



بررسی پارامترهای تأثیرگذار بر روی بازدهی پیل سوختی بر اساس معیار آب‌بندی

مصطفی حبیب‌نیا^۱، محسن شاکری^{۱*}، سلمان نوروزی^۲

^۱مرکز پژوهشی انرژی‌های تجدیدپذیر، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران
^۲دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳ اردیبهشت ۱۳۹۵
بازنگری: ۲۳ مرداد ۱۳۹۵
پذیرش: ۲ آبان ۱۳۹۵
ارائه آنلاین: ۱۹ آبان ۱۳۹۵

کلمات کلیدی:

توزیع تنش
صفحه انتهایی
نیروی گیره‌بندی
لایه نفوذ گاز

چکیده: یکی از پارامترهای تأثیرگذار در بازدهی پیل سوختی مقدار تنش فشاری اعمالی از طرف صفحه دوقطبی بر روی لایه نفوذ گاز بوده که بر مقاومت الکتریکی بین دو صفحه تأثیرگذار است. توزیع و مقدار تنش روی لایه نفوذ گاز به پارامترهای طراحی و مونتاژ پیل سوختی بستگی دارد. در این پژوهش تأثیر پارامترهایی همچون نیروی گیره‌بندی، عمق کانال قرارگیری واشر و ضخامت صفحات انتهایی بر مقدار و توزیع تنش فشاری لایه نفوذ گاز مورد بررسی قرار گرفت. با کاهش نیروی گیره‌بندی مقدار تغییر شکل صفحه انتهایی کمتر و توزیع تنش بر روی لایه نفوذ گاز یکنواخت‌تر می‌شود اما تنش روی لایه نفوذ گاز کاهش و احتمال نشتی می‌یابد. با توجه به این موضوع، برای جلوگیری از نشتی حداقل تنش بر روی واشر به‌دست آمده و دیگر پارامترها طوری انتخاب شوند که در حداقل نیروی گیره‌بندی، این حداقل تنش برای آب‌بندی تأمین گردد. حداقل تنش بر روی واشر با توجه به تست انجام شده برابر با ۲ MPa به‌دست آمد. با توجه به اطلاعات شرکت سازنده لایه نفوذ گاز، بیشترین بازدهی در تنش فشار ۱ MPa بر روی لایه نفوذ گاز است، با انجام شبیه‌سازی‌های مختلف و بررسی پارامترها نتایج مورد مقایسه قرار گرفت. با استفاده از شبکه عصبی و الگوریتم بهینه‌سازی زنبورها مقدار بهینه پارامترها برای توزیع تنش یکنواخت با حداقل وزن پیل سوختی به‌دست آمد.

۱- مقدمه

سوخت و تأمین انرژی یکی از مهم‌ترین چالش‌ها در قرن حاضر بوده تا آن‌جا که این موضوع یکی از عوامل تأثیرگذار در پیشرفت کشورهای مختلف است. کاهش منابع سوخت‌های فسیلی و آلودگی ایجاد شده در اثر استفاده از این سوخت‌ها، مشکلاتی است که بشر را بر آن داشته تا به فکر جایگزین مناسب برای تولید انرژی باشد. پیل‌های سوختی می‌تواند یک جایگزین مناسب به جای استفاده از فناوری سوخت‌های فسیلی باشد. این فناوری در وسایل حمل و نقل و نیروگاهی می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد.

پیل‌های سوختی بر اساس نوع الکترولیت، به پیل سوختی اکسید جامد، فسفریک اسید، قلیایی، کربنات مذاب و پیل‌های سوختی پلیمری دسته‌بندی می‌شود.

پیل‌های سوختی پلیمری به دلیل مزایایی مانند دمای عملکرد پایین، چگالی توان بالا و زمان راه‌اندازی پایین، نسبت به دیگر پیل‌های سوختی بیشتر مورد توجه قرار گرفته‌اند. این نوع سلول‌های سوختی دارای اجزاء مختلفی شامل صفحات انتهایی^۱، صفحات دوقطبی^۲، صفحات جمع‌کننده

جریان (صفحات مسی)^۳، واشر^۴، غشا^۵ و لایه نفوذ گاز^۶ است. در یک پیل سوختی، سوخت به طور پیوسته به الکترود آند و اکسیژن به الکترود کاتد تزریق شده و واکنش‌های الکتروشیمیایی در الکترودها انجام می‌شود که نتیجه آن ایجاد جریان الکتریکی است. این جریان با عبور از لایه نفوذ گاز به صفحات دوقطبی رسیده و سپس به صفحات جمع‌کننده جریان (صفحات مسی) منتقل شده و مورد استفاده قرار می‌گیرد.

برای استفاده از این فناوری دو عامل قیمت و بازدهی تأثیر زیادی دارند. طی تحقیقات گسترده‌ای تاکنون در زمینه بازدهی پیل‌های سوختی انجام شده است، پارامترهای گوناگونی در بازدهی این پیل‌ها تأثیرگذار هستند. یکی از پارامترها، که در بازدهی نقش مهم دارد مقاومت الکتریکی بین لایه نفوذ گاز و صفحات قطبی است. مقاومت الکتریکی بین صفحات پیل سوختی، باعث تلفات اهمی در پیل سوختی می‌شود. مقاومت الکتریکی بین صفحات دوقطبی و لایه نفوذ گاز مهم‌ترین بخش از تلفات اهمی در پیل سوختی را شامل می‌شود. مقدار تنش فشاری بین این دو صفحه در مقدار مقاومت الکتریکی تأثیرگذار است. با افزایش تنش فشاری بین دو صفحه و تماس کامل، مقدار مقاومت اهمی کاهش می‌یابد. از سوی دیگر با افزایش فشار، میزان تخلخل در لایه نفوذ گاز کاهش یافته و سطح فعال را کاهش

- 3 Current Collector
- 4 Gasket
- 5 Membrane Electrode Assembly (MEA)
- 6 Gas Diffusion Layer (GDL)

- 1 End Plate
- 2 Bipolar Plate

نویسنده عهده‌دار مکاتبات: shakeri@nit.ac.ir

توزیع فشار بر روی غشا پرداختند. فشار مونتاژی و موقعیت پیچ‌ها به عنوان پارامترهای متغیر انتخاب شده‌اند. ونگ و همکاران [۱۲] در سال ۲۰۰۸ به بررسی توزیع فشار در نیروی گیره‌بندی پرداختند. در این تحقیق برای به‌دست آوردن توزیع فشار یکنواخت به جای افزایش ضخامت صفحه انتهایی که باعث افزایش قیمت و وزن پیل سوختی می‌شود، یک سیستم هیدرولیکی طراحی و ساخته شد. در سال ۲۰۱۰ اصغری و همکاران [۱۳] صفحات انتهایی پیل ۵ kW طراحی و مورد بررسی قرار داد. هونایو و همکاران [۱۴] در سال ۲۰۱۰ با ساخت صفحه انتهایی با ساختار کامپوزیتی، آن را با صفحه انتهایی فولادی مقایسه کردند. زو و همکاران [۱۵] به بررسی تأثیر توزیع فشار غیر یکنواخت بر مقاومت الکتریکی پرداختند. نتایج نشان داد با افزایش یکنواختی توزیع تنش بر روی لایه نفوذ گاز، مقاومت الکتریکی کاهش می‌یابد. علیزاده و همکاران [۱۶] به بررسی ضخامت و جنس صفحه انتهایی، سختی واشر و تعداد سلول‌های سوختی بر توزیع تنش فشاری بر روی واشر پرداختند. لی و همکاران [۱۷] به بهینه‌سازی هندسی صفحه انتهایی پرداختند که باعث کاهش وزن پیل سوخت و افزایش یکنواختی توزیع تنش فشاری شد.

همان‌طور که در پژوهش‌های قبلی مشاهده شد، توزیع فشار بر روی لایه نفوذ گاز نقش بسیار مهمی در بازدهی پیل سوختی دارد. توزیع فشار غیر یکنواخت باعث افزایش تلفات اهمی در مناطق با فشار کم و کاهش میزان تخلخل لایه نفوذ گاز در مناطق با فشار زیاد، که خود باعث کاهش ناحیه فعال پیل سوختی می‌شود. همچنین افزایش نیروی گیره‌بندی باعث ایجاد تغییر شکل بیشتر در صفحه انتهایی و موجب غیر یکنواختی در توزیع فشار بر لایه نفوذ گاز می‌شود. که این عوامل باعث کاهش بازدهی در پیل سوختی خواهد شد.

هدف از این پژوهش رسیدن به توزیع فشار مناسب بر روی لایه نفوذ گاز می‌باشد. برای این منظور نیروی گیره‌بندی باید طوری انتخاب شود که به صورت همزمان، آب‌بندی و تنش بر روی لایه نفوذ گاز به مقدار مورد نظر برسد. در صورتی که مقدار تنش بر روی لایه نفوذ گاز کم باشد، مقاومت الکتریکی افزایش می‌یابد و در صورتی که این مقدار تنش افزایش یابد مقاومت الکتریکی کاهش می‌یابد اما جابه‌جایی مواد با مشکل مواجه شده و بازدهی پیل سوختی کاهش می‌یابد. در این پژوهش مقدار تنش مناسب بر روی لایه نفوذ گاز که بتواند بازدهی مناسبی را ایجاد کند، با توجه به پارامترهای شرکت سازنده، برابر با ۱ MPa می‌باشد. بر این اساس پارامترهای مناسب بر اساس معیار آب‌بندی به‌دست آمد. برای رسیدن به این هدف باید حداقل تنش بر روی واشر برای جلوگیری از نشتی به‌دست آید. به این منظور از طریق تست تجربی، این مقدار تنش برای واشر مورد نظر با ابعاد خاص محاسبه شده است. در ادامه پارامترهای تأثیرگذار مورد بررسی قرار گرفت. از جمله این عوامل، میزان عمق کانال و محل قرارگیری واشر است که تأثیر زیادی در مقدار نیروی گیره‌بندی دارد. با کاهش عمق شیار برای رسیدن به لهیدگی مناسب بر روی لایه نفوذ گاز، میزان نیروی گیره‌بندی

داده در نتیجه باعث کاهش بازدهی می‌شود. همچنین تنش فشاری غیر یکنواخت باعث ایجاد مقاومتهای اهمی غیریکنواخت در نقاط گوناگون می‌شود، بنابراین مقدار فشار اعمالی از طرف صفحات دوقطبی به لایه نفوذ گاز در تمامی سطح باید یکنواخت باشد. میزان تغییر شکل صفحات انتهایی، تأثیر مستقیمی بر توزیع فشار دارد. هرچقدر تغییر شکل کمتر باشد توزیع فشار یکنواخت‌تر است. تحقیقات زیادی در مورد تأثیر نیروی گیره‌بندی بر مقدار مقاومت الکتریکی صفحات انجام شده است. چانگ و همکاران [۱] در سال ۲۰۰۷ به بررسی تأثیر نیروی گیره‌بندی بر روی بازدهی پیل سوختی پرداختند. در این پژوهش تأثیر تنش فشاری بر مقدار تخلخل و مقاومت الکتریکی مورد بررسی قرار گرفت. لی و همکاران [۲] در سال ۱۹۹۹ تأثیر مقدار فشردگی لایه نفوذ گاز بر روی بازدهی پیل سوختی را مورد مطالعه قرار دادند. در این پژوهش، عنوان شد که افزایش بیش از اندازه نیروی فشاری باعث ننگ داشتن رطوبت و مانع دفع آن می‌شود. همچنین با افزایش فشار مقدار تخلخل کاهش، و مقدار رسانندگی افزایش یافت. زی و همکاران [۳] در سال ۲۰۰۹ به بهینه‌سازی نیروی گیره‌بندی پرداختند. در این پژوهش مدل سه‌بعدی ایجاد شد و در آن تأثیر نیروی گیره‌بندی بر روی لایه نفوذ گاز و خواص آن و عملکرد پیل سوختی مورد مطالعه قرار گرفت. سانگ بیوم و همکاران [۴] در سال ۲۰۱۰ به بررسی تأثیر نیروی گیره‌بندی بر بازدهی پیل سوختی پرداختند. در این پژوهش تأثیر میزان فشردگی لایه نفوذ گاز بر بازدهی پیل سوختی ۵ سلولی در دو حالت (یکی با فشردگی ۱۵ درصد و دیگری با فشردگی ۳۰ درصد لایه نفوذ گاز) به صورت آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج نشان داد که با افزایش مقدار فشردگی میزان بازدهی افزایش می‌یابد. همچنین پیل با ۳۰ درصد فشردگی در لایه نفوذ گاز بازدهی بیشتری نسبت به پیل دیگر داشته است. جابین و همکاران [۵] در سال ۲۰۰۶ به بررسی تأثیر مقدار تراکم لایه نفوذ گاز بر روی بازدهی پیل سوختی پرداختند. جان نی و همکاران [۶] به ارائه مدل مکانیکی-الکتریکی برای پیش‌بینی مقاومت الکتریکی بین صفحات دو قطبی و لایه نفوذ گاز پرداختند. همچنین تأثیر شعاع پخ زده شده در دیواره‌های کانال صفحات دو قطبی بر روی مقاومت الکتریکی مورد بررسی قرار گرفت. در مورد تنش فشاری و بهبود توزیع تنش فشاری بر روی لایه نفوذ گاز تحقیقات محدودی انجام شده که در ادامه به چند مورد از آن‌ها اشاره می‌شود. لی و همکاران [۷] در سال ۲۰۰۵ به بررسی توزیع فشار در پیل سوختی پرداختند. همچنین میزان تغییر شکل صفحه انتهایی به وسیله شبیه‌سازی مورد مطالعه قرار گرفت. بیتس و همکاران [۸] به بررسی تجربی و شبیه‌سازی توزیع فشار بر روی قسمت‌های مختلف پیل سوختی در فشارهای مختلف پرداختند. مونتانی و همکاران [۹] در سال ۲۰۱۱ به بررسی توزیع فشار و تغییر شکل صفحه انتهایی بر اثر نیروی گیره‌بندی بر روی پیل سوختی پرداختند. کارال و میلی [۱۰] به طراحی یک مدل المان محدود پرداختند و در این مدل تأثیر تعداد سلول‌های پیل سوختی را در توزیع فشار بر روی غشا مورد بررسی قرار دادند. دانگ و همکاران [۱۱] در سال ۲۰۰۷ به بررسی پارامترهای مونتاژ در

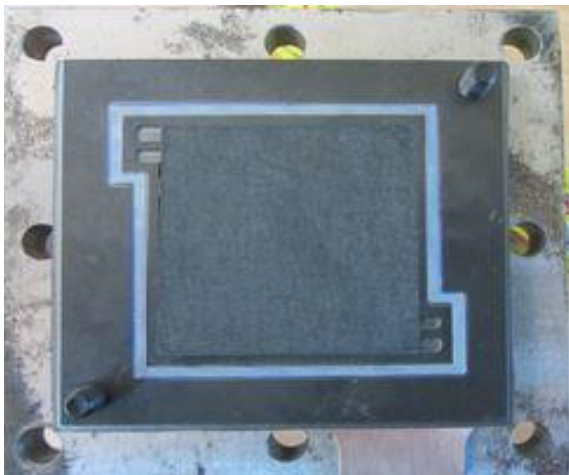


Fig. 2. Manufactured single cell.

شکل ۲: تک سلول ساخته شده و مورد بررسی قرار گرفته شده

جدول ۱: خواص مکانیکی قطعات مختلف پیل سوختی

Table 1. Mechanical properties of different components of the PEMFC.

نرخ کرنش	مدول یانگ MPa	جنس	قطعات
۰/۳	۲۱۰۰۰۰	فولادی	صفحه انتهایی
۰/۲۵	۵۱۰۰	گرافیت	صفحه دوقطبی
۰/۳۳	۱۰۰۰۰۰	مس	صفحه مسی

جدول ۲: تغییرات ضخامت بر حسب تنش فشاری در لایه نفوذ گاز

Table 2. Effects of the compressive stress on the GDL thickness.

تنش وارده	۵ psi	۱MPa	۲MPa
ضخامت GDL	۲۵۵μm	۱۹۱μm	۱۶۷μm

افزایش یافته و تغییر شکل صفحه انتهایی زیاد شده و توزیع فشار بر روی لایه نفوذ گاز کاهش می‌یابد. اگر عمق شیار بیش از اندازه افزایش یابد در فشار ثابت بر روی لایه نفوذ گاز، میزان تنش بر روی واشر کاهش یافته و باعث ایجاد نشتی در سیستم خواهد شد. همچنین تأثیر نیروی گیربندی و ضخامت صفحه انتهایی نیز در توزیع فشار لایه نفوذ گاز و تغییر شکل صفحه انتهایی مورد بررسی قرار گرفت. در انتها پس از بررسی پارامترهای مختلف و تأثیر آن بر روی لایه نفوذ گاز، پارامترها طوری انتخاب شده که بتوان به هدف مورد نظر در این پژوهش یعنی رسیدن به مقدار و توزیع فشار یکنواخت بر روی لایه نفوذ گاز در کمترین نیروی گیربندی دست یافت. در ضمن آب‌بندی سیستم نیز به صورت کامل انجام شود.

۲- تشریح مدل

برای بررسی پارامترهای مورد نظر، یک سلول طراحی و ساخته شد. برای کاهش زمان محاسبات، با توجه به تقارن موجود در یک سلول، نصف یک سلول طراحی و در شبیه‌سازی و بررسی پارامترها مورد استفاده قرار گرفته شد. در شکل ۱ نمایی از مدل طراحی شده نشان داده شده است.

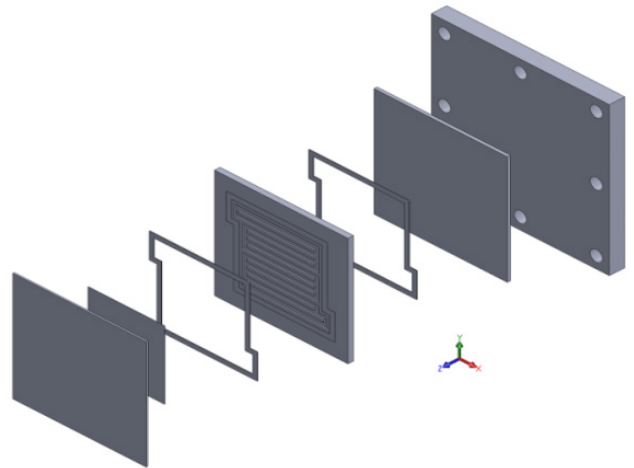


Fig. 1. Designed model to investigate the parameters.

شکل ۱: مدل طراحی شده برای بررسی پارامترها

این سلول شامل صفحه انتهایی، صفحه مسی، واشر، صفحه دوقطبی، لایه نفوذ گاز و یک صفحه صلب است. سطح فعال لایه نفوذ گاز ۵۰ ۵۰ میلی‌متر در نظر گرفته شد. مدل با دقت بالا با توجه به معیارهای طراحی و ساخته شد. در شکل ۲ نمایی از سلول ساخته شده نشان داده شده است. خواص مکانیکی قطعات مختلف در جدول ۱ نشان داده شده است. همچنین خواص لایه نفوذ گاز با توجه به خواص ارائه شده شرکت سازنده در جدول ۲ نشان داده شده است.

واشر دارای خواص هایپر الاستیک بوده و با توجه به این موضوع، نمونه تست فشار برای قطعه گرفته شد و خواص آن در شبیه‌سازی مورد استفاده گرفت. در شکل ۳ نمودار تست فشار نمونه نشان داده شده است.

با توجه به ماهیت کار، برای انجام شبیه‌سازی از ماژول استاتیک^۲ استفاده شد. برای اعمال نیروی گیره‌بندی در عمل از پیچ استفاده شد. همچنین به منظور ساده‌سازی، به جای استفاده از پیچ در شبیه‌سازی، در محل قرارگیری واشر تنش فشاری اعمال شد. در شکل ۵ نمایی از نحوه اعمال نیرو نشان داده شده است.

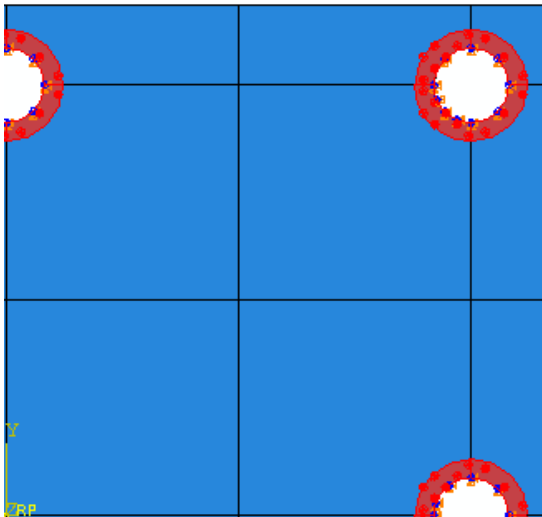


Fig. 5. Configuration of clamping force.

شکل ۵: محل اعمال نیروی گیره بندی

مقدار تنش فشاری بر روی لایه نفوذ گاز بین ۰/۵ MPa تا ۱/۵ MPa است. با توجه به این موضوع برای تأمین این تنش در ناحیه پیچ، مقدار تنش فشاری بین ۹ MPa تا ۱۲ MPa قابل اعمال در نظر گرفته شد. با بخش‌بندی‌های مناسب، مش‌بندی به صورت منظم انجام شده تا دقت در شبیه‌سازی به حد مناسب برسد. در شکل ۶ نمایی از مش قطعات نشان داده شده است.

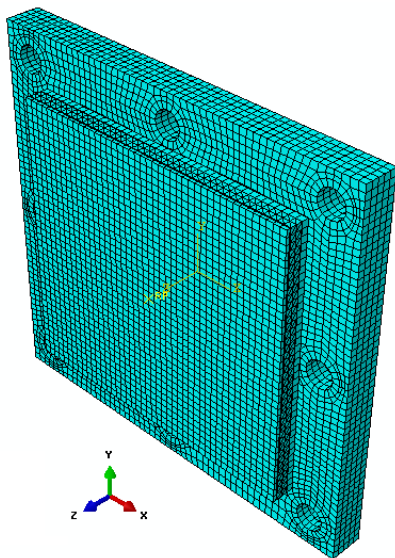


Fig. 6. Structured mesh of the single cell.

شکل ۶: مش منظم ایجاد شده در تک سلول

واشر دارای خواص هایپر الاستیک بوده و با توجه به این موضوع، نمونه تست فشار برای قطعه گرفته شد و خواص آن در شبیه‌سازی مورد استفاده گرفت. در شکل ۳ نمودار تست فشار نمونه نشان داده شده است.

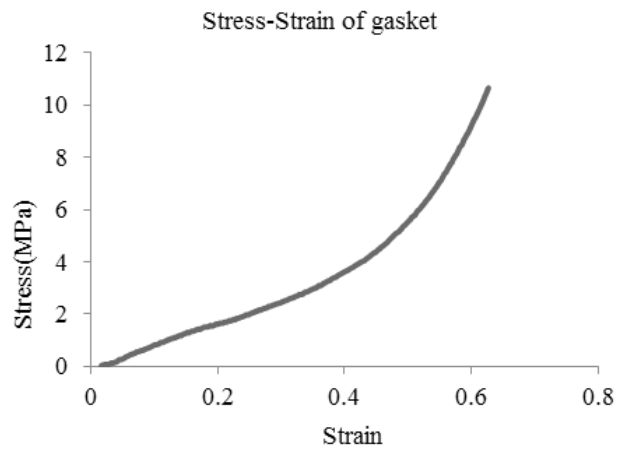


Fig. 3. Stress-strain curve of the gasket.

شکل ۳: نمودار تنش-کرنش واشر

۳- شبیه‌سازی

برای شبیه‌سازی تک سلول با توجه به شرایط مورد نظر از نرم‌افزار آباکوس^۱ استفاده شده است. در شکل ۴ نمایی از مدل نشان داده شده است:

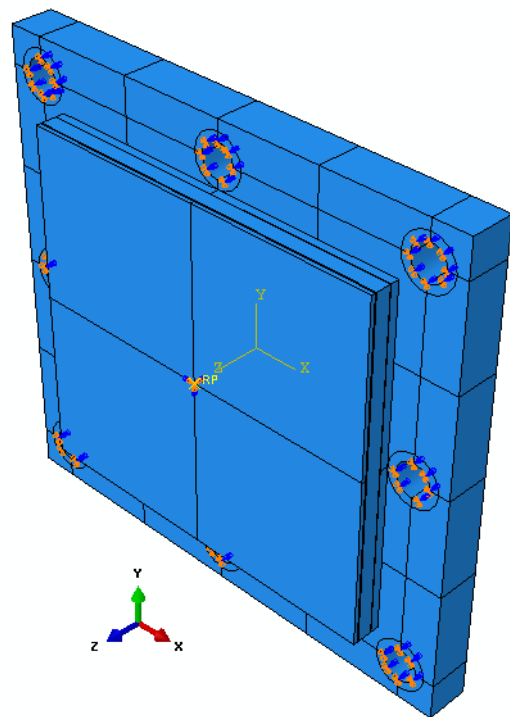


Fig. 4. The modeled single cell for simulation.

شکل ۴: تک سلول مدل شده برای شبیه‌سازی

۴- تست نشتی

سوخت مورد استفاده در پیل‌های سوختی پلیمری، هیدروژن است. این سوخت با اکسیژن واکنش شیمیایی می‌دهد که نتیجه آن، تولید انرژی الکتریکی است. این دو عنصر در دو طرف کاتالیست هستند و واکنش انجام می‌شود. خارج شدن این دو عنصر از پیل سوختی باعث ایجاد نشتی در سیستم شده که باعث کاهش بازدهی پیل سوختی و ایجاد خطر می‌شود. برای جلوگیری از نشتی، از واشرها در بین اجزاء پیل سوختی استفاده می‌شود. با اعمال فشار مناسب بر روی واشرها، سیستم آب‌بند شده و نشتی اتفاق نمی‌افتد. مقدار تنش اعمالی برای جلوگیری از نشتی، تأثیر زیادی در مقدار نیروی گیربندی و در نتیجه بازدهی پیل سوختی دارد. اگر مقدار نیروی گیربندی کم باشد، مقدار تنش وارده بر واشر کم بوده و باعث نشتی در سیستم می‌شود. اگر نیروی گیربندی زیاد شود، باعث افزایش تغییر شکل صفحه انتهایی شده و یکنواختی توزیع فشار بر روی لایه نفوذ گاز را کاهش می‌دهد. در نتیجه با اعمال حداقل تنش مورد نیاز برای آب‌بندی، می‌توان حداقل نیروی گیربندی را به دست آورد و حداقل تغییر شکل را در اجزاء پیل سوختی به وجود آورد. در این قسمت سعی شده است مقدار تنش مورد نیاز بر روی واشر با ابعاد معین در این سلول برای آب‌بند شدن محاسبه شود. در شکل ۷ مشخصات هندسی واشر مورد استفاده نشان داده شده است.

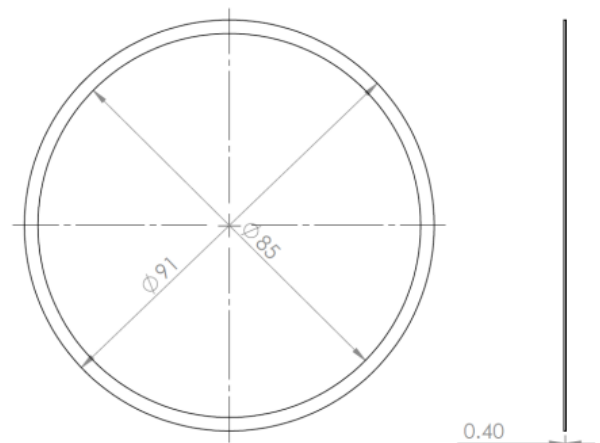


Fig. 7. Schematic of gasket for leakage test.

شکل ۷: هندسه واشر برای تست نشتی

برای انجام این کار یک سیستم طراحی شد که با استفاده از آن مقدار نشتی در تنش‌های فشاری مختلف محاسبه می‌شود. در شکل ۸ نمایی از سیستم ساخته شده نشان داده شده است.

برای انجام تست به جای استفاده از گاز هیدروژن، به دلیل خطر بالا، از گاز نیتروژن استفاده شد. از این رو با توجه به استاندارد [۱۸]، مقدار فشار مورد استفاده ۳ bar در نظر گرفته شد. همچنین برای تنظیم فشار از رگولاتور و برای ایجاد تنش فشاری بر روی واشر از دستگاه پرس استفاده شد. در شکل ۹ نمایی از این تست نشان داده شده است.

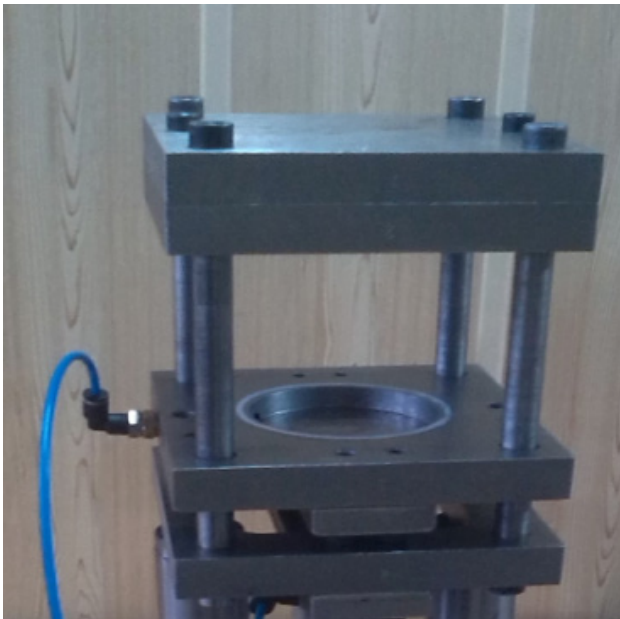


Fig. 8. Designed setup for leakage analysis.

شکل ۸: سیستم طراحی شده برای بررسی نشتی



Fig. 9. Designed setup for leakage test.

شکل ۹: نمایی از سیستم طراحی شده برای اندازه‌گیری مقدار نشتی

در جداول ۳ تا ۵ مقدار افت فشار در داخل مخزن به ازای تنش‌های متفاوت بر روی واشر نشان داده شده است.

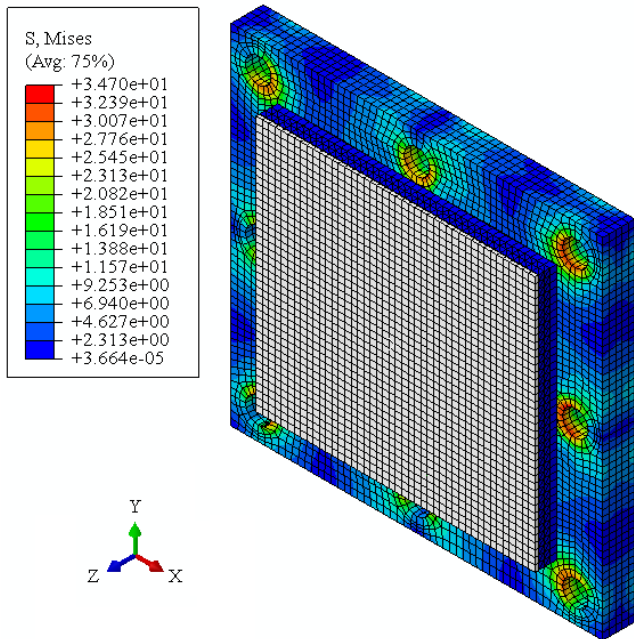


Fig. 10. Simulation on the model with 10 MPa of clamping force.

شکل ۱۰: شبیه‌سازی انجام شده برای مدل با نیروی گیره‌بندی ۱۰ MPa

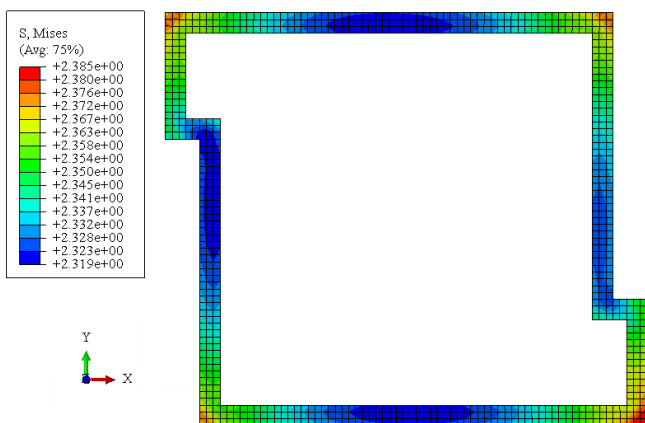


Fig. 11. Stress distribution over the gasket after applying of clamping force.

شکل ۱۱: توزیع تنش بر روی واشر پس از اعمال نیروی توزیع تنش بر روی واشر پس از اعمال نیروی گیره‌بندی

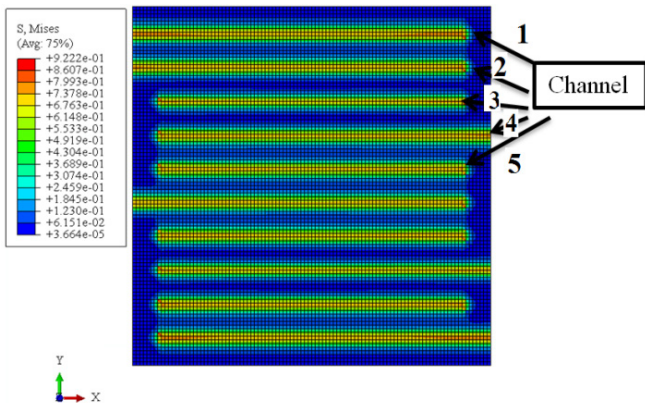


Fig. 12. Stress distribution over the gas diffusion layer.

شکل ۱۲: توزیع تنش بر روی لایه نفوذ گاز

جدول ۳: مقدار افت فشار در مخزن در زمان‌های مختلف در تنش

بر روی واشر ۱/۶ MPa

Table 3. Pressure drop at different times for 1.6 MPa stress on the gasket.

زمان (min)	۰	۴	۱۲	۱۹	۲۴	۲۸
مقدار فشار مخزن	۳	۲/۹	۲/۸	۲/۷	۲/۶	۲/۵

جدول ۴: مقدار افت فشار در مخزن در زمان‌های مختلف در تنش

بر روی واشر ۱/۸ MPa

Table 4. Pressure drop at different times for 1.8 MPa stress on the gasket.

زمان (min)	۰	۳	۶	۲۰	۲۷	۳۴
مقدار فشار مخزن	۳	۲/۹	۲/۸	۲/۷	۲/۶	۲/۵

جدول ۵: مقدار افت فشار در مخزن در زمان‌های مختلف در تنش

بر روی واشر ۱/۹۵ MPa

Table 5. Pressure drop at different times for 1.95 MPa stress on the gasket.

زمان (min)	۰	۳	۱۲	۱۹	۲۶
مقدار فشار مخزن	۳	۲/۹	۲/۸	۲/۷	۲/۵

با توجه به استاندارد [۱۸]، اگر مقدار افت فشار در سیستم در مدت زمان ۱۰ دقیقه کمتر از ۰/۱ bar باشد، آب‌بندی به صورت کامل انجام می‌شود. در این تست مشخص شد با اعمال فشار حداقل ۲ MPa بر روی واشر آب‌بندی به صورت کامل انجام می‌شود. از این نتیجه برای محاسبه پارامترهای مناسب جهت توزیع فشار یکنواخت‌تر استفاده شد.

۵- نتایج

۱-۱- نتایج شبیه‌سازی

برای درک بهتر از هدف پژوهش، نتایج یکی از شبیه‌سازی‌های انجام شده در صفحه انتهایی با ضخامت ۱۰ mm و مقدار تنش گیره‌بندی ۱۰ MPa در شکل ۱۰ نشان داده شد.

توزیع تنش بر روی واشر در شکل ۱۱ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، حداقل مقدار تنش بر روی واشر برابر با ۲/۳۱۷ MPa می‌باشد. با توجه به تست نشستی، آب‌بندی به صورت کامل انجام شد.

توزیع فشار بر روی لایه نفوذ گاز در شکل ۱۲ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مقدار تنش فشاری در محل تماس دیواره کانال‌های صفحه دوقطبی با لایه نفوذ گاز بیشتر است. مقدار توزیع تنش در هر کدام از این محل‌های تماس متفاوت است. برای ۵ محل تماس دیواره کانال با لایه نفوذ گاز، توزیع تنش به صورت جداگانه اندازه‌گیری و در شکل ۱۳ نشان داده شد.

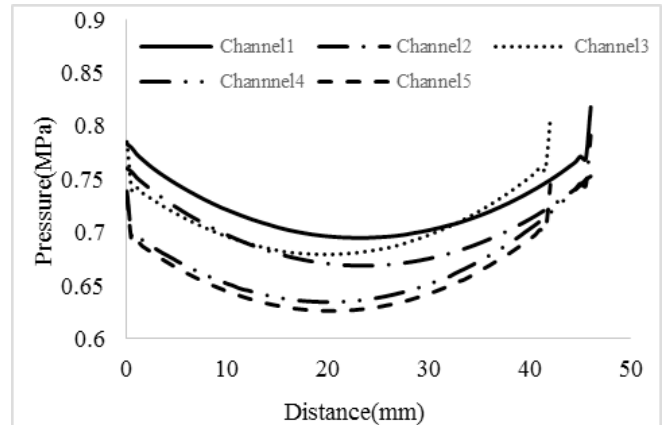
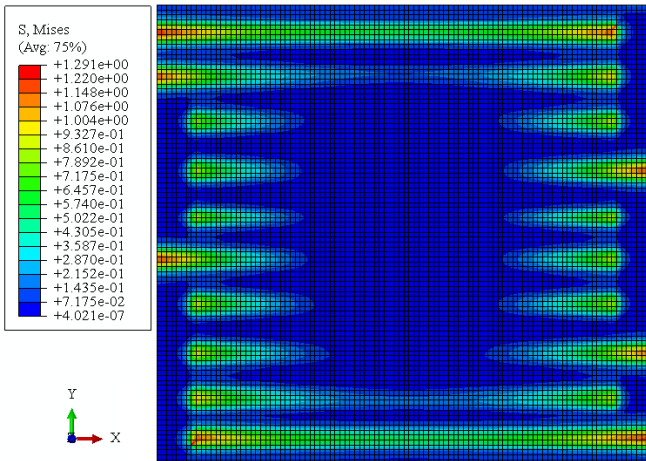


Fig. 13. Stress distribution over the GDL for five initial channels of the bipolar plate.

شکل ۱۳: مقدار توزیع تنش بر روی لایه نفوذ گاز در اثر ۵ کانال اول صفحه دوقطبی

همان طور که مشاهده می شود مقدار تنش از گوشه به وسط هر کانال کاهش می یابد. همچنین مقدار تنش از کانال ۱ به ۵ رو به کاهش است. مقدار تنش مناسب بر روی لایه نفوذ گاز ۱ MPa در نظر گرفته شده است که با توجه به نتایج به دست آمده مقدار تنش کمتر از این مقدار است. با توجه به نتایج شبیه سازی، مشخص شد که پارامترهای مورد استفاده مناسب انتخاب نشده است. در ادامه به بررسی پارامترهای تأثیرگذار پرداخته شده است.

۱-۲- تأثیر عمق کانال محل قرارگیری واشر بین صفحه مسی و صفحه دوقطبی

برای کنترل واکنش و تعادل دمایی از آب استفاده شده است. برای کنترل دما، از تعدادی کانال پشت صفحه دوقطبی استفاده شده که با عبور آب از این کانال ها، دمای سیستم کنترل می شود. برای جلوگیری از نشتی آب، از واشر با ضخامت ۰/۴ mm استفاده شد. ابتدا میزان عمق شیار ۰/۱ mm در نظر گرفته شد که در نیروهای گیره بندی متفاوت و ضخامت های مختلف صفحه انتهایی، توزیع فشار بر روی لایه نفوذ گاز بسیار غیر یکنواخت به دست آمد. در شکل ۱۴ توزیع فشار بر روی لایه نفوذ گاز و فیلم فشار نشان داده شده است. دلیل این غیر یکنواختی فشار بر روی لایه نفوذ گاز با وجود تغییر نیروی گیره بندی و دیگر پارامترها را می توان به عدم تماس بین صفحه مسی و صفحه دوقطبی، به دلیل کم بودن عمق کانال نسبت داد. در صورتی که تماس بین صفحه مسی و صفحه دوقطبی ایجاد نشود، جریان الکتریکی برقرار نشده و باعث اختلال در سیستم می شود. با افزایش عمق کانال به ۰/۳ mm این تماس ایجاد شده و توزیع فشار یکنواخت تر شد.

۱-۳- تأثیر عمق کانال محل قرارگیری واشر بین لایه نفوذ گاز و صفحه دوقطبی

با توجه به اطلاعات شرکت سازنده لایه نفوذ گاز، فشار مناسب بر روی لایه نفوذ گاز، ۱ MPa یا ۱۰ bar است. حداقل فشار برای جلوگیری از نشتی

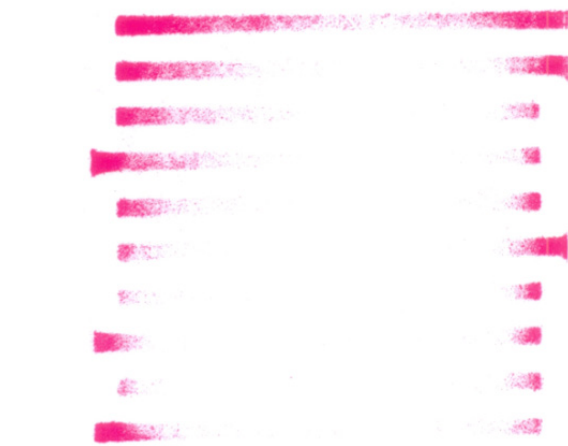


Fig. 14. Stress distribution over the GDL at 0.1 mm of channel depth.

شکل ۱۴: توزیع فشار بر روی لایه نفوذ گاز در عمق کانال ۰/۱ mm

نیز برابر با ۲ MPa به دست آمد. اگر عمق کانال مربوط به قرارگیری واشری کم در نظر گرفته شود، برای رسیدن تنش وارده بر لایه نفوذ گاز، به یک مقدار معین، باید نیروی گیره بندی افزایش یابد. در نتیجه میزان تغییر شکل صفحه انتهایی افزایش و توزیع تنش بر روی لایه نفوذ گاز کاهش می یابد. اگر عمق کانال بیش از اندازه در نظر گرفته شود نشتی اتفاق خواهد افتاد. رسیدن همزمان به آب بندی و تنش مناسب بر روی لایه نفوذ گاز باعث افزایش یکنواختی توزیع تنش بر روی لایه نفوذ گاز می شود. برای این منظور دو راه وجود دارد: (۱) ضخامت واشر متغیر باشد که امکان این کار وجود ندارد، (۲) عمق محل قرارگیری واشر متغیر باشد. در این پژوهش عمق کانال به عنوان متغیر در نظر گرفته شده است.

در شکل ۱۵ نمایی از محل قرارگیری واشر در صفحه دوقطبی نشان داده شده است.

برای بررسی تأثیر عمق شیار، این پارامتر بین ۰/۱ mm تا ۰/۱۵ mm تغییر کرده و تأثیر آن بر روی فشار اعمالی بر لایه نفوذ گاز در نیروهای مختلف گیره بندی، مورد بررسی قرار گرفته است. در شکل ۱۶ در نیروی گیره بندی ثابت ۱۰ MPa، مقدار توزیع تنش در شیار اول برای عمق های مختلف نشان داده شده است.

جدول ۶: تأثیر عمق کانال بر مقدار تنش بر روی لایه نفوذ گاز و واشر

Table 6. Effects of channel depth on the stress over the gasket and the GDL.

عمق شیار بر حسب mm	مقدار میانگین انحراف تنش بر روی لایه نفوذ گاز بر حسب bar	مقدار تنش بر روی واشر بر حسب bar
۰/۱	۳/۰۹۹-	۲۳/۱۷
۰/۱۱	۱/۵۴۱-	۲۲/۴۲
۰/۱۲	۳۰۲۲۹+/	۲۱/۶۶
۰/۱۳	۰/۹۹۹+	۲۰/۹۷
۰/۱۴	۱/۹۹۱+	۲۰/۲۷
۰/۱۵	۳/۰۱۵+	۱۹/۵۶

می‌شود. در نیروی گیره‌بندی ۱۰ MPa، میزان عمق شیار ۰/۱۵ mm باعث بروز نشتی خواهد شد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که میزان عمق شیار از یک مقدار خاص نمی‌تواند کاهش یابد.

۱-۴- ضخامت صفحه انتهایی

در این قسمت تأثیر ضخامت صفحه انتهایی بر توزیع فشار بر روی لایه نفوذ گاز مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای این منظور از ضخامت‌های ۸، ۱۰ و ۱۲ میلی‌متر استفاده شد. در شکل ۱۷ توزیع فشار در نیروی گیره‌بندی ۱۱ MPa و عمق شیار ۰/۱۱ mm برای ۳ ضخامت مورد نظر در ۳ شیار اول نشان داده شده است.

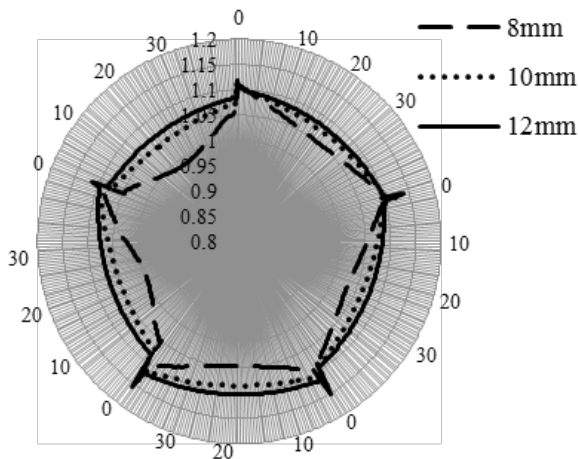


Fig. 17. Effect of thickness of the end plate on stress distribution over the GDL.

شکل ۱۷: تأثیر ضخامت صفحه انتهایی بر توزیع تنش بر روی لایه نفوذ گاز

همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش ضخامت صفحه انتهایی، توزیع تنش بر روی لایه نفوذ گاز یکنواخت‌تر می‌شود. همچنین میزان فشار اعمالی در گوشه‌ها بیشترین مقدار می‌باشد. میزان انحنای ایجاد شده در نیروی گیره‌بندی ۱۱ MPa و ضخامت

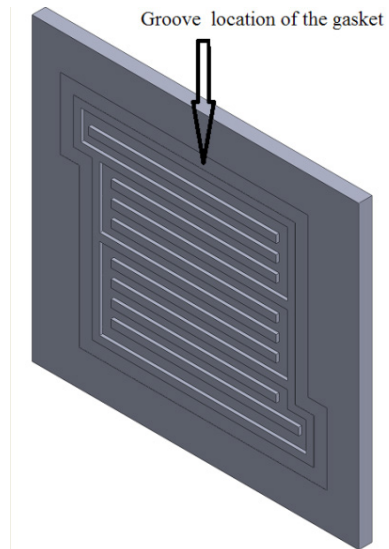


Fig. 15. Location of gasket on the bipolar plate.

شکل ۱۵: محل قرارگیری واشر آب‌بندی

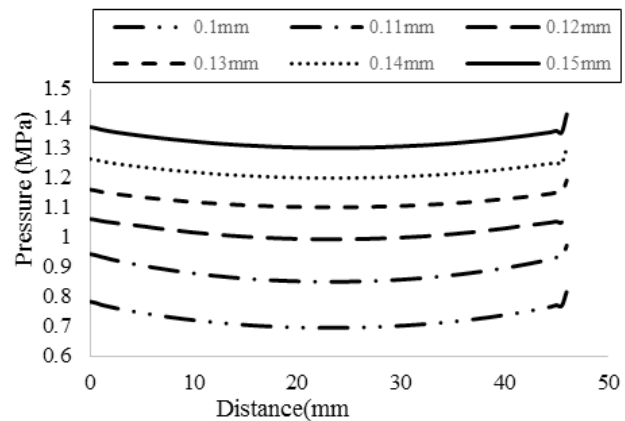


Fig. 16. Effects of channel depth on the value of stress and stress distribution over the GDL.

شکل ۱۶: تأثیر عمق کانال بر مقدار و توزیع تنش بر روی لایه نفوذ گاز

همان‌طور که مشاهده شد با افزایش عمق شیار در صفحه دو قطبی مقدار فشار بر روی لایه نفوذ گاز افزایش می‌یابد. همچنین میزان عمق شیار بر حداقل تنش اعمالی به واشر نیز تأثیرگذار است. در جدول ۶ این تغییرات نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش عمق شیار میزان حداقل تنش کاهش یافته است. میانگین مقدار انحراف تنش وارده بر روی لایه نفوذ گاز در هر المان در محل اعمال نیروی کانال‌ها نسبت به مقدار معین ۱ MPa یا ۱۰ bar نیز نشان داده شده است.

با توجه به نتایج، با افزایش عمق شیار بر روی صفحه دو قطبی در نیروی گیره‌بندی ثابت، میزان فشار اعمالی بر روی لایه نفوذ گاز افزایش می‌یابد، که می‌توان نتیجه گرفت در نیروی گیره‌بندی کمتر می‌توان به فشار مورد نظر بر روی لایه نفوذ گاز رسید. این موجب می‌شود میزان تغییر شکل صفحه انتهایی کاهش و توزیع فشار بر روی لایه نفوذ گاز افزایش یابد. از طرف دیگر با افزایش عمق شیار میزان تنش بر روی واشر کاهش یافته و باعث نشتی

کانال را نشان می‌دهد.

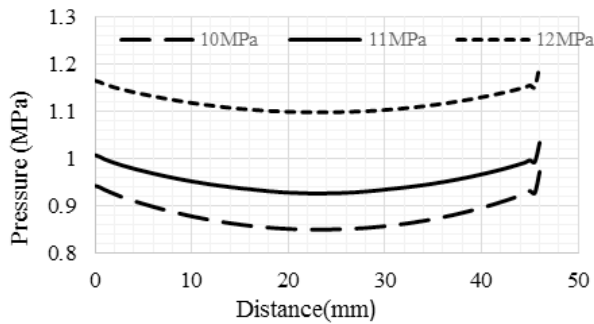


Fig. 20. Effects of clamping pressure on pressure distribution over GDL.

شکل ۲۰: تأثیر نیروی گیره‌بندی بر توزیع تنش بر روی لایه نفوذ گاز

همان‌طور که مشاهده می‌شود میزان تغییر شکل در گوشه‌ها بیشترین مقدار می‌باشد. در شکل ۱۹ میزان حداکثر تغییر شکل در ضخامت‌های مختلف در نیروهای گیره‌بندی متفاوت نشان داده شده است.

۱-۶- انتخاب پارامترهای مناسب

در قسمت‌های قبلی تأثیر پارامترهای مختلف بر توزیع فشار بر روی لایه نفوذ گاز نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود برای انتخاب مناسب پارامترها و رسیدن به هدف مورد نظر این پژوهش که همان یکنواختی تنش و حداقل انحراف از تنش مدنظر بر روی لایه نفوذ گاز می‌باشد، شبیه‌سازی‌های زیادی انجام شده و پارامترهای مختلف مورد بررسی قرار گرفته شده است. در جدول ۷ پارامترهای مورد بررسی در شبیه‌سازی نشان داده شده است.

جدول ۷: پارامترهای مورد بررسی

Table 7. Under study parameters.

پارامترهای مورد بررسی	سطوح مورد بررسی
ضخامت صفحه mm	۸، ۱۰، ۱۲
عمق شیار mm	۰/۱، ۰/۱۱، ۰/۱۲، ۰/۱۳، ۰/۱۴، ۰/۱۵
نیرو MPa	۹، ۱۰، ۱۱

نتایج استخراج شده از شبیه‌سازی مقدار انحراف معیار تنش لایه نفوذ گاز از ۱۰ bar می‌باشد. در مجموع با توجه به پارامترهای مورد بررسی، تعداد ۵۴ شبیه‌سازی انجام شده و نتایج آن در مدل‌سازی و بهینه‌سازی شبکه عصبی مورد استفاده قرار گرفت.

۱-۶-۱- روش پیشنهادی برای به دست آوردن پارامترهای مناسب

در روش پیشنهادی به منظور دستیابی به توزیع فشار یکنواخت، از الگوریتم زنبور به منظور پیدا کردن مقادیر بهینه پارامترهای هندسی شامل ضخامت صفحه، عمق شیار و اندازه نیروی گیره‌بندی استفاده شد. شکل ۲۱

۸mm در صفحه انتهایی در شکل ۱۸ برای صفحه انتهایی نشان داده شده است.

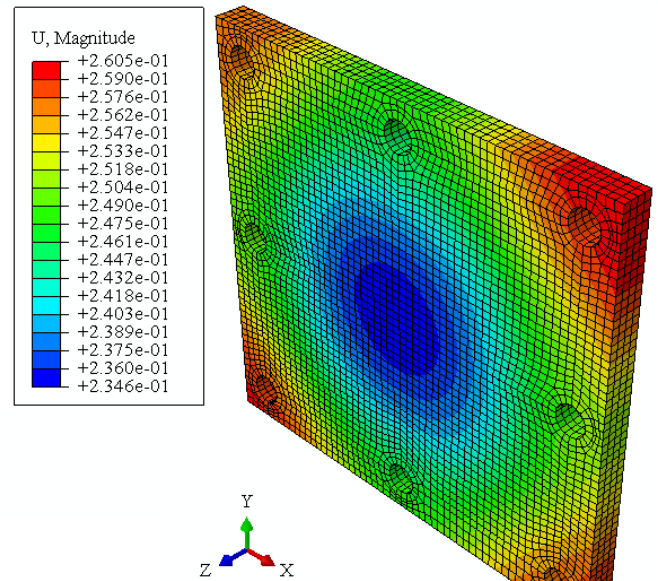


Fig. 18. The result curvature on the 8 mm plate due to 11 MPa of clamping pressure.

شکل ۱۸: میزان انحنای ایجاد شده در صفحه ۸mm با نیروی گیره‌بندی ۱۱MPa

همان‌طور که مشاهده می‌شود میزان تغییر شکل در گوشه‌ها بیشترین مقدار می‌باشد. در شکل ۱۹ میزان حداکثر تغییر شکل در ضخامت‌های مختلف در نیروهای گیره‌بندی متفاوت نشان داده شده است.

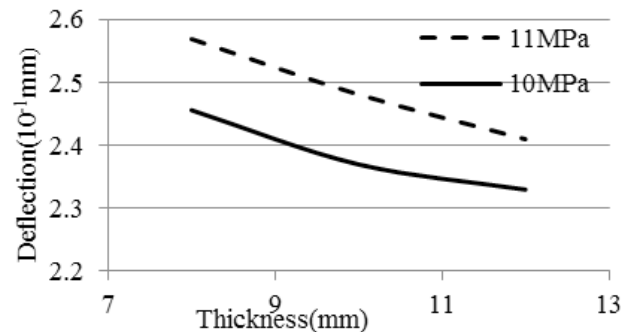


Fig. 19. Effects of clamping pressure and the thickness on the deformation of end plate.

شکل ۱۹: میزان انحنای ایجاد شده در صفحه ۸mm با نیروی گیره‌بندی ۱۱MPa

۱-۵- نیروی گیره‌بندی

برای تأمین تنش فشاری بین صفحات دو قطبی و لایه نفوذ گاز و همچنین آب‌بندی سیستم از نیروی گیره‌بندی استفاده شده است. نیروی گیره‌بندی تأثیر زیادی در مقدار تنش فشاری لایه نفوذ گاز دارد. در شکل ۲۰ تأثیر نیروی گیره‌بندی در مقدار تنش فشاری وارده بر لایه نفوذ گاز در اولین

با توجه به این که هدف در این پژوهش کاهش نیروی وزن و افزایش توزیع تنش می باشد و به دلیل درجه اهمیت هر دو هدف، تابع وزنی هر کدام مشخص شده است. در این پژوهش با توجه به این که توزیع تنش اهمیت بیشتری دارد، تابع وزنی مربوطه یعنی W_1 ، ۹۰ درصد و تابع وزنی W_2 ، ۱۰ درصد در نظر گرفته شد.

الگوریتم زنبور باید مقادیر پارامترهای هندسی را طوری پیدا کند که مقدار تابع هدف بالا، حداقل شود. در قسمت دوم روش پیشنهادی، الگوریتم زنبور مقادیر پارامترهای هندسی را جستجو می کند و برای ارزیابی جوابها از شبکه عصبی شعاعی ساخته شده در قسمت قبل استفاده می کند. جوابی که منجر به کمترین مقدار تابع هدف شود، به عنوان جواب بهینه انتخاب می شود.

۱-۶-۲- نتایج بهینه سازی

در این آزمایش از شبکه عصبی تابع شعاعی به عنوان تخمین گر استفاده شد. همچنین تعداد توابع شعاعی و مقدار پراکندگی نیز به ازای مقادیر مختلف تست شد. در شبکه عصبی ساخته شده از ۱۷ تابع شعاعی با پراکندگی ۲/۶۹۱ کمترین خطا به دست آمد. این خطا برابر با ۰/۰۱۵ است. در شکل ۲۲ میزان دقت شبکه نشان داده شده است که در این شکل خط چین نشان دهنده مقدار واقعی انحراف فشار است که در آزمایشها به دست آمده و خط کامل، نشان دهنده خروجی شبکه عصبی می باشد.

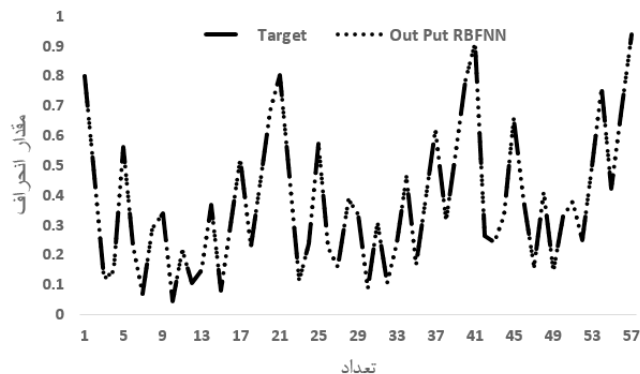


Fig. 22. The accuracy of neural network in this work.

شکل ۲۲: میزان دقت شبکه

در مرحله بعد، از شبکه عصبی ساخته شده همراه با الگوریتم زنبور، جهت پیدا کردن مقادیر بهینه پارامترها استفاده شده است. نتایج به دست آمده در جدول ۸ لیست شده است.

جدول ۸: پارامترهای مناسب به دست آمده

Table 8. Final parameters using optimization.

پارامترها	نیروی گیره بندی	عمق کانال	ضخامت
مقادیر	قرارگیری واشر	صفحه انتهایی	
۸/۹MPa	۰/۱۲۵μm	۸/۷mm	

ساختار کلی روش پیشنهادی را نشان می دهد.

روش پیشنهادی از دو بخش اصلی تشکیل شده است. در بخش اول، براساس داده های به دست آمده از آزمایشها در شرایط مختلف، رابطه موجود بین مقادیر مختلف پارامترهای هندسی و مقدار انحراف در توزیع فشار به دست آمده است. برای این کار از شبکه عصبی شعاعی RBFNN استفاده شد. به این منظور از پارامترهای هندسی با مقادیر مختلف به عنوان ورودی شبکه عصبی شعاعی و از مقدار انحراف در توزیع فشار به عنوان خروجی استفاده شد. شبکه عصبی شعاعی باید با کمترین خطا، رابطه ای بین پارامترهای هندسی و مقدار انحراف در توزیع فشار پیدا کند. پس از اینکه شبکه عصبی مورد نظر ساخته شد، با استفاده از الگوریتم زنبور مقادیری از پارامترهای هندسی جستجو می شود که منجر به کمترین انحراف در توزیع فشار شود.

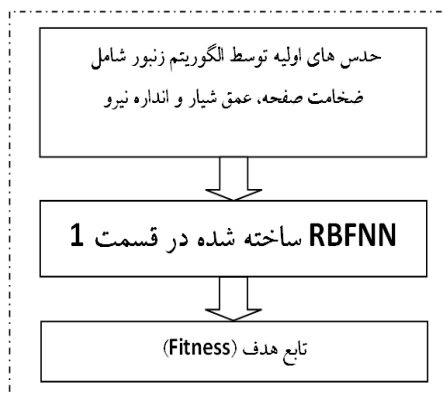
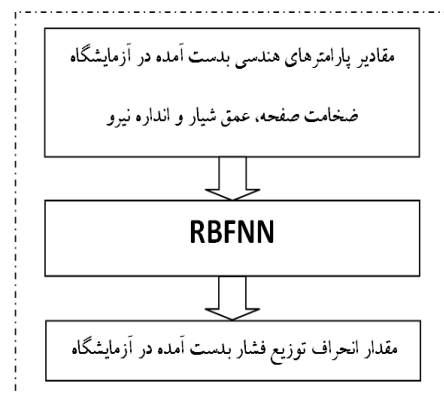


Fig. 21. Suggested structure for optimization

شکل ۲۱: ساختار پیشنهادی بهینه سازی

تعریف مناسب تابع هدف یکی از مهم ترین بخشها در هر مسئله بهینه سازی می باشد. در روش پیشنهادی از مقدار انحراف توزیع فشار و وزن در تعریف تابع هدف استفاده شده است. تعریف ریاضی تابع هدف توسط معادله (۱) نشان داده شده است.

$$Fitness = W_1 \times Deviation + W_2 \times Weight \quad (1)$$

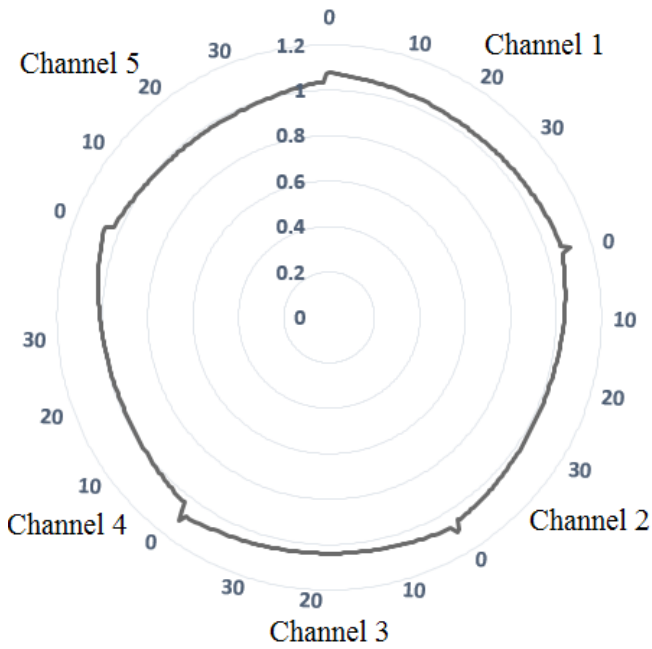


Fig. 25. Pressure distribution over GDL at resultant parameters of optimization.

شکل ۲۵: توزیع تنش بر روی لایه نفوذ گاز در پارامترهای انتخاب شده

۶- نتیجه‌گیری

در این پژوهش ابتدا یک مجموعه تست آزمایشگاهی برای بررسی میزان تنش مورد نیاز بر روی واشر برای آب‌بندی کامل طراحی شد. در ادامه مقدار حداقل تنش بر روی واشر برای آب‌بندی در یک پیل سوختی به دست آمده و برابر با ۲ MPa می‌باشد. در ادامه به بررسی پارامترهای تاثیرگذار بر روی توزیع فشار لایه نفوذ گاز پرداخت شد که نتایج آن در ادامه توضیح داده شده است. تأثیر عمق شیار بر روی توزیع فشار و مقدار فشار ایجاد شده بر روی لایه نفوذ گاز مورد بررسی قرار گرفت و مشاهده شد که با افزایش عمق شیار محل قرارگیری واشر، مقدار تنش ایجاد شده بر روی لایه نفوذ گاز افزایش می‌یابد. همچنین مشاهده شد با افزایش عمق شیار در صفحه دوقطبی، حداقل تنش ایجاد شده در واشر کاهش یافته و امکان نشتی وجود دارد. مشاهده شد با افزایش ضخامت صفحه انتهایی، توزیع تنش نیز در لایه نفوذ گاز بهبود قابل ملاحظه‌ای ایجاد می‌شود. تأثیر نیروی گیره‌بندی نیز مورد بررسی قرار گرفته و با افزایش نیروی گیره‌بندی میزان تنش بر لایه نفوذ گاز افزایش یافته می‌یابد. در انتها با بررسی پارامترهای مختلف و انجام شبیه‌سازی‌های مختلف، پارامترهای مناسب برای رسیدن به هدف پژوهش، به دست آمد. با توجه به پارامترهای مورد نظر، در حداقل نیروی گیره‌بندی و در کمترین تغییر شکل بر روی صفحه انتهایی مقدار تنش بر روی لایه نفوذ گاز به مقدار مورد نظر رسیده همچنین به صورت هم‌زمان مقدار تنش به حداقل مقدار لازم برای جلوگیری نشتی رسید. با بررسی نتایج مشخص شد، مقدار توزیع تنش بر روی لایه نفوذ گاز نیز یکنواخت‌تر شده است.

در پارامترهای فوق تنش بر روی لایه نفوذ گاز به مقدار ۱ MPa رسیده است. همچنین به صورت هم‌زمان مقدار تنش بر روی واشر به مقدار مورد نظر برای ایجاد آب‌بندی رسیده است. در شکل ۲۳ نمایی از واشر نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، حداقل تنش بر روی واشر ۲/۰۹ MPa می‌باشد که نشتی اتفاق نمی‌افتد. بیشترین مقدار تنش در گوشه‌های واشر بوده و وسط دارای حداقل تنش فشاری می‌باشد.

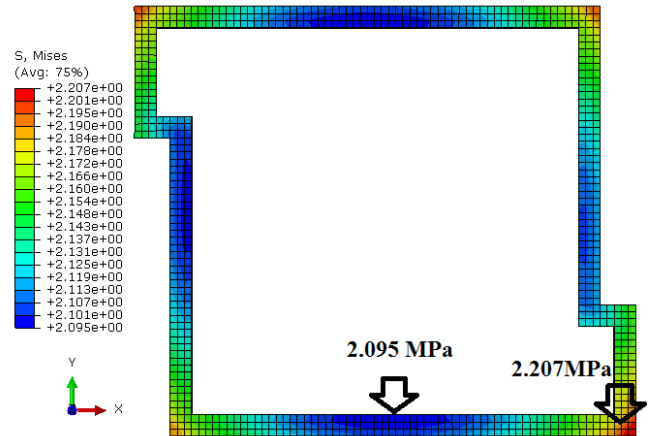


Fig. 23. Pressure distribution over the gasket at selected parameters.

شکل ۲۳: توزیع تنش بر روی واشر در پارامترهای انتخاب شده

توزیع تنش بر روی لایه نفوذ گاز در شکل ۲۴ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، توزیع تنش یکنواخت شده است.

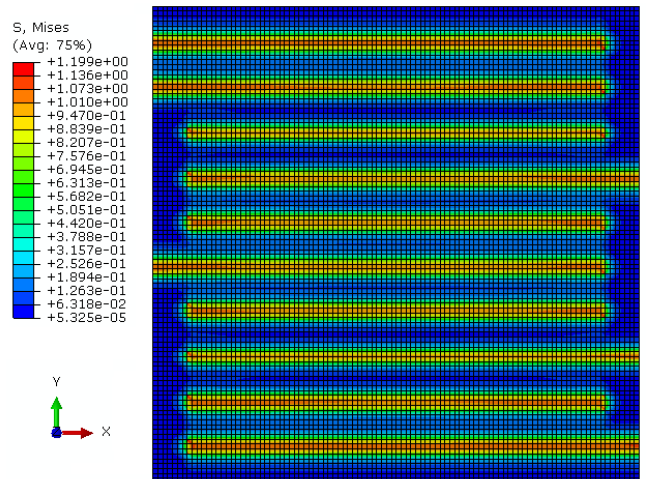


Fig. 24. Pressure distribution over the GDL at selected parameters.

شکل ۲۴: توزیع تنش بر روی لایه نفوذ گاز در پارامترهای انتخاب شده

مقدار تنش در ۵ کانال اول در شکل ۲۵ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود توزیع تنش بر روی لایه نفوذ گاز در ۵ کانال یکنواخت شده و مقدار تنش در حدود ۱ MPa تغییر کرده است که مدنظر این پژوهش می‌باشد.

- image correlation techniques, *Journal of Power Sources*, 196(20) (2011) 8484-8493.
- [10] C. Carral, P. Mélé, A numerical analysis of PEMFC stack assembly through a 3D finite element model, *International Journal of Hydrogen Energy*, 39(9) (2014) 4516-4530.
- [11] D.a. Liu, X. Lai, J. Ni, L. Peng, S. Lan, Z. Lin, Robust design of assembly parameters on membrane electrode assembly pressure distribution, *Journal of Power Sources*, 172(2) (2007) 760-767.
- [12] X. Wang, Y. Song, B. Zhang, Experimental study on clamping pressure distribution in PEM fuel cells, *Journal of Power Sources*, 179(1) (2008) 305-309.
- [13] S. Asghari, M.H. Shahsamandi, M.R. Ashraf Khorasani, Design and manufacturing of end plates of a 5kW PEM fuel cell, *International Journal of Hydrogen Energy*, 35(17) (2010) 9291-9297.
- [14] H.N. Yu, S.S. Kim, J.D. Suh, D.G. Lee, Composite endplates with pre-curvature for PEMFC (polymer electrolyte membrane fuel cell), *Composite Structures*, 92(6) (2010) 1498-1503.
- [15] P. Zhou, P. Lin, C.W. Wu, Z. Li, Effect of nonuniformity of the contact pressure distribution on the electrical contact resistance in proton exchange membrane fuel cells, *International Journal of Hydrogen Energy*, 36(10) (2011) 6039-6044.
- [16] E. Alizadeh, M.M. Barzegari, M. Momenifar, M. Ghadimi, S.H.M. Saadat, Investigation of contact pressure distribution over the active area of PEM fuel cell stack, *International Journal of Hydrogen Energy*, 41(4) (2016) 3062-3071.
- [17] B. Liu, M.Y. Wei, G.J. Ma, W. Zhang, C.W. Wu, Stepwise optimization of endplate of fuel cell stack assembled by steel belts, *International Journal of Hydrogen Energy*, 41(4) (2016) 2911-2918.
- [18] DOE cell component accelerated stress test protocols for PEM fuel cells, U.S Department of Energy, 2007.
- [1] W.R. Chang, J.J. Hwang, F.B. Weng, S.H. Chan, Effect of clamping pressure on the performance of a PEM fuel cell, *Journal of Power Sources*, 166(1) (2007) 149-154.
- [2] W.-k. Lee, C.-H. Ho, J.W. Van Zee, M. Murthy, The effects of compression and gas diffusion layers on the performance of a PEM fuel cell, *Journal of Power Sources*, 84(1) (1999) 45-51.
- [3] X.Q. Xing, K.W. Lum, H.J. Poh, Y.L. Wu, Optimization of assembly clamping pressure on performance of proton-exchange membrane fuel cells, *Journal of Power Sources*, 195(1) (2010) 62-68.
- [4] S.-D. Yim, B.-J. Kim, Y.-J. Sohn, Y.-G. Yoon, G.-G. Park, W.-Y. Lee, C.-S. Kim, Y.C. Kim, The influence of stack clamping pressure on the performance of PEM fuel cell stack, *Current Applied Physics*, 10(2, Supplement) (2010) S59-S61.
- [5] J. Ge, A. Higier, H. Liu, Effect of gas diffusion layer compression on PEM fuel cell performance, *Journal of Power Sources*, 159(2) (2006) 922-927.
- [6] X. Lai, D.a. Liu, L. Peng, J. Ni, A mechanical–electrical finite element method model for predicting contact resistance between bipolar plate and gas diffusion layer in PEM fuel cells, *Journal of Power Sources*, 182(1) (2008) 153-159.
- [7] S.-J. Lee, C.-D. Hsu, C.-H. Huang, Analyses of the fuel cell stack assembly pressure, *Journal of Power Sources*, 145(2) (2005) 353-361.
- [8] A. Bates, S. Mukherjee, S. Hwang, S.C. Lee, O. Kwon, G.H. Choi, S. Park, Simulation and experimental analysis of the clamping pressure distribution in a PEM fuel cell stack, *International Journal of Hydrogen Energy*, 38(15) (2013) 6481-6493.
- [9] R. Montanini, G. Squadrito, G. Giacoppo, Measurement of the clamping pressure distribution in polymer electrolyte fuel cells using piezoresistive sensor arrays and digital

Please cite this article using:

M. Habibnia, M. Shakeri, S. Nourouzi, Investigation of Parameters on the Efficiency of the Fuel cell Based on the Principles of Sealing, *Amirkabir J. Mech. Eng.*, 50(2) (2018) 425-436.
DOI: 10.22060/mej.2016.781

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

