



مطالعه پارامترهای طراحی و مونتاژی بر روی خواص مکانیکی - الکتریکی پیل سوختی

مصطفی حبیب نیا¹، محسن شاکری^{2*}، سلمان نوروزی³

1- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، گروه پژوهشی پیل سوختی، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل

2- استاد، مهندسی مکانیک، گروه پژوهشی پیل سوختی، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل

3- دانشیار، مهندسی مواد، گروه پژوهشی پیل سوختی، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل

* بابل، صندوق پستی 484، shakeri@nit.ac.ir

چکیده

کلیدواژگان

مقاومت الکتریکی
نیروی گیرهبندی
لایه نفوذ گاز

مقدار مقاومت الکتریکی بین قطعات مختلف وابسته به تنش فشاری بین اجزا مختلف پیل سوختی می‌باشد. در این پژوهش دو هدف مهم دنبال شده است که یکی بدست آوردن حداقل تنش بر روی واشر برای اینکه نشتی اتفاق نیافتد و دیگری بررسی تأثیر توزیع تنش بر روی لایه نفوذ گاز بر مقدار مقاومت الکتریکی می‌باشد. برای رسیدن به این هدف، ابتدا بوسیله طراحی مجموعه آزمایشگاهی حداقل تنش فشاری بر روی واشر برای اینکه نشتی اتفاق نیافتد، بدست آمده که برابر با 2MPa می‌باشد. همچنین با طراحی یک پروسه آزمایشگاهی دیگر، تأثیر تنش فشاری بر مقدار مقاومت بین قطعات مختلف بررسی شده است. در ادامه با توجه به نتایج حاصل از تست آزمایشگاهی، تأثیر نیروی گیرهبندی بر مقدار مقاومت الکتریکی در شبیه‌سازی مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین پارامترهای تأثیرگذار بر توزیع تنش بر روی لایه نفوذ گاز و مقاومت الکتریکی مورد بررسی قرار گرفته است. مشاهده شد که با افزایش نیروی گیرهبندی مقدار مقاومت الکتریکی کاهش می‌یابد. علاوه بر این مشاهده شد که توزیع تنش در استفاده از 4 پیچ غیریکنواخت بوده و با افزایش تعداد پیچ به 8 عدد یکنواخت‌تر شده است. همچنین با افزایش تعداد پیچ به 12 عدد تغییر چندانی نسبت به 8 پیچ رخ نداده است.

Study of assembly and design on mechanical- electrical fuel cell properties

Mostafa Habibnia, Mohsen Shakeri*, Salman Nourouzi

Fuel Cell Research and Technology Group, Babol University of Technology, Babol, Iran

* P.O.B. 484 Babol, Iran, shakeri@stu.nit.ac.ir

Keywords

Electrical resistance
clamping force
gas diffusion layer

Abstract

The electrical resistance between the different components of fuel cell, related to the compressive stress between the various components is the fuel cell. In this study, two important goals pursued: first obtain the least stress on the gaskets for leakage will not happen and additional investigated the effect of stress distribution on gas diffusion layer on the amount of electrical resistance. To reach this goal, first designed experimental setup and achieved 2MPa minimum compressive stress on the gasket to prevent leakage. Then by another experimental setup effect of compressive stress on resistance value between the different parts have been investigated. Then according to experimental data, effect of clamping force on electrical resistance in simulation was investigated. Moreover effective parameters on pressure distribution on gas diffusion layer and electrical resistance was investigated. It was observed that the electrical resistance decreases by increasing clamping force. also observed pressure distribution in 4 bolt not uniform. By increasing bolt up to 8 the pressure uniformity was better than 4 bolt. But by increasing the number of bolt 8 to 12 significant changes not occurred.

1- مقدمه

پژوهش‌های زیادی در این مورد انجام شده و در حال انجام می‌باشد. یکی از پارامترهایی که تأثیر زیادی در بازده پیل سوختی دارد، تلفات اهمی بین اجزا مختلف پیل سوختی می‌باشد. مقاومت الکتریکی ناشی از مقاومت الکتریکی خود اجزا و مقاومت تماسی بین اجزا مختلف می‌باشد. مقاومت تماسی بین اجزا به تنش فشاری بین دو جز بستگی دارد. توزیع تنش روی لایه نفوذ گاز نیز تأثیر قابل توجهی در مقدار مقاومت الکتریکی

پیل‌های سوختی به عنوان منبع جدید مولد انرژی مورد استفاده، در حال گسترش می‌باشد. استفاده عمومی از این نوع سوخت وقتی گسترش پیدا می‌کند که مقرون به صرفه باشد. دو عامل مهم که در استفاده عمومی از این نوع سوخت می‌تواند تأثیرگذار باشد، قیمت تمام شده و بازده پیل‌های سوختی می‌باشد. پارامترهای زیادی در بازده پیل سوختی مؤثر می‌باشد که

Please cite this article using:

M. Habibnia, M. Shakeri, S. Nourouzi, Study of assembly and design on mechanical- electrical fuel cell properties, *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*, Vol. 3, No. 1, pp. 66-76, 2016 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

است [7]. در مورد توزیع فشار و بهبود توزیع فشار بر روی لایه نفوذ گاز تحقیقات محدودی انجام شده است که در ادامه چند مورد اشاره شده است. لی در سال 2005 به بررسی توزیع فشار در پیل سوختی پرداخته همچنین میزان تغییر شکل صفحه انتهایی بوسیله شبیه سازی مورد مطالعه قرار گرفته است [8]. از فیلم فشار بین Bipolar و GDL برای مقایسه نتایج شبیه سازی با آزمایشگاهی استفاده شد. بیتس و همکاران به بررسی تجربی و شبیه سازی توزیع فشار بر روی قسمت‌های مختلف پیل سوختی در فشارهای مختلف پرداخته‌اند [9]. نتایج نشان داده است که توزیع فشار بر روی GDL بین صفر تا 2/5 MPa تغییر کرده است. در مرکز میزان تنش به صفر نزدیک می‌شود. همچنین تأثیر یک پیش نیرو قبل از گیره بندی کامل نیز بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد این پیش نیرو باعث بهتر شدن توزیع فشار شده است.

مونتانی در سال 2011 به بررسی توزیع فشار و تغییر شکل صفحه انتهایی بر اثر نیروی گیره‌بندی بر روی پیل سوختی پرداخته است [10]. از دوربین برای بررسی میزان تغییر شکل استفاده شد. کارال به طراحی یک مدل المان محدود پرداخته و در این مدل تأثیر تعداد سل‌های پیل سوختی را در توزیع فشار بر روی MEA مورد بررسی قرار داده است [11]. میزان انحنای صفحه انتهایی با توجه به تعداد سل‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به نتایج مشاهده شده است که با افزایش تعداد سل‌ها میزان انحنای افزایش یافته است. دانگ در سال 2007 به بررسی پارامترهای مونتاژ در توزیع فشار بر روی MEA² پرداخته است [12]. فشار مونتاژی و موقعیت پیچ‌ها به عنوان پارامترهای متغیر انتخاب شده‌اند. هدف از این تحقیق بیان یک روش مناسب برای موقعیت پیچ‌ها می‌باشد. ونگ در سال 2008 به بررسی توزیع فشار در نیروی گیره‌بندی پرداخته است [13]. در این تحقیق برای بدست 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 شده است. در سال 2010 اصغری و همکاران صفحات انتهایی پیل 5 کیلووات طراحی و مورد بررسی قرار داده است [14]. ابتدا به وسیله نرم‌افزار، تحلیل صفحات انجام شده جنس مناسب برای صفحات مورد انتخاب قرار گرفته و ضخامت صفحه انتهایی بهینه شده است. هونایو و همکاران در سال 2010 صفحه انتهایی با ساختار کامپوزیتی ساخته و با صفحه انتهایی فولادی مقایسه کرده است [15]. هدف از انجام این کار، کاهش وزن صفحه

کلی دو صفحه دارد. در نتیجه پارامترهای تأثیرگذار بر توزیع تنش همچون نیروی گیره‌بندی، ضخامت صفحه انتهایی در مقدار مقاومت الکتریکی مؤثر می‌باشد. پژوهش‌های زیادی در این زمینه انجام شده است که در ادامه توضیح داده شده است. چانگ در سال 2007 به بررسی تأثیر نیروی گیره بندی بر روی بازدهی پیل سوختی پرداخته است [1]. در این مقاله تأثیر فشار بر مقدار تخلخل و مقاومت الکتریکی مورد بررسی قرار گرفت. مشاهده شد که مقدار مقاومت در فشار صفر $1000 \text{ m}\Omega/\text{cm}^2$ بوده که در فشار 2/5 بار این مقدار به $180 \text{ m}\Omega/\text{cm}^2$ رسیده و در محدوده 10 بار این مقاومت به $50 \text{ m}\Omega/\text{cm}^2$ کاهش یافته است. لی در سال 1999 تأثیر مقدار فشردگی¹ GDL بر روی بازدهی پیل سوختی را مورد بررسی قرار داده است [2]. عنوان شده است 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 یافته است.

سانگ در سال 2010 به بررسی تأثیر نیروی گیره بندی بر بازدهی پیل سوختی پرداخته است [3]. در این پژوهش تأثیر میزان فشردگی GDL بر بازدهی یک سری پیل سوختی 5 سلولی به صورت آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار گرفته است. در دو حالت، یکی با فشردگی 15 درصد و دیگری با فشردگی 30 درصد GDL تست شده است. نتایج نشان می‌دهد با افزایش مقدار فشردگی میزان بازدهی افزایش یافته است پیل با 30 درصد فشردگی در GDL بازدهی بیشتری نسبت به پیل دیگر داشته است. دلیل این امر، کاهش مقاومت الکتریکی بین GDL و صفحات می باشد. ایسمایل در سال 2012 بر روی مقاومت الکتریکی بین صفحات دوقطبی و GDL در انواع مختلف GDL مطالعه کرده است [4].

جان نی و همکاران به ارایه مدل مکانیکی - الکتریکی برای پیشبینی مقاومت الکتریکی بین صفحات دو قطبی و GDL پرداخته است [5]. مشخص شد با افزایش فشار مقاومت کاهش می‌یابد. این میزان کاهش تا فشار 2 MPa شدید بوده و از آن به بعد کاهش مقاومت، با افزایش فشار محسوس نمی‌باشد. زی در سال 2009 به بهینه سازی نیروی گیره‌بندی پرداخته است [6]. در این پژوهش دو هدف مورد مطالعه قرار گرفته است: یک مدل سه بعدی ایجاد شده و در آن تأثیر نیروی گیره‌بندی بر روی GDL و خواص آن و عملکرد پیل سوختی مورد مطالعه قرار گرفته است. جابین و همکاران در سال 2006 به بررسی تأثیر مقدار تراکم GDL بر روی بازدهی پیل سوختی پرداخته

² Membrane Electrode Assembly¹ Gas Diffusion Layer

نتیجه واکنش این دو عنصر، انرژی الکتریکی و آب می‌باشد. این دو ماده در دوطرف کاتالیست بوده و واکنش انجام می‌شود. خارج شدن مواد از پیل سوختی باعث ایجاد نشتی در سیستم شده که موجب کاهش بازدهی پیل سوختی و ایجاد خطر می‌کند. با قرار گرفتن واشر در بین اجزا پیل سوختی همراه با تنش فشاری لازم، از نشتی در پیل سوختی جلوگیری به عمل می‌آید. مقدار تنش اعمالی برای جلوگیری از نشتی تأثیر زیادی در مقدار نیروی گیره‌بندی و در نتیجه بازدهی پیل سوختی دارد. اگر مقدار نیروی گیره‌بندی کم باشد، مقدار تنش وارده بر واشر کم بوده و باعث نشتی در سیستم می‌شود. اگر نیروی گیره‌بندی بیش از حد 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 اینکه آب‌بندی صورت گیرد، می‌توان حداقل نیروی گیره‌بندی را بدست آورده و حداقل تغییر شکل را در اجزا پیل سوختی داشت. در این قسمت سعی شده است مقدار تنش مورد نیاز بر روی واشر با ابعاد ضخامت $0/4$ ، قطر 80 و عرض 3 میلی‌متر برای ایجاد آب‌بندی کامل بدست آید. استفاده از این ابعاد در تست نشتی به خاطر این است که حداقل عرض واشر طراحی شده در تک سل برابر با 3 میلی‌متر می‌باشد. برای بدست آوردن حداقل تنش مورد نیاز برای آب‌بندی، یک مجموعه آزمایشگاهی طراحی شده است که با استفاده از آن مقدار نشتی در تنش‌های فشاری مختلف بدست آمده است. برای انجام تست به جای استفاده از گاز هیدروژن، به دلیل خطر بالا، از گاز نیتروژن استفاده شده است. مقدار فشار داخل سیلندر با توجه به استاندارد موجود $1/5$ برابر حداکثر فشار کاری هیدروژن در پیل سوختی که برابر با 3 bar می‌باشد، در نظر گرفته شده است. از رگولاتور برای تنظیم فشار مخزن استفاده شده است. برای اعمال نیروی گیره‌بندی از پرس مجهز به کنترل نیرو استفاده شده است. در شکل 1 نمایی از این تست نشان داده شده است. در این تست در تنش‌های مختلف بر روی واشر مقدار افت فشار در داخل مخزن تعبیه شده در زمان‌های مختلف بدست آمده است. در جداول 1 تا 3 نتایج این تست‌ها نشان داده شده است.

با توجه به استاندارد اگر مقدار افت فشار در سیستم در مدت زمان 10 دقیقه کمتر از 1 bar باشد، آب‌بندی به صورت کامل انجام می‌شود. در این تست مشخص شد با اعمال فشار حداقل 2 MPa، بر روی واشر آب‌بندی به صورت کامل انجام می‌شود. از این نتیجه برای بدست آوردن پارامترهای مناسب جهت توزیع فشار یکنواخت‌تر استفاده شده است.

انتهایی همراه با افزایش مقاومت و سفتی صفحه انتهایی بوده است.

همان‌طور که مشاهده می‌شود تحقیقات زیادی در مورد تأثیر نیروی گیره‌بندی بر مقاومت الکتریکی انجام شده است. همچنین در مورد توزیع تنش بر روی لایه نفوذ گاز نیز مطالعاتی انجام شده است. اما در مورد تأثیر توزیع تنش بر روی مقاومت الکتریکی هیچ مطالعه‌ای انجام نشده است. همچنین بیشتر روش‌های معرفی شده برای اندازه‌گیری مقدار مقاومت الکتریکی به صورت تجربی می‌باشد و عدم وجود تحلیل‌های تئوری برای تخمین مقدار مقاومت تماسی بین اجزا در بین پژوهش‌ها همواره مشهود بوده است. هدف از این پژوهش رسیدن به توزیع فشار مناسب بر روی لایه نفوذ گاز و بررسی تأثیر آن بر مقدار مقاومت الکتریکی 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. مقدار تنش بر روی لایه نفوذ گاز اگر کم باشد باعث افزایش مقاومت الکتریکی می‌شود. اگر این مقدار تنش افزایش یابد مقاومت الکتریکی کاهش یافته اما باعث می‌شود جابجایی مواد با مشکل مواجه شده و بازدهی پیل سوختی کاهش یابد. 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 1 MPa در نظر گرفته شده است. بر این اساس پارامترهای مناسب بر اساس معیار آب‌بندی بدست آمده است. برای رسیدن به این هدف باید حداقل تنش بر روی واشر برای جلوگیری از نشتی بدست آید. بر این اساس بوسیله یک تست تجربی برای واشر مورد نظر با ابعاد خاص این مقدار تنش محاسبه شده است. در ادامه با انجام یک تست آزمایشگاهی، مقدار مقاومت الکتریکی بین قطعات با ابعاد مشخص شده مختلف پیل سوختی در تنش‌های مختلف بدست آمده است. این نتایج برای بررسی مقدار مقاومت الکتریکی در شبیه‌سازی الکتریکی مورد استفاده قرار گرفته است. سپس پارامترهای تأثیرگذار در توزیع تنش و مقاومت الکتریکی بر روی لایه نفوذ گاز مورد بررسی قرار گرفته است. از جمله این پارامترها نیروی گیره‌بندی و ضخامت صفحه انتهایی و تعداد پیچ برای گیره‌بندی می‌باشد که در این پژوهش مورد بررسی قرار گرفته شده است.

2- تست نشتی

موادی که به عنوان سوخت در پیل‌های سوختی پلیمری مورد استفاده قرار می‌گیرد، هیدروژن همراه با اکسیژن می‌باشد که

وابسته به تنش فشاری بین اجزا می‌باشد.

برای به دست آوردن ضریب گذردهی الکتریکی بین BPP^1 ، GDL و Copper plate سه تست با قرار دادن قطعات با شیوه-های مختلف بر روی هم انجام شده است. در شکل 2 این 3 تست نشان داده شده است.

بر اساس این 3 تست، معادلات (1) تا (3) برای مقاومت الکتریکی بین سطوح برقرار است:

$$2R_{Cu} + 2R_{BPP} + R_{GDL} + 2R_{BPP/Cu} + 2R_{BPP/GDL} = \frac{V1A1}{I1} \quad (1)$$

$$3R_{Cu} + R_{GDL} + 2R_{Cu/GDL} = \frac{V2A2}{I2} \quad (2)$$

$$2R_{Cu} + R_{BPP} + 2R_{BPP/Cu} = \frac{V3A3}{I3} \quad (3)$$

برای انجام تست قطعات به ابعاد 50×50 میلی‌متر برش خورده و سنگ زده شده‌اند. تمامی قطعات پس از سنگ زبری آنها اندازه‌گیری شده است و با زبری قطعات اصلی پیل مورد مقایسه قرار گرفته شده است. در شکل 3 نمایی از دستگاه زبری سنج مورد استفاده نشان داده شده است.

دستگاه مورد استفاده برای اعمال تنش فشاری پرس SANTOM با تناژ 2 تن می‌باشد. در این پرس نیرو با اختلاف 250 نیوتن اعمال می‌شود. دقت این پرس 1 نیوتن می‌باشد. در شکل 4 نمایی از قطعات و مجموعه ساخته شده برای اندازه‌گیری نشان داده شده است.

برای اندازه‌گیری میزان مقاومت الکتریکی از دستگاه اندازه‌گیری مقاومت استفاده شده است. به دلیل دقت بالای مورد نیاز، باید دقت دستگاه بالا باشد که دقت این دستگاه $0/01m\Omega$ می‌باشد. در شکل 5 نحوه اتصال دستگاه به قطعات و دستگاه اندازه‌گیری نشان داده شده است.

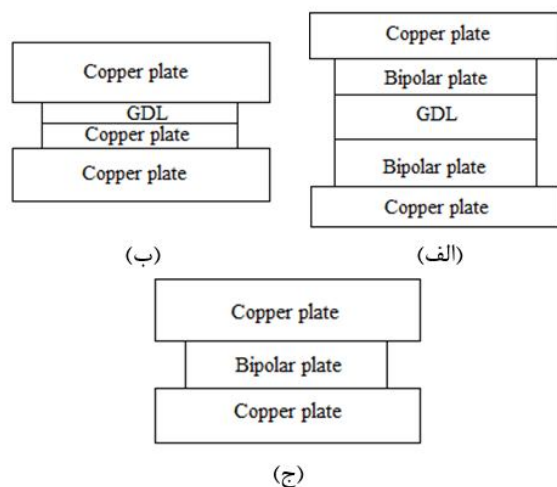


Fig. 2 Organized different plate together

شکل 2 ترتیب قرار دادن صفحات مختلف بر روی هم

¹ Bipolar Plate



Fig. 1 A view of a system designed to measure the amount of leakage

شکل 1 نمایی از سیستم طراحی شده برای اندازه‌گیری مقدار نشتی

جدول 1 مقدار افت فشار در مخزن در زمان‌های مختلف در تنش $1/6$ MPa بر روی واشر

Table 1 The pressure in the chamber at different time period of tension 1.6MPa on the gasket

زمان (Min)	0	4	12	19	24	28
مقدار فشار مخزن (bar)	3	2/9	2/8	2/7	2/6	2/5

جدول 2 مقدار افت فشار در مخزن در زمان‌های مختلف در تنش $1/8$ MPa بر روی واشر

Table 2 The pressure in the chamber at different time period of tension 1.8MPa on the gasket

زمان (Min)	0	5	14	20	27	34
مقدار فشار مخزن (bar)	3	2/9	2/8	2/7	2/6	2/5

جدول 3 مقدار افت فشار در مخزن در زمان‌های مختلف در تنش $1/95$ MPa بر روی واشر

Table 3 The pressure in the chamber at different time period of tension 1.95MPa on the gasket

زمان (Min)	0	12	19	26
مقدار فشار مخزن (bar)	3	2/9	2/8	2/7

3- تست تعیین مقدار مقاومت الکتریکی در فشارهای مختلف

برای بررسی مقاومت الکتریکی و تأثیر توزیع تنش بر اندازه مقاومت در نرم افزار، باید ابتدا میزان مقاومت الکتریکی بین اجزا مختلف پیل سوختی در نرم افزار تعیین شود. برای این کار، باید خاصیت سطوح نسبت به هم بیان شود و در این تحلیل‌ها این خواص شامل ضریب گذردهی الکتریکی بوده که این ضریب

مجموعه ساخته شده بین فک‌های یک دستگاه پرس دیجیتالی قرار گرفته شده، سپس در هنگام اعمال نیرو، در نیروی‌های مختلف، میزان مقاومت الکتریکی ثبت شده است. با توجه به معادلات (1) تا (3) میزان مقاومت بین سطوح در تنش‌های مختلف بدست آمده که در جدول 4 نشان داده شده است. برای مشاهده بهتر نتایج، در شکل 6 تأثیر مقدار تنش بر مقدار مقاومت الکتریکی نشان داده شده است.

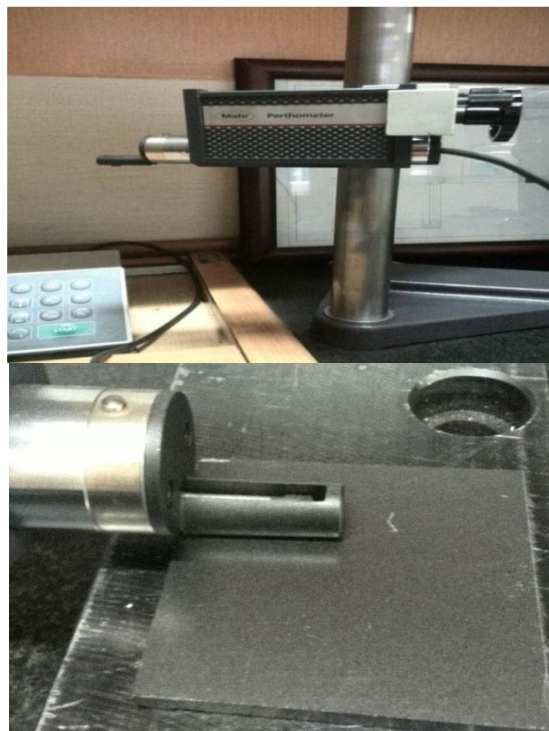


Fig.3 The roughness measuring device

شکل 3 دستگاه زبری سنج سطح

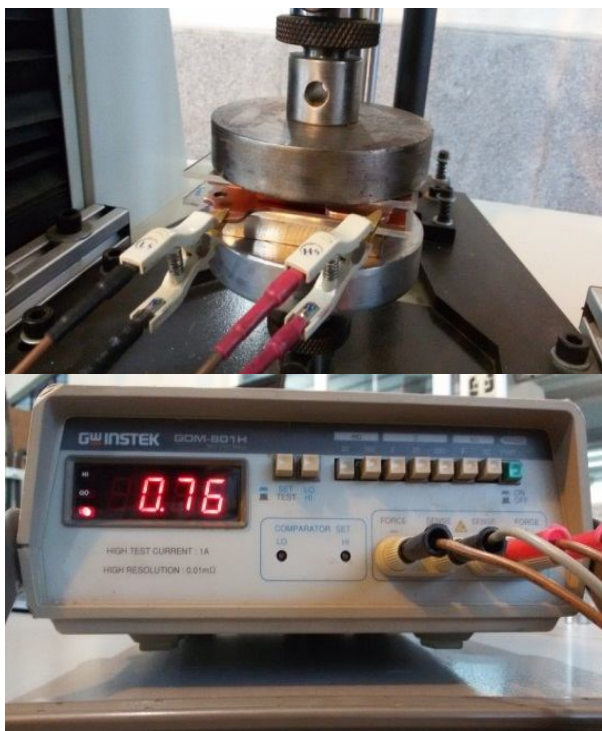


Fig.5 Electrical resistance measurement device

شکل 5 دستگاه اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی و نحوه اتصال به مجموعه

جدول 4 تأثیر تنش فشاری بر مقاومت الکتریکی بین صفحات مختلف

Table 4 Effect of compressive stress on the electrical resistance between different plate

مقاومت الکتریکی بین GDL و BPP (mΩ)	مقاومت الکتریکی بین Copper plate و BPP (mΩ)	مقاومت الکتریکی بین GDL و Copper plate (mΩ)	فشار پرس (MPa)
5/9747	9/795	3/347	0/11
2/9647	5/21	1/6547	0/2
1/9845	3/565	1/346	0/3
1/6699	2/675	1/0647	0/4
1/1745	1/86	0/8067	0/5
0/8197	1/485	0/6147	0/8
0/6247	1/22	0/5146	1
0/5447	1/04	0/4497	1/2
0/3946	0/82	0/3593	1/6
0/3243	0/675	0/2874	2

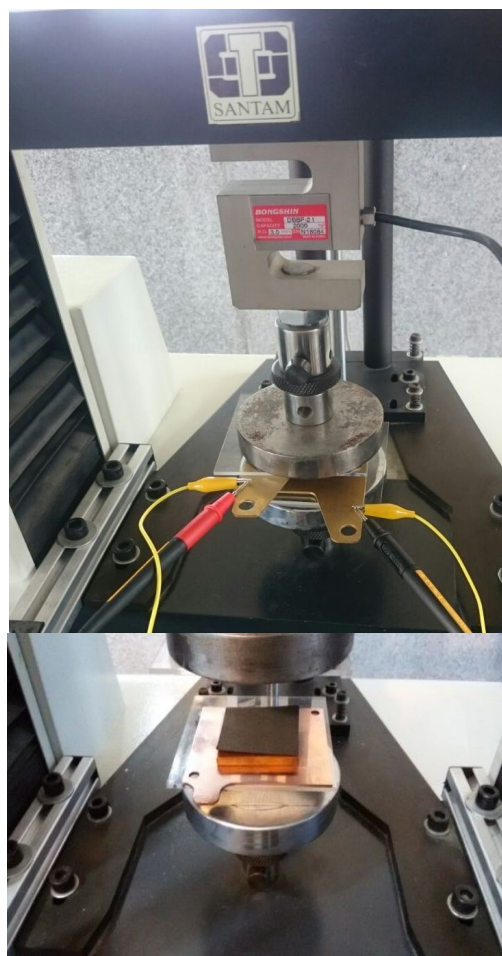


Fig.4 Presses and plates made to measure contact resistance

شکل 4 دستگاه پرس و صفحات ساخته شده برای اندازه‌گیری مقاومت تماسی

خواص لایه نفوذ گاز با توجه به خواص ارائه شده شرکت سازنده در جدول 6 نشان داده شده است. واشر دارای خواص هایپر الاستیک بوده و باتوجه به این موضوع، نمونه تست فشار برای قطعه گرفته و خواص آن را در شبیه سازی مورد استفاده قرار داده شده است. در شکل 8 نمودار تست فشار نمونه نشان داده شده است.

جدول 5 خواص مکانیکی و الکتریکی اجزا پیل سوختی

Table 5 Mechanical-Electrical properties of fuel cell

قطعات	جنس	مدول یانگ MPa	نرخ کرنش (زیمنس بر متر)	ضریب گذردهی
صفحه انتهایی	فولادی	210000	0/3	-
صفحه دوقطبی	گرافیت	5100	0/25	100000
صفحه مسی	مس	100000	0/33	5690000

جدول 6 تغییرات ضخامت بر حسب تنش فشاری در لایه نفوذ گاز

Table 6 Variations in the thickness of the compressive stress in the gas diffusion layer

تنش وارده	0/03MPa	1MPa	2MPa
ضخامت GDL	255 μ m	191 μ m	167 μ m

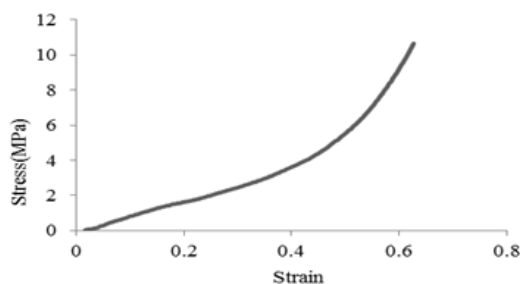


Fig.8 The stress-strain diagram gasket

شکل 8 نمودار تنش-کرنش واشر

5- شبیه سازی

برای شبیه سازی از نرم افزار ABAQUS استفاده شده است. در این پژوهش به بررسی مکانیکی-الکتریکی پیل سوختی پرداخته شده است. تک سل به صورت استاتیک مدل شده است. در شبیه سازی به جای اعمال گشتاور از تنش استاتیکی معادل این نیرو در محل قرار گیری پیچ ها استفاده شده است. مقدار گشتاورهای 1/1، 1/2 و نیوتن متر اعمال شده که برابر با 11، 10 و 12 MPa می باشد. در شکل 9 نمایی از مدل و محل اعمال نیرو نشان داده شده است.

با توجه به تحلیل مکانیکی-الکتریکی، تعیین خواص بین سطوح مهم می باشد. در این قسمت میزان گذردهی الکتریکی بین صفحات مختلف با توجه به مقدار تنش فشار باید تعیین

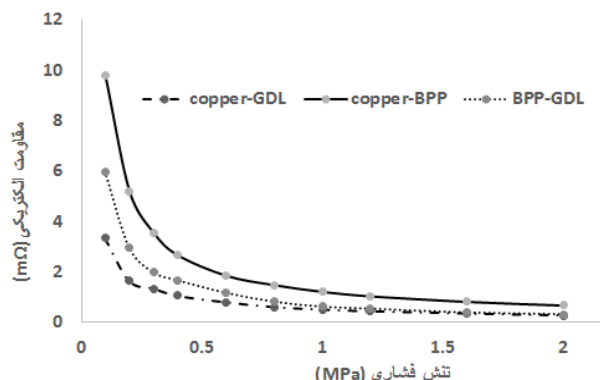


Fig.6 Effect of compressive stress on the electrical resistance between different plates.

شکل 6 تأثیر تنش فشاری بر مقاومت الکتریکی بین صفحات مختلف

همان طور که مشاهده می شود با افزایش تنش فشاری میزان مقاومت الکتریکی در صفحات کاهش یافته است. کاهش مقاومت ابتدا شدید بوده و در ادامه این کاهش مقاومت کمتر شده است.

4- تشریح مدل

برای بررسی پارامترهای مورد نظر، یک تک سل طراحی و ساخته شده است. برای کاهش زمان محاسبات، با توجه به تقارن موجود در تک سل، نصف یک سل طراحی و در شبیه سازی و بررسی پارامترها مورد استفاده قرار گرفته است. در شکل 7 نمایی از مدل طراحی شده نشان داده شده است. این سل شامل صفحه انتهایی، صفحه مسی، واشر، صفحه دوقطبی، لایه نفوذ گاز و یک صفحه صلب می باشد. سطح فعال لایه نفوذ گاز 50×50 میلی متر در نظر گرفته شده است. خواص مکانیکی قطعات مختلف در جدول 5 نشان داده شده است.

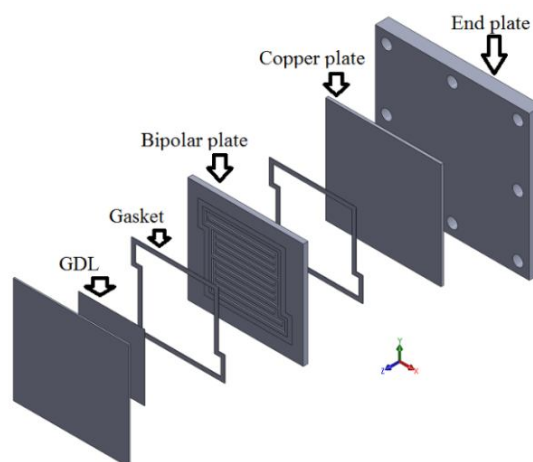


Fig. 7 Model designed to investigate the parameters

شکل 7 مدل طراحی شده برای بررسی پارامترها

توزیع تنش بر روی واشر در شکل 12 نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، حداقل مقدار تنش بر روی واشر برابر با 2/317MPa می‌باشد. با توجه به تست نشستی، آب‌بندی به صورت کامل انجام شده است. توزیع فشار بر روی لایه نفوذ گاز در شکل 13 نشان داده شده است.

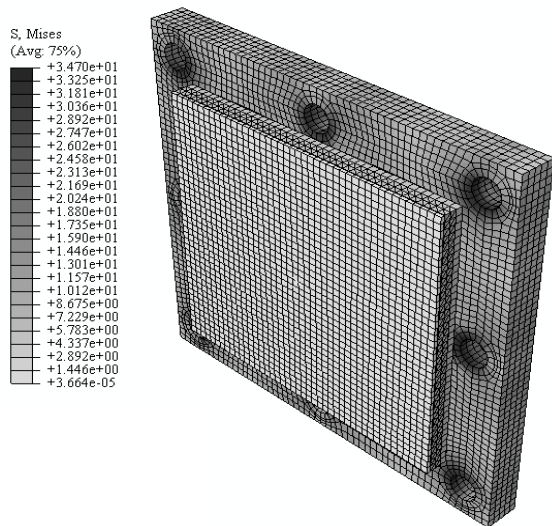


Fig. 11 The simulation was performed for models with 10MPa clamping force

شکل 11 شبیه‌سازی انجام شده برای مدل با نیروی گیره‌بندی 10MPa

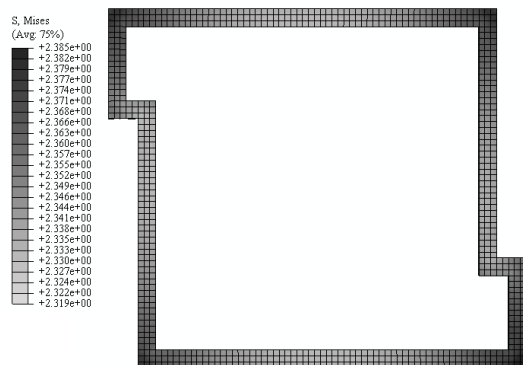


Fig. 12 the stress distribution on gasket after applying clamping force

شکل 12 توزیع تنش بر روی واشر پس از اعمال نیروی

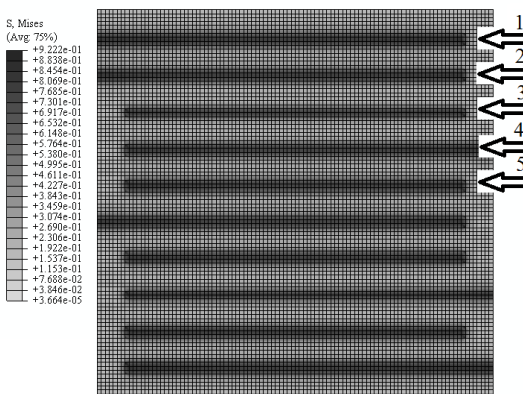


Fig. 13 pressure distribution of Gas Diffusion Layer

شکل 13 توزیع تنش بر روی لایه نفوذ گاز

شود. در شکل 10 میزان تغییرات گذردهی الکتریکی بر حسب فشار در تماس بین صفحات مختلف، با توجه به نتایج آزمایش‌های عملی نشان داده شده است.

6- نتایج

6-1- شبیه‌سازی تک سل

برای درک بهتر از هدف پژوهش، نتایج یکی از شبیه‌سازی‌ها در صفحه انتهایی با ضخامت 10mm و گشتارو پیچشی 1N.m و با توجه به اینکه در شبیه‌سازی برای ساده‌سازی به جای اعمال گشتاور مقدار تنش گیره‌بندی 10MPa نشان داده شده است. در شکل 11 نمایی از کل شبیه‌سازی نشان داده شده است.

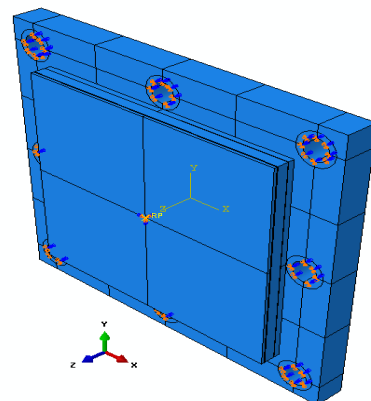


Fig. 9 Model simulate for investigate parameters

شکل 9 مدل ایجاد شده در نرم افزار برای بررسی پارامترها

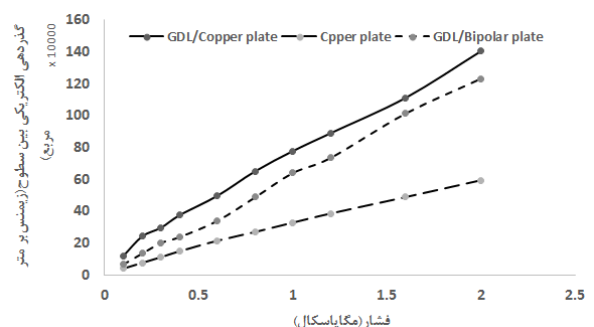


Fig. 10 Effect of compressive stress on coefficient of permittivity

شکل 10 تأثیر مقدار تنش فشاری بر ضریب گذردهی الکتریکی

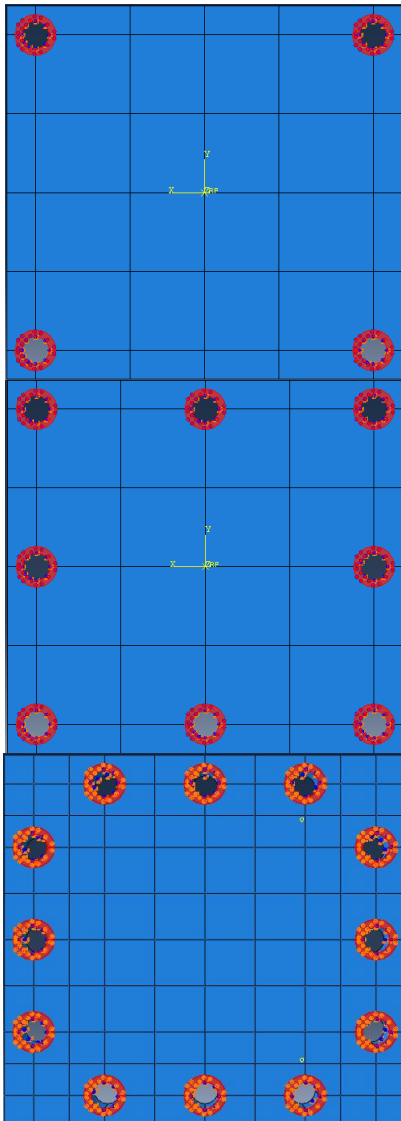


Fig. 15 End plate with 4, 8 and 12 location of clamping force

شکل 15 صفحه انتهایی با 4، 8 و 12 محل اعمال نیروی گیره‌بندی

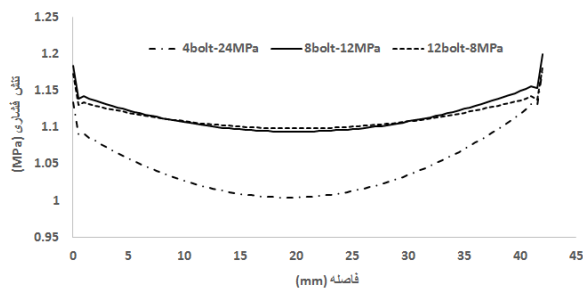


Fig. 16 Pressure distribution on GDL in 3 different amount of location clamping force

شکل 16 توزیع تنش بر روی لایه نفوذ گاز در 3 نوع مختلف تعداد ناحیه اعمال نیرو

با افزایش پیچ‌ها به 8 عدد توزیع تنش یکنواخت‌تر شده است. با افزایش تعداد پیچ‌ها به 12 عدد تغییر زیادی در توزیع تنش بر روی لایه نفوذ گاز نسبت به 8 پیچ اتفاق نیفتاده است.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، مقدار تنش فشاری در محل تماس دیواره کانال‌های صفحه دوقطبی با لایه نفوذ گاز بیشتر می‌باشد. مقدار توزیع تنش در هر کدام از این محل‌های تماس متفاوت می‌باشد. برای 5 محل تماس دیواره کانال با لایه نفوذ گاز، توزیع تنش به صورت جداگانه اندازه‌گیری و در شکل 14 نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود مقدار تنش از گوشه به وسط هر کانال کاهش یافته است. همچنین مقدار تنش از کانال 1 به 5 رو به کاهش می‌باشد. مقدار تنش مناسب بر روی لایه نفوذ گاز 1MPa در نظر گرفته شده است که با توجه به نتایج بدست آمده مقدار تنش کمتر از این مقدار می‌باشد. با توجه به نتایج شبیه‌سازی مشخص شده که پارامترهای مورد استفاده، درست انتخاب نشده است. در ادامه به بررسی پارامترهای تأثیرگذار پرداخته شده است.

2-6- تأثیر تعداد پیچ بر مقدار و توزیع تنش بر روی لایه نفوذ گاز:

تعداد پیچ یکی از پارامترهای تأثیرگذار بر مقدار و توزیع تنش بر روی لایه نفوذ گاز می‌باشد، که در این قسمت مورد بررسی قرار گرفته و نتایج مورد مقایسه قرار گرفته است. در این پژوهش تعداد 8.4 و 12 محل اعمال نیرو مورد بررسی قرار گرفته است. در شکل 15 نمایی از صفحات با 8.4 و 12 محل اعمال نیرو نشان داده شده است.

مساحت اعمال تنش گیره‌بندی یکسان در نظر گرفته شده است. برای بررسی توزیع تنش بر روی لایه نفوذ گاز، مقدار توزیع تنش را در کانال اول در 3 حالت مورد مقایسه قرار گرفته است. در شکل 16 توزیع تنش نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در استفاده از 4 پیچ توزیع تنش یکنواخت نبوده است.

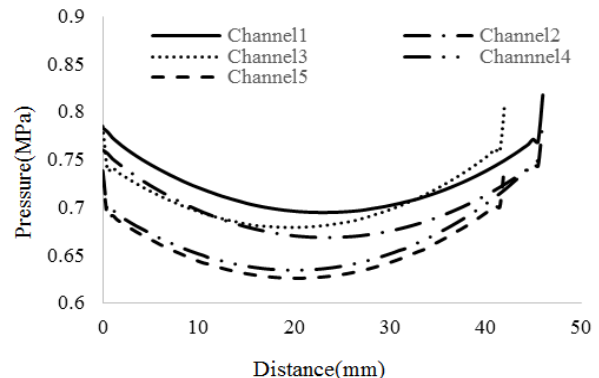


Fig. 14 The pressure distribution on gas diffusion layer of the first channel 5 of the bipolar plate

شکل 14 مقدار توزیع تنش بر روی لایه نفوذ گاز در اثر 5 کانال اول صفحه دوقطبی

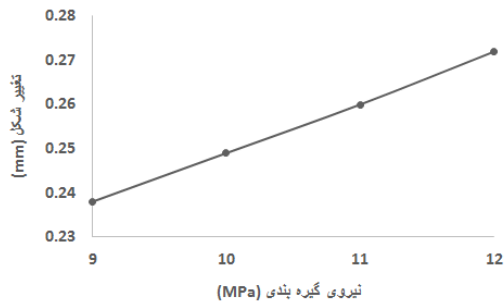


Fig. 17 Effect of clamping force on deformation of end plate
شکل 17 تأثیر نیروی گیره‌بندی بر تغییر شکل صفحه انتهایی

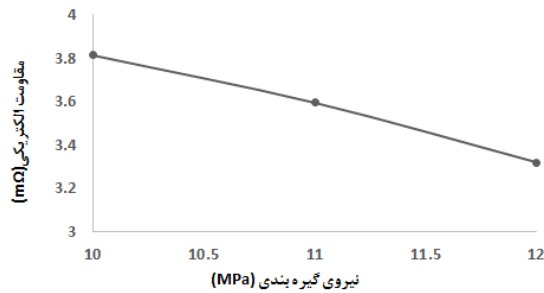


Fig. 18 Effect of clamping force on electrical resistance fuel cell
شکل 18 تأثیر نیروی گیره‌بندی بر مقاومت الکتریکی پیل سوختی

جدول 8 تأثیر نیروی گیره‌بندی و ضخامت صفحه انتهایی بر مقدار میانگین تنش و انحراف از مقدار میانگین

Table 8 Effect of clamping force and end plate thickness on average stress over the GDL and deviation from average stress

مقدار انحراف از میانگین تنش (bar)	مقدار میانگین تنش (bar)	مقدار نیروی گیره‌بندی (bar)	ضخامت صفحه انتهایی
0/3346	6/9	100	
0/347	9/1968	110	8
0/36	10/96	120	
0/1917	7/2619	100	
0/2113	9/593	110	10
0/23	11/2525	120	
0/11	9/02	100	
0/1181	10/8651	110	12
0/13	11/3839	120	

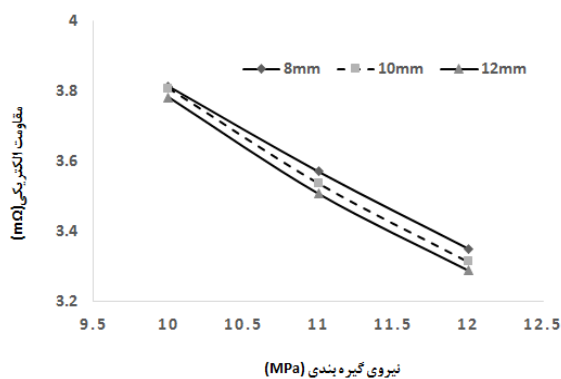


Fig. 19 Effect of clamping force and end plate thickness on electrical resistance fuel cell

شکل 19 تأثیر ضخامت صفحه انتهایی و نیروی گیره‌بندی بر مقاومت الکتریکی پیل سوختی

3-6- تأثیر نیروی گیره‌بندی بر مقدار و انحراف تنش فشاری و مقاومت الکتریکی:

برای آب‌بندی و کنار هم قرار دادن صفحات مختلف پیل سوختی، نیروی گیره‌بندی بوسیله پیچ‌ها انجام می‌شود. نیروی گیره‌بندی تأثیر مستقیم بر مقاومت الکتریکی و توزیع تنش بر روی لایه نفوذ گاز دارد. در ضخامت صفحه انتهایی 8mm و تعداد پیچ 8 در تنش گیره‌بندی 9, 10, 11 MPa مقدار میانگین تنش بر روی لایه نفوذ گاز و مقدار انحراف در جدول 7 نشان داده شده است.

همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش نیروی گیره‌بندی مقدار میانگین تنش بر روی لایه نفوذ گاز افزایش یافته است. همچنین با افزایش نیروی گیره‌بندی مقدار انحراف از مقدار میانگین نیز افزایش یافته است. دلیل این امر افزایش تغییر شکل صفحه انتهایی می‌باشد. در شکل 17 میزان تغییر شکل صفحه انتهایی در نیروهای گیره‌بندی مختلف نشان داده شده است.

همچنین تأثیر نیروی گیره‌بندی بر مقدار مقاومت الکتریکی در شکل 18 نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش نیروی گیره‌بندی مقدار مقاومت الکتریکی کاهش یافته است.

4-6- تأثیر ضخامت صفحه انتهایی بر مقدار و انحراف تنش فشاری و مقاومت الکتریکی

برای ضخامت 8، 10 و 12mm صفحه انتهایی در تعداد 8 پیچ، تأثیر نیروی گیره‌بندی بر مقدار میانگین تنش و انحراف از میانگین تنش در جدول 8 نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش ضخامت صفحه انتهایی مقدار میانگین تنش بر روی لایه نفوذ گاز افزایش مقدار انحراف از مقدار میانگین کاهش یافته است. دلیل این نیز تغییر شکل کمتر صفحه انتهایی در ضخامت‌های بیشتر می‌باشد. همچنین با افزایش نیروی گیره‌بندی مقدار میانگین تنش افزایش و مقدار انحراف از مقدار میانگین نیز افزایش یافته است. در ادامه تأثیر این پارامترها در مقدار مقاومت الکتریکی در شکل 19 نشان داده شده است.

جدول 7 تأثیر نیروی گیره‌بندی بر مقدار میانگین تنش و انحراف از مقدار میانگین تنش بر روی لایه نفوذ گاز

Table 7 effect of clamping force on average stress over the GDL and deviation from average stress

ضخامت صفحه انتهایی	مقدار نیروی گیره‌بندی (bar)	مقدار میانگین تنش (bar)	مقدار انحراف از میانگین تنش (bar)
	100	7/2619	0/1917
8mm	110	9/593	0/2113
	120	11/252	0/23

- همان‌طور که در شکل 19 نشان داده شده است، مقدار مقاومت الکتریکی با افزایش نیروی گیره‌بندی کاهش یافته است. ضخامت صفحه انتهایی نیز در مقدار مقاومت الکتریکی تأثیر داشته و با افزایش ضخامت صفحه انتهایی، مقدار مقاومت کاهش یافته است. این مورد در نیروی گیره‌بندی 10MPa کمتر و در نیروی گیره‌بندی 12MPa بیشتر می‌باشد. دلیل آن نیز مقدار انحراف از مقدار میانگین می‌باشد که در ضخامت 12mm این مقدار نسبت به ضخامت 8mm کمتر می‌باشد.
- 7- نتیجه‌گیری**
- در این پژوهش ابتدا بوسیله طراحی یک مجموعه آزمایشگاهی حداقل تنش بر روی واشر برای جلوگیری از نشتی بدست آمده و در ادامه مقدار نیروی گیره‌بندی بر این اساس طوری بدست آمده است که به صورت همزمان آب‌بندی در پیل سوختی اتفاق افتاده و همچنین تنش بر روی لایه نفوذ گاز به مقدار مورد نظر برسد. در ادامه برای بررسی تأثیر تنش فشاری بین اجزا مختلف پیل سوختی بر مقدار مقاومت الکتریکی بین سطوح، آزمایشی طراحی شده و بر اساس آن مقدار مقاومت الکتریکی بین اجزا مختلف در تنش‌های فشاری مختلف بدست آمده و از نتایج آن برای شبیه‌سازی مکانیکی - الکتریکی استفاده شده است. در ادامه پارامترهای تأثیرگذار بر توزیع تنش بر روی لایه نفوذ گاز مورد بررسی قرار گرفته است که از جمله آن تعداد پیچ برای گیره‌بندی می‌باشد که مشخص شده توزیع تنش در استفاده از 4 پیچ غیریکنواخت بوده و با افزایش تعداد پیچ به 8 عدد یکنواخت‌تر شده است. همچنین با افزایش تعداد پیچ به 12 عدد تغییر چندانی نسبت به 8 پیچ رخ نداده است. همچنین تأثیر نیروی گیره‌بندی و ضخامت صفحه انتهایی بر مقدار تنش میانگین و انحراف از مقدار تنش میانگین و مقاومت الکتریکی مورد بررسی قرار گرفته است. مشخص شد با افزایش نیروی گیره‌بندی مقدار میانگین تنش افزایش و مقاومت الکتریکی کاهش یافته است.
- 8- مراجع**
- [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*, Vol. 166, pp.149-154, 2007.
- [2] Woo-kum Lee, Chien-Hsien Ho, J.W. Van Zee, Mahesh Murthy, The effects of compression and gas diffusion layers on the performance of a PEM fuel cell, *Journal of Power Sources*, Vol. 84, pp. 45-51,
- [3] Sung-Dae Yim, Byung-Ju Kim, Young-Jun Sohn, Young-Gi Yoon, Gu-Gon Park, Won-Yong Lee, Chang-Soo Kim, Yong Chai Kim. The influence of stack clamping pressure on the performance of PEM fuel cell stack. *Current Applied Physics*, Vol. 10, pp.59-61, 2010.
- [4] M.S. Ismail, D.B. Ingham, L. Ma, M. Pourkashanian. The contact resistance between gas diffusion layers and bipolar plates as they are assembled in proton exchange membrane fuel cells. *Renewable Energy*, Vol. 52, pp.40-45, 2013.
- [5] Xinmin Lai, Dong'an Liua, Linfa Penga, Jun 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*, Vol. 182, pp. 153-159, 2008.
- [6] Xiu Qing Xing, KahWai Lum, Hee Joo Poh, Yan LingWu. Optimization of assembly clamping pressure on performance of proton-exchange membrane fuel cells. *Journal of Power Sources*, Vol. 195, pp.62-68, 2010.
- [7] Jiabin Ge, Andrew Higier, Hongtan Liu. Effect of gas diffusion layer compression on PEM fuel cell performance. *Journal of Power Sources*, Vol. 159, pp. 922-927, 2006.
- [8] Shuo-Jen Lee, Chen-De Hsu, Ching-Han Huang. Analyses of the fuel cell stack assembly pressure. *Journal of Power Sources*, Vol. 145, pp. 353-361, 2005.
- [9] Alex Bates, Santanu Mukherjee, Sunwook Hwang, Sang C. Lee, Osung Kwon, Gyeong Ho Choi, Sam Park. Simulation and experimental analysis of the clamping pressure distribution in a PEM fuel cell stack. *International journal of hydrogen energy*, Vol. 38, pp.6481-6493, 2013.
- [10] R. Montanini, G. Squadrito, G. Giacoppo, Measurement of the clamping pressure distribution in polymer electrolyte fuel cells using piezoresistive sensor arrays and digital image correlation techniques, *Journal of Power Sources*, Vol. 196, pp. 8484-8493, 2011.
- [11] Christophe Carral, Patrice Me'le'. A numerical analysis of PEMFC stack assembly through a 3D finite element model. *International journal of hydrogen energy*, Vol. 39, pp. 4516-4530, 2014.
- [12] Dong'an Liu, Xinmin Lai, Jun Ni, Linfa Peng, Shuhuai Lan, Zhongqin Lin. Robust design of assembly parameters on membrane electrode assembly pressure distribution. *Journal of Power Sources*, Vol. 172, pp. 760-767, 2007.
- [13] Xinting Wang, Ying Song, Bi Zhang. Experimental study on clamping pressure distribution in PEM fuel

- hydrogen energy*, Vol. 35, pp. 9291-9297, 2010.
- [15] Ha Na Yu, Seong Su Kim, Jung Do Suh, Dai Gil Lee. Composite endplates with pre-curvature for PEMFC (polymer electrolyte membrane fuel cell). *Composite Structures*, Vol. 92, pp. 1498-1503, 2010.
- cells. *Journal of Power Sources*, Vol. 179, pp. 305-309, 2008.
- [14] S. Asghari, M.H. Shamsamandi, M.R. Ashraf Khorasani. Design and manufacturing of end plates of a 5 kWPEM fuel cell. *international journal of*