رابطه باتلر-والمر در پیل سوختی را نشان می‌دهند که بر سینتیک واکنش‌های شیمیایی پیل حاکم است:

$$j_a = (a_a \cdot i_0^{ref})_a \left(\frac{C_{H_2}}{C_{H_2}^{ref}} \right)^{\gamma_a} \left[e^{(\alpha_a \frac{F}{RT}) \eta_a} - e^{-(\alpha_c \frac{F}{RT}) \eta_a} \right] \quad (۴)$$

$$j_c = (a_c \cdot i_0^{ref})_c \left(\frac{C_{O_2}}{C_{O_2}^{ref}} \right)^{\gamma_c} \left[-e^{(\alpha_a \frac{F}{RT}) \eta_c} + e^{-(\alpha_c \frac{F}{RT}) \eta_c} \right] \quad (۵)$$

پیش فرض‌ها در توسعه مدل سه‌بعدی، حالت پایدار، جریان آرام و دوفازی، دما ثابت، مواد ایزوتروپیک، ایده‌آل بودن واکنش‌دهنده‌ها و نادیده گرفتن گرانش است. این پژوهش شامل یک حالت اولیه برای هندسه و شرایط عملیاتی است و آنالیز حساسیت با تغییر پارامترهای هندسی طبق جدول ۱ انجام گرفته است و شرایط عملیاتی و ویژگی‌های پیل در جدول‌های ۲ و ۳ به‌طور کامل آمده است و تمام نمونه‌های مورد مطالعه با آن مطابق است. تغییر ابعاد باعث تغییر در پارامترهایی همچون هزینه و حجم پیل می‌شود که در این پژوهش فقط از ابعاد متداول در تناسب با یکدیگر استفاده گردیده است [۱].

مدل‌سازی و معادله‌های حاکم

در این پژوهش یک پیل سوختی غشا پلیمری به‌صورت سه بعدی، دوفاز، غیر هم‌دما و پایا

جدول ۱ نقشه راه مطالعه

	عرض (mm)	ارتفاع (mm)	شانه (mm)	کاتالیست (mm)	غشا (mm)	لایه نفوذ گاز (mm)
اولیه	۰/۸	۰/۶	۰/۸	۰/۰۱۲	۰/۰۳۶	۰/۲۱
۱	۰/۸	۰/۶	۰/۸	۰/۰۲۴	۰/۰۳۶	۰/۲۱
۲	۰/۸	۰/۶	۰/۸	۰/۰۰۶	۰/۰۳۶	۰/۲۱
۳	۰/۸	۰/۶	۰/۸	۰/۰۱۲	۰/۰۲۴	۰/۲۱
۴	۰/۸	۰/۶	۰/۸	۰/۰۱۲	۰/۰۷۲	۰/۲۱
۵	۰/۸	۰/۶	۰/۸	۰/۰۱۲	۰/۰۳۶	۰/۱
۶	۰/۸	۰/۶	۰/۸	۰/۰۱۲	۰/۰۳۶	۰/۳
۷	۰/۸	۰/۶	۰/۴	۰/۰۱۲	۰/۰۳۶	۰/۲۱
۸	۰/۸	۰/۶	۰/۶	۰/۰۱۲	۰/۰۳۶	۰/۲۱
۹	۰/۷	۰/۶	۰/۸	۰/۰۱۲	۰/۰۳۶	۰/۲۱
۱۰	۰/۵	۰/۶	۰/۸	۰/۰۱۲	۰/۰۳۶	۰/۲۱
۱۱	۰/۳	۰/۶	۰/۸	۰/۰۱۲	۰/۰۳۶	۰/۲۱
۱۲	۰/۸	۰/۸	۰/۸	۰/۰۱۲	۰/۰۳۶	۰/۲۱
۱۳	۰/۸	۰/۵	۰/۸	۰/۰۱۲	۰/۰۳۶	۰/۲۱
۱۴	۰/۸	۰/۳	۰/۸	۰/۰۱۲	۰/۰۳۶	۰/۲۱
حالت جامع	۰/۳	۰/۸	۰/۸	۰/۰۲۴	۰/۰۲۴	۰/۲۱

جدول ۲ شرایط عملیاتی

پارامتر	مقدار	واحد
T	۳۵۳	K
P ₀	۲۰۲	k Pa
RH _a	۱۲	%
RH _c	۶۵	%
S _a	۱	-
S _c	۱	-
E ₀	۰/۹۵	v
a _{i_c} ^{ref} /a _{i_a} ^{ref}	۱۰ ^{-۶} ۴ / ۱۰ ^{-۹} ۱/۵	A m ⁻³
C _c ^{ref} /C _a ^{ref}	۱/ ۱	kmol m ⁻³
a	۰/۵	-
C _a توان / C _c توان	۰/۵/ ۱	-
D _{ref} همه گونه‌ها	۱۰ ^{-۵} ۳	m ² s ⁻¹

جدول ۳ ویژگی‌های فیزیکی اجزا

پارامتر	واحد	غشا	کاتالیست	لایه نفوذ گاز	جمع‌کننده جریان
مقاومت ویسکوز	m ⁻²	-	۱۰ ^{-۱۲}	۱۰ ^{-۱۲}	-
ظرفیت گرمایی ویژه در فشار ثابت	J kg ⁻¹ K ⁻¹	۲۰۰۰	۸۷۱	۸۷۱	۸۷۱
هدایت گرمایی	W m ⁻¹ K ⁻¹	۲	۸	۸	۸
هدایت الکتریکی	Siemens m ⁻¹	۱۰ ^{-۱۶}	۵۰۰۰	۵۰۰	۱۰ ^{-۶}
چگالی	kg m ⁻³	۱۹۸۰	۲۷۱۹	۲۷۱۹	۲۷۱۹
تخلخل	-	۰/۵	۰/۵	۰/۵	۰
زاویه تماس	-	-	۱۴۰	۱۴۰	-
وزن معدل	kg mol ⁻¹	۱/۱	-	-	-

$$\eta = \phi_{sol} - \phi_{mem} - E_0 \quad (۶)$$

روابط پتانسیل فازها در روابط ۷ و ۸ آمده است:

$$\nabla(\sigma_{sol} \nabla \phi_{sol}) - j_{sol} = 0 \quad (۷)$$

$$\nabla(\sigma_{mem} \nabla \phi_{mem}) + j_{mem} = 0 \quad (۸)$$

در روابط ۶، ۷ و ۸، σ و E به ترتیب نماد اختلاف پتانسیل، ولتاژ پیل و هدایت الکتریکی می‌باشند. روابط ۹، ۱۰ و ۱۱ معادله بقای گونه‌های شیمیایی هستند.

$$\nabla \cdot (\rho \vec{u} Y_i) = \nabla \cdot (\rho D_i^{eff} \nabla Y_i) + S_k \quad (۹)$$

در روابط ۴ و ۵، η نمایانگر به ترتیب چگالی جریان تبدلی، چگالی جریان مرجع، غلظت، ضریب انتقال، ثابت فارادی، ثابت جهانی گازها، دما و پتانسیل اضافی است. نیروی محرکه جریان الکترون بین فاز جامد و فاز الکترولیت پتانسیل اضافی است که این پتانسیل اضافی نیز توسط رابطه ۶ به دست می‌آید که در آن پتانسیل مرجع همانند ولتاژ مدار باز است که $V = 0.95$ است:

کنترل می‌شود. در رابطه ۱۴، s بیانگر مقدار آب اشباع است.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon \rho_l s) + \nabla \cdot (\rho_l \frac{Ks^3}{\mu_l} \frac{dp_c}{ds} \nabla s) = r_w \quad (14)$$

جمله‌های منبع روابط نیز در جدول ۴ آورده شده است.

اعتبارسنجی و استقلال از شبکه

شکل ۳ منحنی قطبش یک پیل سوختی ۲۱ کاناله است. مقایسه دو منحنی قطبش و چگالی توان-چگالی جریان با نتایج حاصل از آزمایش‌های انجام شده، نشان می‌دهد که حل عددی از دقت خوبی برخوردار است [۲۲].

$$\sum_i Y_i \quad (10)$$

$$D_i^{eff} = \varepsilon^{1.5} (1-s)^{r_s} D_i^{ref} \left(\frac{P_0}{P}\right) \left(\frac{T_0}{T}\right)^{\frac{3}{2}} \quad (11)$$

D، Y و ε نمایانگر ضریب نفوذ جرمی، کسر جرمی و تخلخل در روابط ۹، ۱۰ و ۱۱ هستند. روابط ۱۲ و ۱۳ نیز، روابط بقای مومنتوم و انرژی را نشان می‌دهند:

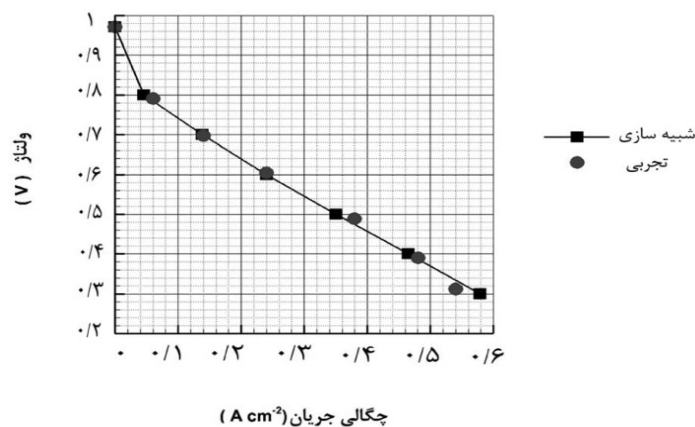
$$\nabla \cdot (\rho \vec{u} \vec{u}) = -\nabla P + (\mu_{eff} \nabla \vec{u}) + S_u \quad (12)$$

$$\nabla \cdot (\rho c_p \vec{u} T) = \nabla \cdot (k_{eff} \nabla T) + S_T \quad (13)$$

در رابطه ۱۳، K نماد ضریب هدایت حرارتی است. در شرایط عملیاتی زیر ۱۰۰ °C امکان چگالش آب بویژه در چگالی جریان‌های زیاد وجود دارد که چگالش، تشکیل و جابه‌جایی آب توسط رابطه ۱۴

جدول ۴ جمله‌های چشمه روابط بقا

معادله بقا	ناحیه	جمله منبع	معادله بقا	ناحیه	جمله منبع
جرم	CL _a	$-\frac{j_a}{2F} M_{H_2}$	انرژی	Mem و CL	$S_T = I^2 R_{ohm} + h_{react} + \eta j_{a,c}$
	CL _c	$-\frac{j_c}{4F} M_{O_2} + \frac{j_c}{2F} M_{H_2O}$			
گونه شیمیایی	CL	$S_{H_2} = -\frac{j_a}{2F}$	آب اشباع	نواحی متخلخل و کانال	$S_w = \max\left[(1-s) \frac{P_w - P_{sat}}{RT} M_{w-H_2}, s p_l\right]$
		$S_{O_2} = -\frac{j_c}{4F}$			
		$S_{H_2O} = +\frac{j_c}{2F}$			
مومنتوم	نواحی متخلخل	$S_u = \frac{-\mu}{K_p} \varepsilon \vec{u}$			



شکل ۳ مقایسه حل عددی با نتایج آزمایش‌ها [۲۲]

کاتالیست، چگالی جریان و بیشینه توان به میزان کمی افزایش می‌یابد. نسبت چگالی توان بیشینه مربوط به ضخیم‌ترین کاتالیست به چگالی توان بیشینه نازک‌ترین کاتالیست هر دو برابر ۱/۰۷ است. میانگین تغییرات ۰.۷٪ است. در شرایط عملکردی یکسان و مساحت سطح فعال برابر لایه کاتالیستی تا یک اندازه مشخص با افزایش پلاتین سرعت واکنش افزایش می‌یابد ولی میزان اثر بخشی کاتالیست محدود به شرایط عملیاتی [۲۳] از جمله واکنش‌دهنده کافی در محل واکنش است.

اثر ضخامت غشای پلیمری

شکل ۵ نمودار قطبش و چگالی توان- چگالی جریان سه پیل با ضخامت غشا متفاوت است. غشا پیل رسانش یونی بالایی دارد و در عین حال از انتقال الکترون، هیدروژن و اکسیژن جلوگیری می‌کند. مقدار آب محتوای پیل مهم است چرا که به مدیریت آب در پیل می‌انجامد. شکل ۵ مبین آن است که با افزایش ضخامت غشا، چگالی جریان میانگین و بیشینه توان پیل کاهش می‌یابد. نسبت چگالی توان بیشینه مربوط به نازک‌ترین غشا به چگالی توان بیشینه ضخیم‌ترین غشا ۱/۴۱ است و تغییر چگالی توان به‌طور میانگین ۰.۳۹٪ است. با کاهش ضخامت غشا، مقاومت یونی کمتر و آب محتوای غشا بیشتر می‌شود و عملکرد متأثر از این دو مشخصه تغییر می‌یابد. این نتیجه در تطابق کامل با منابع [۲۴-۲۶] است.

اولین مرحله جهت انجام شبیه‌سازی عددی جریان در داخل یک میدان، شبکه‌بندی میدان و تبدیل محیط پیوسته به یک محیط گسسته به منظور اعمال روش‌های عددی است. شبکه‌بندی ساختار یافته مکعبی در تمام نواحی ایجاد شد. چهار شبکه با تعداد گره‌های گفته شده در جدول ۵ ایجاد شد و با مقایسه بین نتایج نمونه ۳ انتخاب شد یعنی تعداد شبکه ۲۹۵۳۵۶ است و معیار هم‌گرایی ۱۰^{-۶} - ۱۰^{-۱۰} جهت هم‌گرایی قرار داده شد.

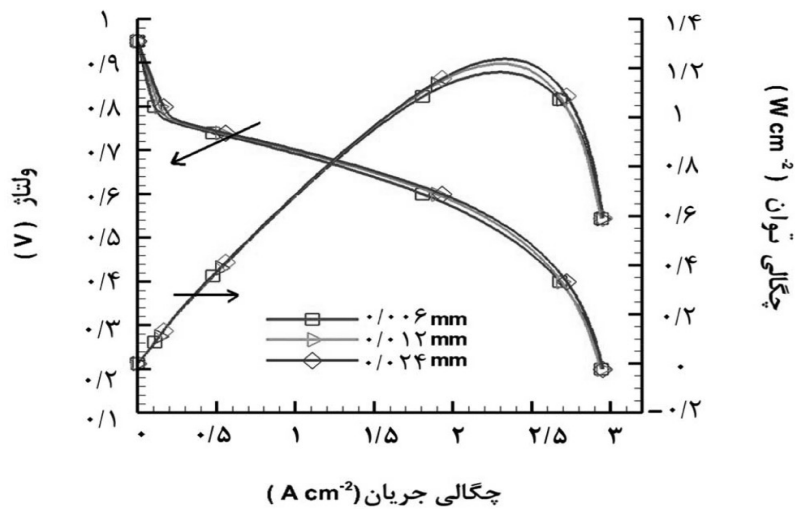
جدول ۵ بررسی استقلال از شبکه

چگالی جریان ترمینال آند V	تعداد گره	نمونه
۱/۹۰۲۴۷	۳۹۶۱	نمونه ۱
۱/۰۹۲۴۵	۸۶۸۰	نمونه ۲
۰/۹۷۲۴۵	۱۴۳۵۸۹	نمونه ۳
۰/۹۷۲۴۷	۲۹۵۳۵۶	نمونه ۴

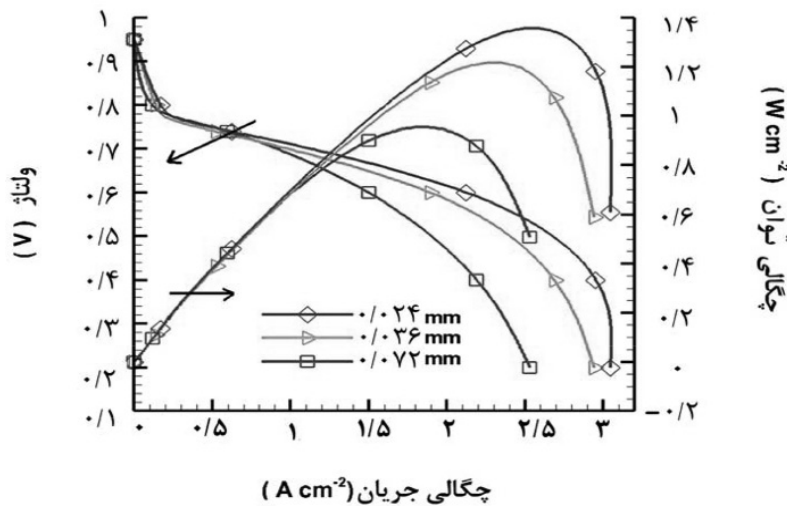
بررسی نتایج

اثر ضخامت لایه کاتالیست

الکتروود پیل سوختی لایه نازکی از کاتالیست است که بین غشا و بستر متخلخل قرار گرفته است. به علت سرعت کم واکنش‌های شیمیایی استفاده از کاتالیست اجتناب ناپذیر است. شکل ۴ نمودار قطبش و چگالی توان- چگالی جریان پیل با سه ضخامت لایه کاتالیستی متفاوت را نشان می‌دهد. در این شکل با افزایش ضخامت لایه



شکل ۴ اثر ضخامت لایه کاتالیست در عملکرد پیل سوختی



شکل ۵ اثر ضخامت غشا در عملکرد پیل سوختی

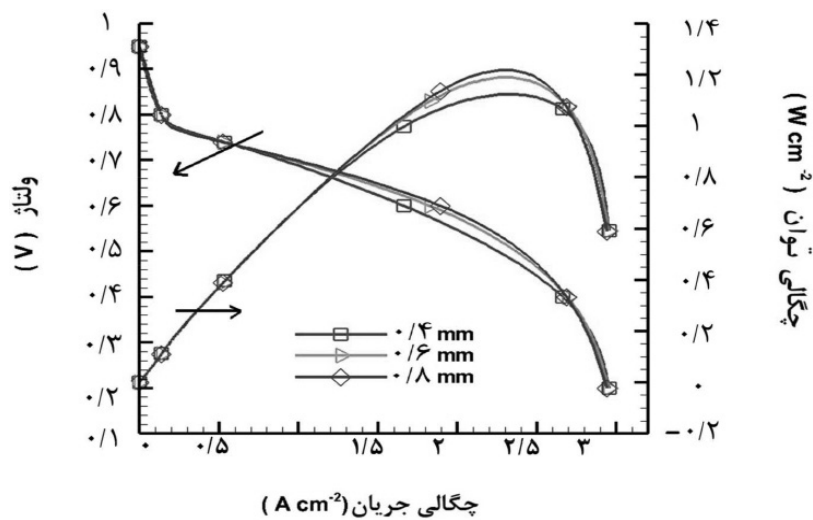
اثر ضخامت لایه نفوذ گاز

بین لایه کاتالیست و میدان جریان، لایه نفوذ گاز قرار دارد. شکل ۶ نمایانگر اثر تغییر لایه نفوذ گاز بر نمودار ولتاژ-چگالی جریان و چگالی توان-چگالی جریان پیل است. با افزایش ضخامت لایه نفوذ گاز چگالی جریان زیاد تغییر نمی‌کند و به طبع آن، تغییر میانگین چگالی توان کم است ولی بیشینه توان افزایش می‌یابد. به بیان دیگر، با افزایش ضخامت لایه نفوذ گاز، افت اهمی کاهش می‌یابد ولی افت غلظتی افزایش می‌یابد و عملکرد پیل حاصل برهم‌کنش این دو پارامتر است. نسبت چگالی

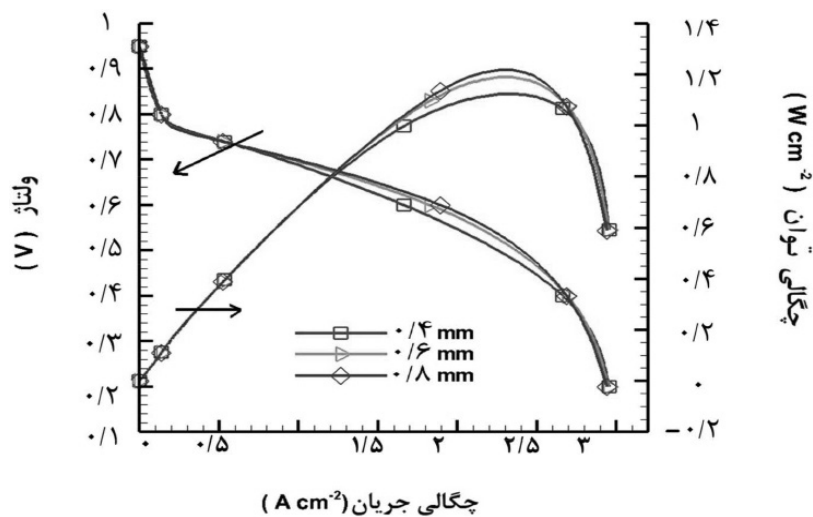
توان بیشینه مربوط به ضخیم‌ترین لایه نفوذ گاز به چگالی توان بیشینه نازک‌ترین لایه نفوذ گاز ۱/۴۵ است و میانگین تغییر چگالی توان ۱۸٪ است.

اثر محل کانال (اندازه شانه)

شانه به فاصله در این بررسی به فاصله افقی بین جداره خارجی و جداره کانال اطلاق می‌شود. شکل ۷ نمودار ولتاژ-چگالی جریان و چگالی توان-چگالی جریان پیل با سه اندازه شانه مختلف است. با توجه به شکل ۷، اندازه شانه کانال درحالتی که اندازه شانه کم‌تر از اندازه عرض کانال است تأثیر زیادی در چگالی جریان حدی ندارد.



شکل ۶ اثر ضخامت لایه نفوذ گاز در عملکرد پیل سوختی



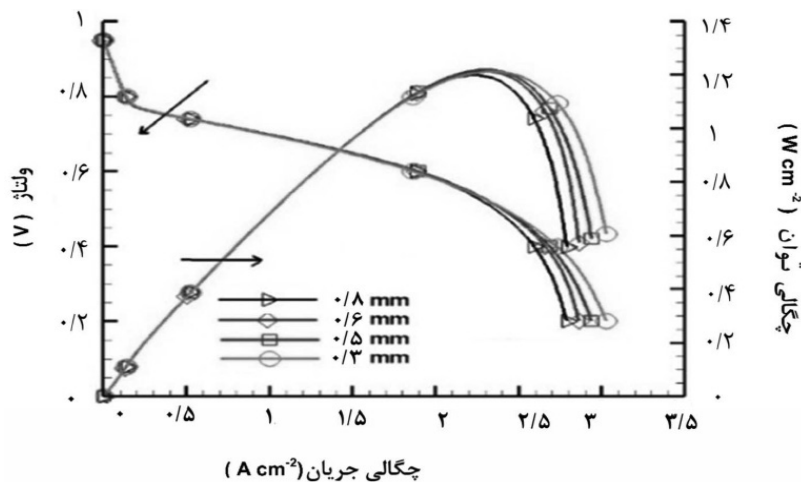
شکل ۷ اثر اندازه شانه در عملکرد پیل سوختی

با سه اندازه عرض کانال متفاوت است. از شکل ۸ استنباط می‌شود که با افزایش ارتفاع کانال به‌ویژه در اختلاف ولتاژ پایین، میانگین چگالی جریان و به طبع آن، میانگین چگالی توان افزایش می‌یابد و بیشینه توان بیشتر بهبود می‌یابد. نسبت چگالی توان بیشینه مربوط به کمترین ارتفاع به چگالی توان بیشینه بیشترین ارتفاع برابر $1/0.5$ است و تغییر چگالی توان به‌طور میانگین 3% است. با کاهش ارتفاع کانال، افت غلظتی کاهش می‌یابد که نشان از افزایش انتقال واکنش‌دهنده‌ها به‌سطح کاتالیست است.

نسبت چگالی توان بیشینه مربوط به شانه عریض‌تر به چگالی توان بیشینه شانه کوچک‌تر برابر $1/0.7$ است و میانگین تغییر $4/5\%$ است. شکل بیان می‌کند که با افزایش اندازه شانه چگالی توان بیشینه افزایش می‌یابد و این در هماهنگی کامل با منابع [۲۷ و ۲۸] است. با بزرگ شدن عرض افت اهمی کاهش می‌یابد و عملکرد پیل متاثر از این پارامتر تغییر می‌کند.

اثر ارتفاع کانال

ارتفاع کانال در ارتباط مستقیم با حمل و نقل گونه‌های شیمیایی است. شکل ۸ نمودار ولتاژ-چگالی جریان و چگالی توان-چگالی جریان پیل



شکل ۸ اثر اندازه ارتفاع کانال در عملکرد پیل سوختی

اثر عرض کانال

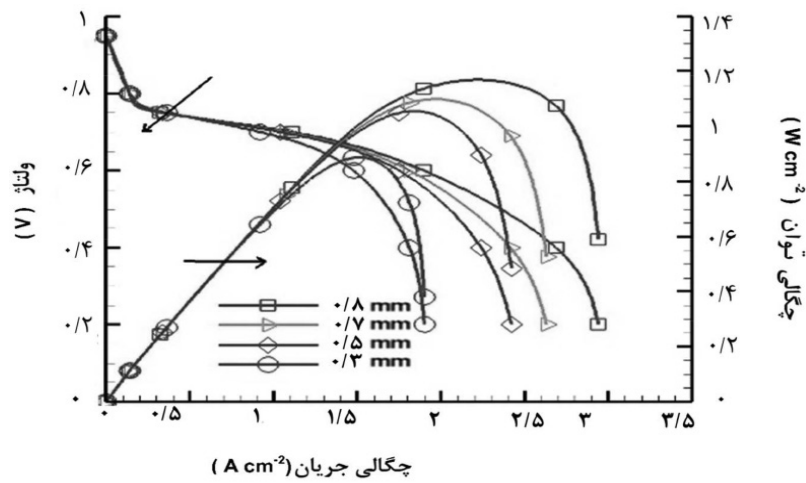
عرض کانال در میزان سطح در حال تماس کانال و لایه نفوذ گاز و اندازه سطح مقطع کانال موثر است. شکل ۹ نمودار قطبش و چگالی توان- چگالی جریان پیل با سه اندازه عرض کانال جریان متفاوت را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل کاهش عرض کانال به‌خصوص در اختلاف ولتاژ پایین، موجب می‌شود میانگین چگالی جریان افزایش یابد و بیشینه توان بهبود پیدا کند. نسبت چگالی توان بیشینه مربوط به کمترین عرض کانال به چگالی توان بیشینه بیشترین عرض کانال برابر $1/28$ است و تغییر چگالی توان به‌طور میانگین $32/8\%$ است. به عبارت دیگر، با کاهش عرض کانال، انتقال واکنش‌دهنده‌ها بهبود و میزان واکنش‌دهنده‌ها در سطح کاتالیست افزایش پیدا می‌کند. شکل‌های ۸ و ۹ بیان می‌کنند که با کاهش اندازه سطح مقطع کانال، بازده و توان تولیدی به‌ویژه در چگالی جریان بالا افزایش می‌یابد. و این نتیجه با منابع [۲۹] مطابقت دارد.

حالت اصلاح شده

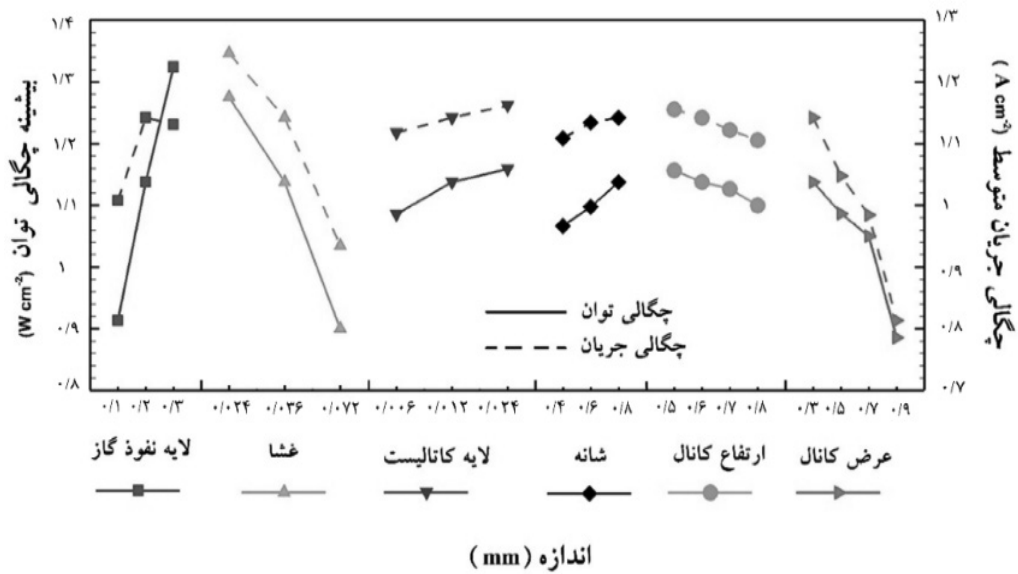
در این بخش، یک پیل به‌عنوان حالت اصلاح شده معرفی می‌شود که دارای اندازه ابعاد مطلوب با مقیاس نمودارهای قطبش بیان شده در مراحل قبل است. شکل ۱۰ در یک دید کلی به مقایسه اثر ابعاد پرداخته است. با توجه به نسبت ابعاد و نسبت

تغییر چگالی توان، بیشترین اثر به‌ترتیب متعلق به ضخامت غشا، ضخامت لایه نفوذ گاز، اندازه عرض کانال و اندازه ارتفاع کانال است و با معیار متوسط چگالی جریان تولیدی، به‌ترتیب اندازه عرض کانال، ضخامت غشا، ضخامت لایه نفوذ گاز، اندازه ارتفاع کانال بیش‌ترین تاثیر را نشان دادند.

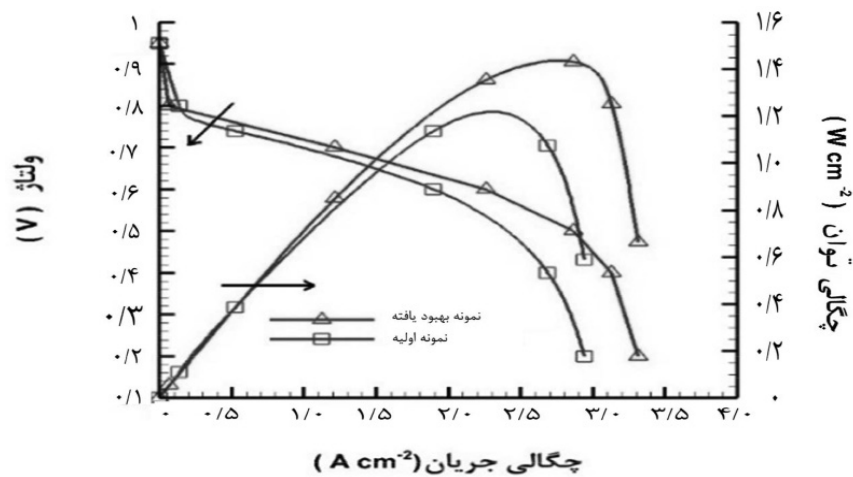
یعنی اندازه ارتفاع، ضخامت کاتالیست و ضخامت غشا در جهت افزایش عملکرد طبق جدول ۱، ردیف حالت اصلاح شده، تغییر پیدا کرد. شکل ۱۱ نمودار قطبش و چگالی توان- چگالی جریان پیل در حالت اصلاح شده و پایه را نشان می‌دهد. نتایج در شکل ۱۰ نشان‌دهنده افزایش میانگین چگالی جریان و بیشینه چگالی توان به‌ترتیب به اندازه $26/2\%$ و 19% است. مجموع بهبود عملکرد پیل در همه نمونه‌های بهبود یافته (نمونه‌های ۱۱، ۳ و ۱) با یکدیگر کمتر از افزایش عملکرد پیل در حالت اصلاح شده است. در مدل اصلاح شده با تغییر در اندازه ارتفاع کانال، ضخامت کاتالیست و غشا موجب دگرگونی در چندین مشخصه عملکردی پیل گردید. شکل ۱۲ مقایسه کسر جرمی هیدروژن، کسر جرمی اکسیژن و مقدار آب اشباع بر روی خط منصف سطح تماس سمت آند لایه کاتالیستی و لایه نفوذ گاز در جهت z در دو حالت اصلاح شده و اولیه در ولتاژ 0.2 V را نشان می‌دهد.



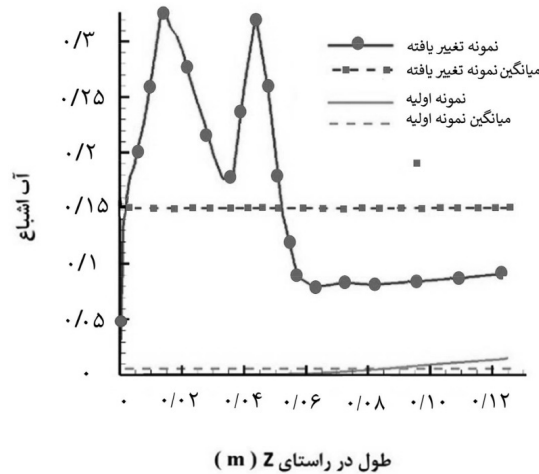
شکل ۹ اثر اندازه عرض کانال در عملکرد پیل سوختی



شکل ۱۰ اثر اندازه پارامترها در عملکرد پیل سوختی



شکل ۱۱ مقایسه عملکرد دو حالت اصلاح شده و اولیه



شکل ۱۲ مقایسه آب اشباع در دو حالت اصلاح شده و اولیه بر روی خط منصف سطح تماس سمت آند لایه کاتالیستی و لایه نفوذ گاز در جهت z در ولتاژ ۰/۲ V

میانگین نتایج زیر استنباط گردید:

- اثر ابعاد بر روی چگالی توان بیشینه مطالعه شد و با توجه به نسبت ابعاد و نسبت تغییر چگالی توان به ترتیب ضخامت غشا، ضخامت لایه نفوذ گاز، اندازه عرض کانال و اندازه ارتفاع کانال بیشترین اثر را داشت.

- رابطه بین ابعاد اجزاء پیل و میانگین چگالی جریان بررسی شد و به ترتیب اثر اندازه عرض کانال، ضخامت غشا، ضخامت لایه نفوذ گاز، اندازه ارتفاع کانال بیشترین تأثیر را روی میانگین چگالی جریان نشان داد.

- یک پیل به‌عنوان حالت اصلاح شده ایجاد شد که داری اندازه ابعاد مطلوب‌تر نسبت به حالت اولیه است. یعنی اندازه ارتفاع، ضخامت کاتالیست و ضخامت غشا در جهت افزایش عملکرد تغییر پیدا کرد. میانگین چگالی جریان و بیشینه چگالی توان افزایش یافت و امکان پدیده طغیان به دلیل افزایش آب اشباع افزایش پیدا کرد.

مطابق شکل‌ها نسبت به حالت اولیه، میانگین و انحراف از معیار کسر میانگین مقدار آب اشباع افزایش یافته است. همچنین، افزایش قابل توجه مقدار آب اشباع امکان بروز پدیده سیلاب را افزایش می‌دهد.

نتیجه‌گیری

هدف از این پژوهش، آنالیز حساسیت پیل سوختی غشا پلیمری است و در این جهت یک پیل سوختی غشا پلیمری در شرایط پایا، سه‌بعدی، دو فاز و دما ثابت شبیه‌سازی شد. پارامترهای مورد بررسی، ارتفاع کانال، عرض کانال، ضخامت لایه نفوذ گاز، ضخامت غشا پلیمری، ضخامت لایه کاتالیست و اندازه شانه کانال می‌باشند و بیشینه چگالی توان و چگالی جریان میانگین به‌عنوان دو شاخص عملکرد پیل در ولتاژهای ۰/۹، ۰/۸، ۰/۷۵، ۰/۶، ۰/۴ و ۰/۲ مطالعه شد. با مقایسه اثر تغییر ابعاد بر روی دو شاخص بیشینه چگالی توان و چگالی جریان

مراجع

- [1]. Ghasabehi M, Shams M, Kanani H (2021) Multi-objective optimization of operating conditions of an enhanced parallel flow field proton exchange membrane fuel cell, Energy Conversion and Management, 230: 113798.

- [2]. Ashrafi M, Shams M, Bozorgnezhad A, Ahmadi G (2016) Simulation and experimental validation of droplet dynamics in microchannels of PEM fuel cells, *Heat and Mass Transfer*, 52, 12: 2671–2686.
- [3]. Bao Z, Niu Z, Jiao K (2019) Numerical simulation for metal foam two-phase flow field of proton exchange membrane fuel cell, *International Journal of Hydrogen Energy*, 44, 12: 6229–6244.
- [4]. Kalantari H (2018) Numerical analysis of water distribution in the various layers of proton exchange membrane fuel cells, *Computers and Chemical Engineering*, 118: 14–24.
- [5]. Heidary H, Kermani M J, Dabir B (2016) Influences of bipolar plate channel blockages on PEM fuel cell performances, *Energy Conversion and Management*, 124: 51–60.
- [6]. Fan L, Niu Z, Zhang G, Jiao K (2018) Optimization design of the cathode flow channel for proton exchange membrane fuel cells, *Energy Conversion and Management*, 171: 1813–1821.
- [7]. Afshari E, Ziaei-Rad M (2018) A study on performance of cooling flow field with trapezoid-shape channels in pem fuel cell, 16th International Conference on Clean Energy.
- [8]. Duy V N, Lee J, Kim K, Ahn J, Park S, Kim T, Kim H M (2015) Dynamic simulations of under-rib convection-driven flow-field configurations and comparison with experiment in polymer electrolyte membrane fuel cells, *Journal of Power Sources*, 293: 447–457.
- [9]. Avcioglu G S, Ficicilar B, Eroglu I (2018) Effective factors improving catalyst layers of PEM fuel cell, *International Journal of Hydrogen Energy*, 43, 23: 10779–10797.
- [10]. Ebrahimi S, Roshandel R, Vijayaraghavan K (2016) Power density optimization of PEMFC cathode with non-uniform catalyst layer by Simplex method and numerical simulation, *International Journal of Hydrogen Energy*, 41, 47: 22260–22273.
- [11]. Kahveci E E, Taymaz I (2018) Assessment of single-serpentine PEM fuel cell model developed by computational fluid dynamics, *Fuel*, 217: 51–58.
- [12]. Qin Y, Du Q Du, Fan M, Chang Y, Yin Y (2017) Study on the operating pressure effect on the performance of a proton exchange membrane fuel cell power system, *Energy Conversion and Management*, 142: 357–365.
- [13]. Wang L, Husar A, Zhou T, Liu H (2003) A parametric study of PEM fuel cell performances, *International Journal of Hydrogen Energy*, 28, 11: 1263–1272.
- [14]. Jawrungrit C, Sirivat A, Siemanond K (2016) Improving proton exchange membrane efficiency of fuel cell by numerical simulation and optimization, *Computer Aided Chemical Engineering*, 38: 1887–1892.
- [15]. Toghyani S, Moradi Nafchi F, Afshari E, Hasanpour K, Baniasadi E, Atyabi S A (2018) Thermal and electrochemical performance analysis of a proton exchange membrane fuel cell under assembly pressure on gas diffusion layer, *International Journal of Hydrogen Energy*, 43, 9: 4534–4545.
- [16]. Wu H W, Shih G J, Bin Chen Y (2018) Effect of operational parameters on transport and performance of a PEM fuel cell with the best protrusive gas diffusion layer arrangement, *Applied Energy*, 220: 47–58.
- [17]. Yang W J, Wang H Y, Lee D H, Kim Y B (2015) Channel geometry optimization of a polymer electrolyte membrane fuel cell using genetic algorithm, *Applied Energy*, 146: 1–10.
- [18]. Wang X D, Yan W M, Duan Y Y, Weng F B, Bin Jung G, Lee C Y (2010) Numerical study on channel size effect for proton exchange membrane fuel cell with serpentine flow field, *Energy Conversion and Management*, 51, 5: 959–968.
- [19]. Sala P, Stampino P G, Dotelli G (2014) Design approach for the development of the flow field of bipolar plates for a pemfc stack prototype, *Journal of Fuel Cell Science and Technology*, 11, 6: 061003.
- [20]. Mahmoudimehr J, Daryadel A (2017) Influences of feeding conditions and objective function on the optimal design of gas flow channel of a PEM fuel cell, *International Journal of Hydrogen Energy*, 42, 36: 23141–23159.
- [21]. Arvay A (2011) Proton exchange membrane fuel cell modeling and simulation using ansys fluent, Arizona State University.
- [22]. Ghasabehi M, Ashrafi M, Shams M (2021) Performance analysis of an innovative parallel flow field design of proton exchange membrane fuel cells using multiphysics simulation, *Fuel*, 285: 119194.
- [23]. Pei P, Chen H (2014) Main factors affecting the lifetime of proton exchange membrane fuel cells in vehicle applications: a review, *Applied Energy*, 125: 60–75.
- [24]. Ouaidat G, Cherouat A, Kouta R, Chamoret D (2020) Numerical modeling of the mechanical behavior of proton exchange membrane fuel cell performance: Design of experiment study and optimization, *International Journal of Hydrogen Energy*, 45, 46: 25210–25226.
- [25]. Rakhshanpouri S, Rowshanzamir S (2013) Water transport through a PEM (proton exchange membrane) fuel cell in a seven-layer model, *Energy*, 50: 220–231
- [26]. Um S, Wang C Y (2005) Computational study of water transport in proton exchange membrane fuel cells, *Journal of Power Sources*, 156, 2: 211–223.

- [27]. Chowdhury M Z, Genc O, Toros S (2018) Numerical optimization of channel to land width ratio for PEM fuel cell, *International Journal of Hydrogen Energy*.
- [28]. Zhang X, Higier A, Zhang X, Liu H (2019) Experimental Studies of Effect of Land Width in PEM Fuel Cells with Serpentine Flow Field and Carbon Cloth, *Energies*, 12, 3: 471.
- [29]. Carcadea E, Varlam M, Ingham D B, Ismail M S, Patularu L, Marinoiu A, Schitea D (2018) The effects of cathode flow channel size and operating conditions on PEM fuel performance: A CFD modelling study and experimental demonstration, *International Journal of Energy Research*, 42, 8: 2789–2804.