Amirkabir Journal of Mechanical Engineering

Amirkabir J. Mech. Eng., 52(11) (2021) 807-810
DOI: 10.22060/mej.2019.15698.6180

A Developed Geometry for Endplate for Uniform Contact Pressure Distribution on the Polymer Exchange Membrane Fuel Cells Active Area

M. M. Barzegari[1*], M. Habibnia[2], M. Momenifar[1], M. Ghadimi[1], K. Mohammadi[1]

[1] Department of Mechanical Engineering, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran

[2] Department of Mechanical Engineering, Azad Islamic University of Jouybar, Jouybar, Iran

ABSTRACT: The contact resistance between polymer exchange membrane fuel cell components has a crucial effect on cell performance. The geometry of the endplate, on the other hand, plays an essential role in the contact pressure distribution on the membrane electrode assembly and the amount of contact resistance between plates. In this paper, the effect of endplate geometry on the contact pressure distribution over the membrane electrode assembly is simulated using ABAQUS software. In the next part, a new geometry for the endplate is provided and compared to flat endplates. Geometrical parameters of an endplate with curvature (bomb-shaped endplate) are considered, and the effects of these parameters on the contact pressure distribution over the membrane electrode assembly are investigated. In this simulation, a 3D model of the fuel cell is developed. Our simulation results show good performances for the designed endplate and uniform contact pressure distribution on the fuel cell active area. Finally, a single fuel cell was manufactured and assembled using the simulation parameters, and experimental tests are conducted using pressure films to verify the design.

Review History:

Received: 2019/01/24
Revised: 2019/07/10
Accepted: 2019/09/02
Available Online: 2019/10/23

Keywords:

Geometry of endplate
Contact pressure distribution
Membrane electrode assembly
Finite element simulation
Pressure films

1- Introduction

Nowadays using renewable energies as a suitable replacement of fossil fuels is one of the main challenging areas for researchers among new energy sources, fuel cells are more attractive compared to other sources. Many research works are devoted to investigating the effects of design and assembly parameters on the contact pressure distribution in recent years. Wang et al. [1] performed an experimental study on clamping pressure distribution in Polymer Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFCs) using hydraulic assembly. Alizadeh et al. [2] examined the effects of thickness and material of the endplate, hardness of gasket and number of cells on the pressure distribution. Liu et al. [3] optimized the geometry of the endplate in a way that reduced the weight of the fuel cell and also increased the uniformity of contact pressure distribution. Habibnia et al. [4] discussed the design and assembly parameters in PEMFCs and effects of these parameters on the contact pressure distribution over Gas Diffusion Layer (GDL). Alizadeh et al. [5] proposed a novel clamping mechanism and its influence on contact pressure distribution over Membrane Electrode Assembly (MEA). In this paper, a new geometry is presented for the endplate of the PEMFCs and compared against flat endplates. In the next step, the geometrical parameters of the presented endplate are analyzed to reach uniform contact pressure. To study the effects of various parameters of endplate on the contact pressure distribution over the active area of the fuel cell, 3D finite element simulations are conducted on ABAQUS software. Finally, to validate the results, the fuel cell with the optimum parameters of the endplate geometry is assembled, and experimental tests are conducted to analyze the contact pressure distribution using pressure films.

*Corresponding author's email: barzegari@mut.ac.ir

2- Methodology

ABAQUS commercial code is used to investigate the contact pressure over the MEA and the electrodes. The geometry of the model is shown in Fig. 1.

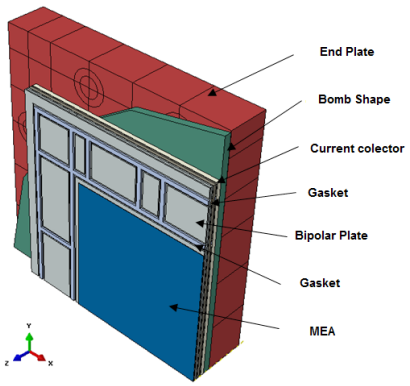


Fig. 1. The employed single fuel cell stack model

Due to the symmetry of the fuel cell and for computational cost purposes, the cell is divided into eight parts, and only one

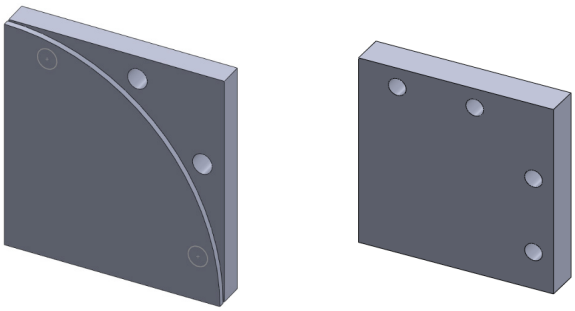
Copyrights for this article are retained by the author(s) with publishing rights granted to Amirkabir University Press. The content of this article is subject to the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY-NC 4.0) License. For more information, please visit https://mej.aut.ac.ir/article_3651.html.

part is modeled. The modeled cell contains endplate, current collector, gasket, bipolar plate, GDL, and the membrane. To exert the clamping pressure bolts are used. In the simulation, for simplicity purposes, compressive stresses are exerted instead of bolts. Fig. 2 shows the positions of exerted stresses on the endplate. The exerted stress is equal to 15 MPa.

3- Results and Discussion

3- 1- Effects of endplate geometry:

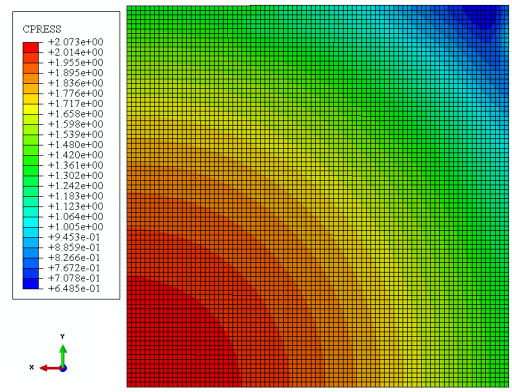
Two different endplates with conventional (flat) and curved geometries are shown in Fig. 2.



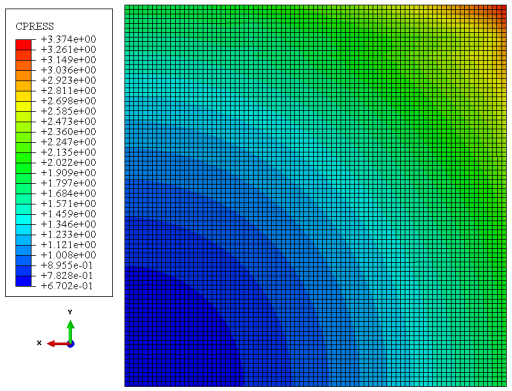
(a) (b)

Fig. 2. Geometries of the endplate; a) conventional, b) curved.

For comparison purposes, design and assembly parameters are considered identical in both models. The thicknesses of the endplate in both models are equal to 30 mm, and the material is Steel in the first step. Contact pressure distributions over MEA for both models are shown in Fig. 3.



(a)



(b)

Fig. 3. Effect of depth of channel on pressure distribution of GDL

As it is shown in Fig. 3, the contact pressure distribution differs from conventional to curved geometries. In the conventional, the compressive stress increases from the center toward the corner. On the other hand, in curved geometry, stress increases from the corner toward the center.

3- 2- Effect of curvature on the mean value and the deviation of stress over MEA:

For a uniform contact pressure distribution in a PEMFC with a curved endplate, different curvatures are investigated. First, the curvatures of 0 to 0.25 mm with 0.05 mm steps were tried for a PEMFC with 200 × 200 mm^2 active area. The distribution of contact pressure on the *x*-axis is shown in Fig. 4.

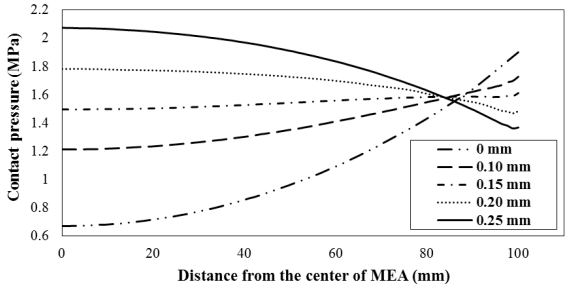


Fig. 4. Contact pressure distribution in x-direction over MEA for different curvatures (0 to 0.25 mm).

3- 3- Effect of endplate material on the contact pressure distribution

The endplate is one of the main components which increases the weight of a fuel cell. Thus, in this paper, the effects of the endplate material (Steel or Aluminum) are discussed to reduce the total weight of the fuel cells. The results of contact pressure as a function of distance from the center of MEA for both Aluminum and Steel endplate with 30mm of thickness are shown in Fig. 5. As can be concluded, in the case of same parameters, the steel endplate leads to more uniform contact pressures.

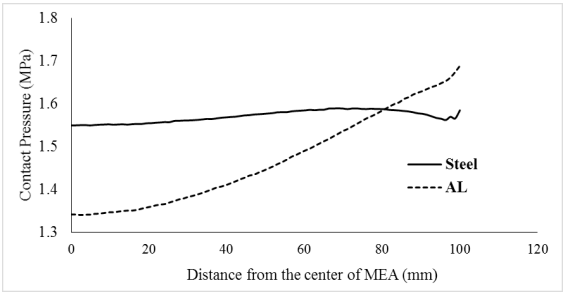


Fig. 5. The result of contact pressure on MEA for Aluminum and Steel endplate with the same thickness of 30mm.

4- Conclusion

In this research, a developed geometry for the endplate of PEMFCs is proposed and investigated. The geometrical parameters of the new endplate to reach a uniform contact pressure distribution are investigated in the next part of the research. Indeed the effects of endplate material are simulated. Comparing the weight of endplates made of Steel and Aluminum, it was concluded that the total weight of the endplate decreases by 50 % when using Aluminum endplates. The optimum geometry was obtained using finite element simulation. The simulation results showed that the optimum contact pressure distribution could be accomplished using

Aluminum endplate with 0.17 mm of curvature (bomb value) and 43 mm of thickness. This geometry results in 1.55 MPa of the mean value of stress and only a deviation of 0.017 MPa from the mean value. Finally, to validate the results of the simulation, a PEMFC was designed and assembled using the optimum geometry of the proposed endplate, and the uniformity of the contact pressure distribution was experimentally shown using pressure measurement films.

5- References

[1] 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.

[2] E. Alizadeh, M. Barzegari, M. Momenifar, M. Ghadimi, S. 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.

[3] B. Liu, M. Wei, G. Ma, W. Zhang, C. Wu, Stepwise optimization of endplate of fuel cell stack assembled by steel belts, International Journal of Hydrogen Energy, 41(4) (2016) 2911-2918.

[4] M. Habibnia, M. Shakeri, S. Nourouzi, Determination of the effective parameters on the fuel cell efficiency, based on sealing behavior of the system, International Journal of Hydrogen Energy, 41(40) (2016) 18147-18156.

[5] E. Alizadeh, M. Ghadimi, M. Barzegari, M. Momenifar, S. Saadat, Development of contact pressure distribution of PEM fuel cell's MEA using novel clamping mechanism, Energy, 131 (2017) 92-97.

This page intentionally left blank

نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر

نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر، دوره ۵۲، شماره ۱۱، سال ۱۳۹۹، صفحات ۳۲۷۵ تا ۳۲۸۸
DOI: 10.22060/mej.2019.15698.6180

ارائه هندسه توسعه یافته صفحه انتهایی برای ایجاد توزیع یکنواخت فشار تماسی روی سطح فعال پیل‌سوختی پلیمری

محمد مهدی برزگری[1*]، مصطفی حبیب‌نیا[2]، محمد مومنی‌فر[1]، مجتبی قدیمی[1]، کمال محمدی[1]

[1] دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران
[2] دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد جویبار، جویبار، ایران

خلاصه: مقاومت تماسی بین صفحات پیل‌سوختی تأثیر زیادی در بازدهی پیل‌های سوختی پلیمری دارد. هندسه صفحه انتهایی پیل‌سوختی پلیمری تأثیر قابل توجهی بر توزیع فشار تماسی روی مجموعه غشا و الکترود و میزان مقاومت تماسی بین صفحات دارد. در این پژوهش، به بررسی تأثیر هندسه صفحه انتهایی بر توزیع فشار تماسی روی غشا از طریق شبیه‌سازی اجزای محدود با استفاده از نرم‌افزار آباکوس پرداخته شد. همچنین، یک هندسه جدید برای صفحه انتهایی مورد بررسی قرار گرفته شد و نتایج به دست آمده از آن با نتایج صفحات انتهایی تخت مقایسه شد. در ادامه، پارامترهای هندسی صفحه انتهایی با انحنا با استفاده از شبیه‌سازی عددی مورد بررسی قرار گرفته و اثر این پارامترها بر توزیع فشار تماسی روی غشا تحلیل گردید. در این شبیه‌سازی‌ها پیل‌سوختی به صورت سه‌بعدی مدل‌سازی شد. نتایج به دست‌آمده از شبیه‌سازی‌ها عملکرد مناسب صفحات انتهایی طراحی شده و توزیع یکنواخت فشار تماسی روی سطح فعال پیل‌سوختی را در مقایسه با صفحات انتهایی متداول مورد استفاده در پیل‌های سوختی نشان می‌دهد. در نهایت، یک پیل‌سوختی پلیمری تک‌سلی با مشخصات هندسی به دست‌آمده از شبیه‌سازی اجزای محدود ساخته شد و توزیع تنش تماسی بر روی غشا با استفاده از فیلم‌های اندازه‌گیری فشار شرکت فوجی‌فیلم با هدف صحه‌گذاری طراحی مورد بررسی قرار گرفت.

تاریخچه داوری:
دریافت: ۰۴-۱۱-۱۳۹۷
بازنگری: ۱۹-۰۴-۱۳۹۸
پذیرش: ۱۱-۰۶-۱۳۹۸
ارائه آنلاین: ۰۱-۰۸-۱۳۹۸

کلمات کلیدی:
صفحه انتهایی منحنی شکل
توزیع فشار تماسی
غشا
فیلم اندازه‌گیری فشار

۱- مقدمه

امروزه استفاده از انرژی‌های نو که بتواند جایگزین مناسبی برای سوخت‌های فسیلی باشد یکی از دغدغه‌های اصلی بشر است. کاهش منابع سوخت‌های فسیلی و آلودگی یکی از عوامل برای جایگزینی این سوخت‌ها است. در بین منابع جدید انرژی، پیل‌های سوختی نسبت به دیگر منابع بیشتر مورد استقبال قرار گرفت. تکنولوژی پیل‌سوختی در وسایل حمل و نقل و نیروگاهی می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. بر اساس نوع الکترولیت، پیل‌های سوختی به پیل‌سوختی اکسید جامد، فسفریک اسید، قلیایی، کربنات مذاب و پیل‌های سوختی پلیمری دسته‌بندی می‌شود [۱].

پیل‌های سوختی پلیمری به دلیل مزایایی همچون دمای عملکرد پایین، چگالی توان بالا و زمان راه‌اندازی پایین، نسبت به دیگر پیل‌های سوختی بیشتر مورد توجه قرار گرفته است. این نوع از پیل‌های سوختی دارای اجزای مختلفی شامل صفحات انتهایی[1]، صفحات دوقطبی[2]، صفحات جمع‌کننده جریان[3]، واشر[4]، مجموعه غشا و الکترود[5] و لایه نفوذ گاز[6] است. در یک پیل‌سوختی، 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 منتقل شده و مورد استفاده قرار می‌گیرد.

دو فاکتور قیمت و بازدهی در استفاده از تکنولوژی پیل‌سوختی تأثیر زیادی دارد. پارامترهای گوناگونی در بازدهی پیل‌های سوختی

1 End Plate
2 Bipolar Plate
3 Current Collector
4 Gasket
5 Membrane Electrode Assembly (MEA)
6 Gas Diffusion Layer (GDL)

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: barzegari@mut.ac.ir

حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لیسانس، از آدرس https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode دیدن فرمائید.

پلیمری تاثیرگذار بوده که تحقیقات گسترده‌ای تاکنون در این زمینه انجام شده است. یکی از پارامترها که در بازدهی پیل‌های سوختی نقشی بسیار مهمی را ایفا می‌کند مقاومت تماسی بین صفحات پیل‌سوختی است که باعث افت اهمی در پیل‌سوختی می‌شود. از آنجایی که مقاومت تماسی بین صفحات دوقطبی و لایه نفوذ گاز مهم‌ترین بخش از تلفات اهمی در پیل‌سوختی را شامل می‌شود، کاهش این مقاومت تأثیر زیادی در بهبود بازدهی پیل‌سوختی خواهد داشت.

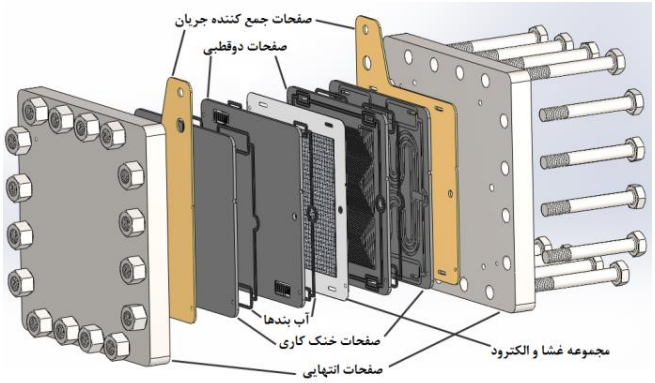
با افزایش فشار تماسی و برقراری تماس کامل بین صفحات میزان مقاومت اهمی کاهش می‌یابد. از سوی دیگر، با افزایش فشار تماسی، میزان تخلخل لایه نفوذ گاز کاهش یافته که در نتیجه آن سطح فعال کاهش یافته و بازدهی پیل‌سوختی کاهش می‌یابد. میزان تنش اعمالی به لایه نفوذ گاز در تمامی سطح باید تا حد امکان یکنواخت و به اندازه بهینه باشد. فشار تماسی غیر یکنواخت باعث ایجاد مقاومت‌های اهمی غیر یکنواخت در نقاط مختلف بین دو سطح می‌شود. میزان تغییر شکل صفحات انتهایی تأثیر مستقیم بر توزیع فشار تماسی روی غشا دارد. هر اندازه تغییر شکل کمتر باشد، توزیع فشار تماسی یکنواخت‌تر می‌شود.

تحقیقات زیادی در مورد بازدهی پیل‌سوختی و همچنین تأثیر پارامترهای طراحی و مونتاژ روی توزیع فشار تماسی روی غشا و لایه نفوذ گاز انجام شده است. لی و همکاران [۱] در سال ۱۹۹۹ تأثیر مقدار فشردگی لایه نفوذ گاز بر روی بازدهی پیل‌سوختی را مورد مطالعه قرار دادند. در پژوهش آن‌ها عنوان شد که افزایش بیش از اندازه نیروی فشاری باعث نگه داشتن رطوبت و مانع دفع آب می‌شود. همچنین، با افزایش فشار مقدار تخلخل کاهش و مقدار هدایت الکتریکی افزایش یافت. جابین و همکاران [۲] در سال ۲۰۰۶ به بررسی تأثیر مقدار تراکم لایه نفوذ گاز بر روی بازدهی پیل‌سوختی پرداختند. چانگ و همکاران [۳] در سال ۲۰۰۷ تأثیر نیروی مهار بر روی بازدهی پیل‌سوختی را مورد بررسی قرار دادند. در این پژوهش تأثیر فشار تماسی بر مقدار تخلخل و مقاومت الکتریکی مورد بررسی قرار گرفت. زی و همکاران [۴] در سال ۲۰۰۹ به بهینه‌سازی نیروی مهار پرداختند. آن‌ها یک مدل سه بعدی ایجاد نموده و در آن تأثیر نیروی مهار بر روی لایه نفوذ گاز و خواص آن و عملکرد پیل‌سوختی را مورد مطالعه قرار دادند. ییم و همکاران [۵] در سال ۲۰۱۰ تأثیر نیروی مهار بر بازدهی پیل‌سوختی را مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها تأثیر میزان فشردگی لایه نفوذ گاز (یکی با فشردگی ۱۵ درصد و دیگری با فشردگی ۳۰ درصد) بر بازدهی پیل‌سوختی ۵ سلولی را به صورت آزمایشگاهی بررسی نمودند. لای و همکاران [۶] مدل مکانیکی-الکتریکی را برای پیش‌بینی مقاومت الکتریکی بین صفحات دوقطبی و لایه نفوذ گاز ارائه نمودند. آن‌ها همچنین تأثیر شعاع دیواره‌های کانال صفحات دوقطبی را بر روی مقاومت الکتریکی مورد بررسی قرار دادند.

در مورد تنش فشاری و بهبود توزیع فشار تماسی بر روی لایه نفوذ گاز تحقیقات محدودی انجام شده که در ادامه به چند مورد از آن‌ها اشاره شده است. لی و همکاران [۷] در سال ۲۰۰۵ به بررسی توزیع فشار در پیل‌سوختی پرداخته و میزان تغییر شکل صفحه انتهایی را با استفاده از شبیه‌سازی مورد مطالعه قرار دادند. بیتس و همکاران [۸] به بررسی تجربی و عددی توزیع فشار بر روی قسمت‌های مختلف پیل‌سوختی در فشارهای مختلف پرداخته‌اند. آن‌ها در ادامه به بررسی توزیع فشار در پیل‌های سوختی من‌فرد و۱۶ سلولی پرداختند. نتایج نشان داد که توزیع فشار بر روی لایه نفوذ گاز بین صفر تا۵ /۲ مگاپاسکال متغیر بوده که در مرکز لایه نفوذ گاز به صفر نزدیک می‌شود. لای و همکاران [۹] در سال ۲۰۰۷ به بررسی اثر پارامترهای طراحی و مونتاژ بر توزیع فشار وارده بر مجموعه غشا و الکترود پرداختند. فشار مونتاژی و موقعیت پیچ‌ها به عنوان پارامترهای متغیر انتخاب شده‌اند. با توجه به شبیه‌سازی‌های موجود تأثیر هر پارامتر روی حداکثر فشار و اختلاف فشار مورد بررسی قرار گرفت. ونگ و همکاران [۱۰] در سال ۲۰۰۸ توزیع فشار تماسی با استفاده از سیستم مهار هیدرولیکی طراحی شده را مورد تحقیق قرار دادند. آن‌ها برای به دست آوردن توزیع فشار یکنواخت به جای افزایش ضخامت صفحه انتهایی که باعث افزایش قیمت و وزن پیل‌سوختی می‌شود، سیستم مهار هیدرولیکی طراحی نمودند. اصغری و همکاران [۱۱] صفحات انتهایی پیل‌سوختی ۵ کیلووات را طراحی نموده و مورد بررسی قرار دادند. هونایو و همکاران [۱۲] در سال ۲۰۱۰ صفحه انتهایی با ساختار کامپوزیتی ساخته و با صفحه انتهایی فولادی مقایسه نمودند. مونتانی و همکاران [۱۳] در سال ۲۰۱۱ توزیع فشار تماسی و تغییر شکل صفحه انتهایی بر اثر نیروی مهار پیل‌سوختی را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها برای اندازه‌گیری توزیع فشار از سنسور فشار استفاده نمودند. کارال و مله [۱۴] به طراحی یک مدل المان محدود

پرداخته و در این مدل تأثیر تعداد سل‌های پیل‌سوختی روی توزیع فشار تماسی وارده بر مجموعه غشا و الکترود را تحلیل نمودند. نتایج این پژوهش نشان داد که با افزایش نیروی مهار میزان تغییر شکل صفحه انتهایی افزایش می‌یابد. همچنین، با افزایش تعداد سلول‌های پی‌ل‌سوختی یکنواختی فشار تماسی بهبود یافته است. زو و همکاران [۱۵] به بررسی تأثیر توزیع فشار غیر یکنواخت بر مقاومت تماسی پرداخته‌اند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد با افزایش یکنواختی توزیع تنش بر روی لایه نفوذ گاز، مقاومت تماسی کاهش می‌یابد. علیزاده و همکاران [۱۶] تأثیر ضخامت و جنس صفحه انتهایی، سختی واشر و تعداد سلول‌های سوختی بر توزیع تنش فشاری روی غشا را مورد مطالعه قرار دادند. در بررسی اثر سختی آب‌بند مشخص شد که روند توزیع فشار تماسی با تغییر سختی بطور قابل توجهی تغییر نمی‌کند، اما فشار اعمال شده برای داشتن همان فشار تماسی با استفاده از آب‌بند نرم‌تر کمتر شده است. لیو و همکاران [۱۷] به بهینه‌سازی هندسی صفحه انتهایی پرداخته که باعث کاهش وزن پیل‌سوختی و افزایش یکنواختی توزیع فشار تماسی شده است. حبیب‌نیا و همکاران [۱۸] پارامترهای طراحی و مونتاژ در پیل‌سوختی را مورد بررسی قرار داده و روی تأثیر این پارامترها در توزیع فشار تماسی وارده بر غشا تحقیق نمودند. در این پژوهش، با بهینه شدن پارامترهای مختلف پیل‌سوختی از جمله ضخامت صفحه انتهایی، تعداد پیچ و نیروی مهار توزیع تنش فشاری بر روی غشا مورد بررسی قرار گرفت. علیزاده و همکاران [۱۹] بر روی سیستم مهار و تأثیر آن بر روی توزیع تنش فشاری روی غشا تحقیق نموده‌اند. آن‌ها برای یکنواخت شدن توزیع فشار تماسی روی غشا از سیستم مهار نیوماتیک استفاده نمودند. نتایج نشان داد که با استفاده از این سیستم مهار، توزیع تنش روی غشا بسیار یکنواخت‌تر از حالت متداول شده است.

همانطور که در پژوهش‌های قبلی ذکر گردید، توزیع فشار تماسی روی غشا و لایه نفوذ گاز نقش بسیار مهمی در بازدهی پیل‌سوختی ایفا می‌نماید. توزیع فشار غیر یکنواخت باعث افزایش تلفات اهمی در نواحی با فشار کم و کاهش میزان تخلخل لایه نفوذ گاز و افزایش افت غلظتی در نواحی با فشار زیاد می‌شود. همچنین، افزایش نیروی مهار باعث ایجاد تغییر شکل بیشتر در صفحه انتهایی و موجب توزیع فشار غیر یکنواخت بر روی غشا می‌شود که این عوامل باعث کاهش بازدهی در پیل‌سوختی خواهد شد.



شکل ۱: شماتیک پیل‌سوختی پلیمری تک‌سل

Fig. 1 Schematic of single PEM fuel cell

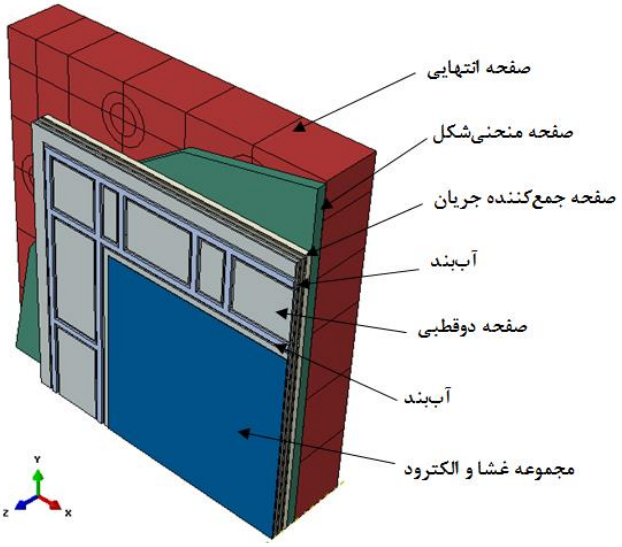
در این پژوهش هندسه جدیدی برای صفحه انتهایی پیل‌سوختی پلیمری ارائه گردید و نتایج به دست‌آمده با نتایج صفحات انتهایی دارای هندسه تخت مورد مقایسه قرار گرفت. در ادامه پارامترهای هندسی صفحه انتهایی با هندسه جدید برای رسیدن به توزیع فشار تماسی یکنواخت مورد بررسی قرار گرفت. برای بررسی اثر پارامترهای مختلف صفحه انتهایی روی توزیع فشار تماسی وارده بر سطح فعال پیل‌سوختی، شبیه‌سازی المان محدود در نرم افزار آباکوس به صورت سه بعدی صورت پذیرفت. در انتها نیز، برای صحه‌گذاری نتایج، پیل‌سوختی مورد نظر با هندسه و پارامترهای بهینه صفحات انتهایی ساخته شد و تست‌های آزمایشگاهی جهت ارزیابی توزیع فشار تماسی با استفاده از فیلم‌های اندازه‌گیری فشار انجام گرفت.

۲- تشریح مدل

شکل ۱ پیل‌سوختی پلیمری با سیستم مهار مرسوم پیچ و مهره را نشان می‌دهد. این پیل‌سوختی شامل صفحات انتهایی، صفحات جمع‌کننده جریان، صفحات خنک‌کاری، صفحات دوقطبی، مجموعه غشا و الکترود، آب‌بندها و اجزای اتصال‌دهنده (پیچ و مهره) می‌باشد.

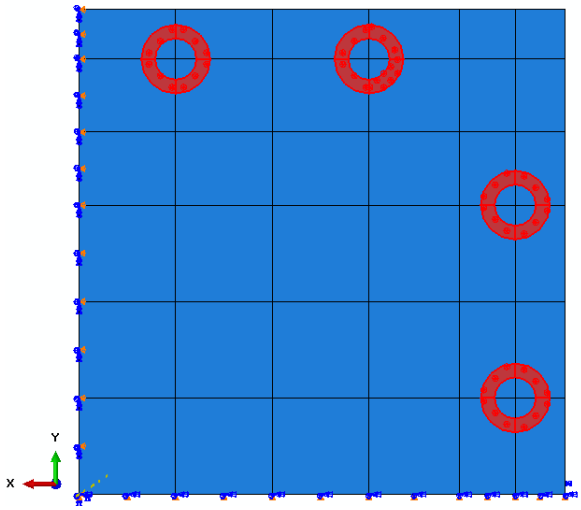
برای بررسی عددی توزیع فشار تماسی روی مجموعه غشا و الکترود از نرم افزار اجزای محدود آباکوس استفاده شده است. هندسه مدل در شکل ۲ نشان داده شده است.

با توجه به تقارن پیل‌سوختی مورد نظر، برای کاهش زمان شبیه‌سازی یک‌هشتم پیل‌سوختی مدل شده است. پیل‌سوختی مدل‌شده شامل صفحه انتهایی، صفحه جمع‌کننده جریان، واشرها، صفحه دوقطبی، لایه نفوذ گاز و غشا می‌باشد. برای اعمال نیروی مهار از پیچ استفاده شده است که برای ساده‌سازی در شبیه‌سازی به جای



شکل ۲: مدل پیل‌سوختی مورد نظر

Fig. 2. The geometry of the model In ABAQUS software.



شکل ۳: محل اعمال تنش فشاری پیچ‌ها روی صفحه انتهایی

Fig. 3. The positions of bolts compressive stresses on the endplate.

جدول ۱: خواص مکانیکی قطعات مورد استفاده در پیل‌سوختی

Table 1. Mechanical properties of the components in the present work.

نام قطعه	جنس قطعه	مدول یانگ (GPa)	Poisson's ratio	چگالی (kg/m^3)
صفحه انتهایی	استیل	۲۰۹	۰/۳	۷۸۰۰
	آلومینیوم	۷۰	۰/۳	۲۹۰۰
صفحات دو قطبی	کامپوزیت پایه گرافیت	۵/۱	۰/۲۵	۲۱۰۰
صفحات خنک کننده	کامپوزیت پایه گرافیت	۵/۱	۰/۲۵	۲۱۰۰
صفحات مسی	مس	۱۰۰	۰/۳۳	۸۹۰۰
لایه نفوذ گاز	کاغذ کربنی	۰/۰۱	۰/۲۵	۴۰۰

استفاده از پیچ، تنش فشاری اعمال گردیده است. در شکل ۳ محل قرارگیری تنش اعمالی روی صفحه انتهایی نمایش داده شده است. مقدار تنش اعمالی برابر با ۱۵ مگاپاسکال می‌باشد.

سطح فعال غشا برابر با ۲۰۰×۲۰۰ میلی‌متر مربع در نظر گرفته شده است. خواص مکانیکی قطعات در جدول ۱ نشان داده شده است.

۳- نتایج

۳-۱- تأثیر هندسه صفحه انتهایی

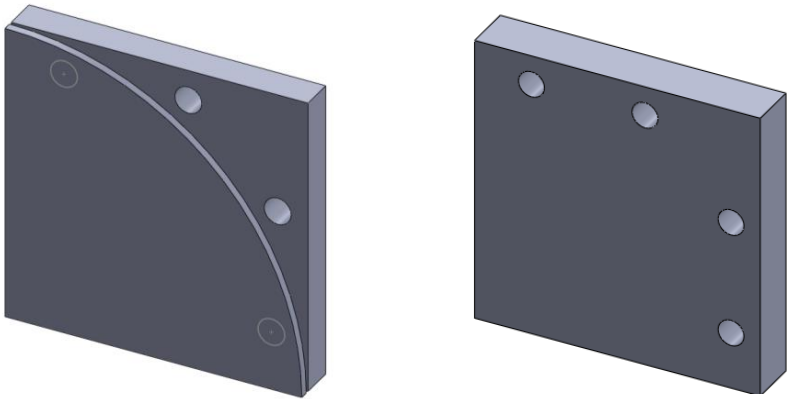
دو صفحه انتهایی یکی با طرح متداول (تخت) و دیگری با یک انحنا در شکل ۴ نشان داده شده است. مدل پیل‌سوختی با دو هندسه متفاوت در نرم‌افزار آباکوس آماده گردید.

برای مقایسه دقیق، پارامترهای طراحی و مونتاژ در دو مدل یکسان در نظر گرفته شده است. ابعاد سطح فعال mm^2 ۲۰۰×۲۰۰ می‌باشد.

نیروی مهار برای هر دو مدل یکسان و برابر با ۱۵ مگاپاسکال است. ضخامت صفحه انتهایی در دو مدل یکسان و برابر با ۳۰ میلی‌متر می‌باشد. جنس این دو صفحه در ابتدا فولاد در نظر گرفته شد. توزیع تنش بر روی صفحات انتهایی در شکل ۵ نشان داده شده است.

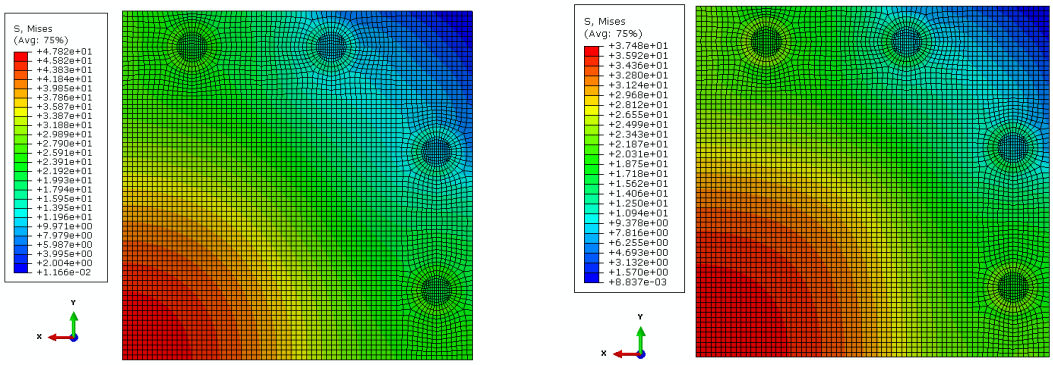
همانطور که مشاهده می‌شود مقدار تنش در صفحه انتهایی منحنی شکل بیشتر از مقدار تنش در صفحه انتهایی ساده می‌باشد. برای بررسی دقیق‌تر، مقدار تنش بر روی دو صفحه انتهایی در سه راستای X، Y و XY مورد بررسی قرار گرفت که در شکل ۶ نمایش داده شده است.

همانطور که مشاهده می‌شود مقدار تنش در هر سه راستا در صفحه انتهایی منحنی شکل بیشتر از صفحه انتهایی ساده است. توزیع فشار تماسی بر روی مجموعه غشا و الکترود برای هر دو صفحه انتهایی در شکل ۷ نمایش داده شده است.



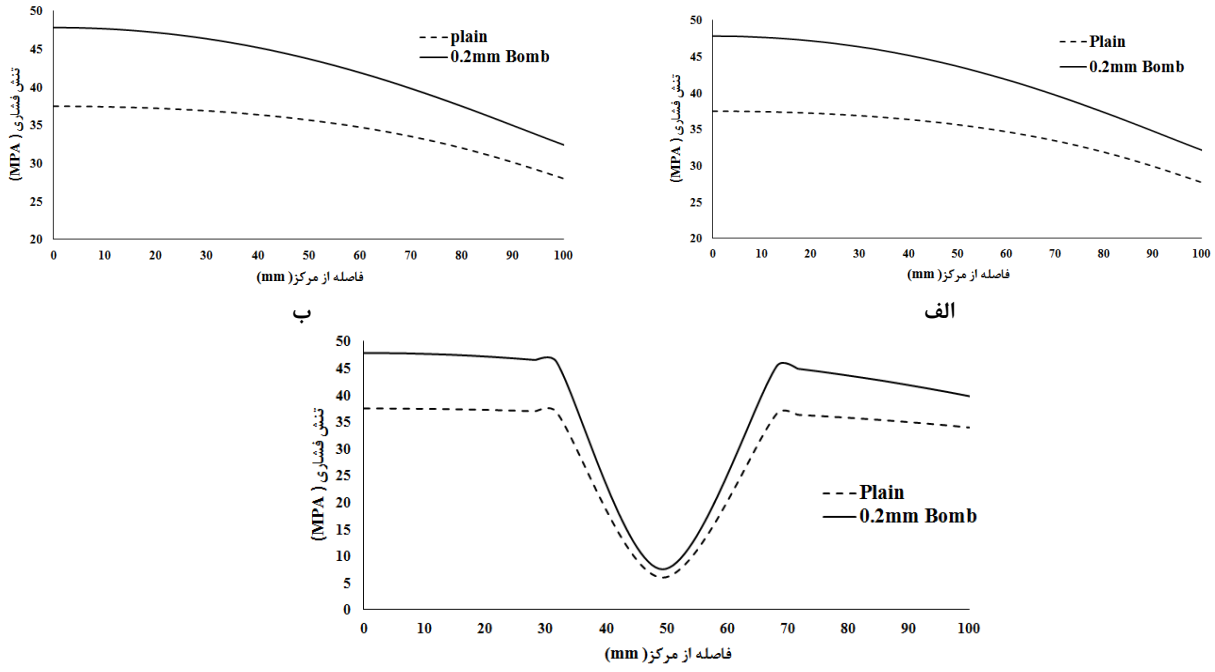
شکل ۴: هندسه‌های مختلف صفحه انتهایی پیل‌سوختی پلیمری

Fig. 4. Geometries of the endplate; a) conventional, b) curved.



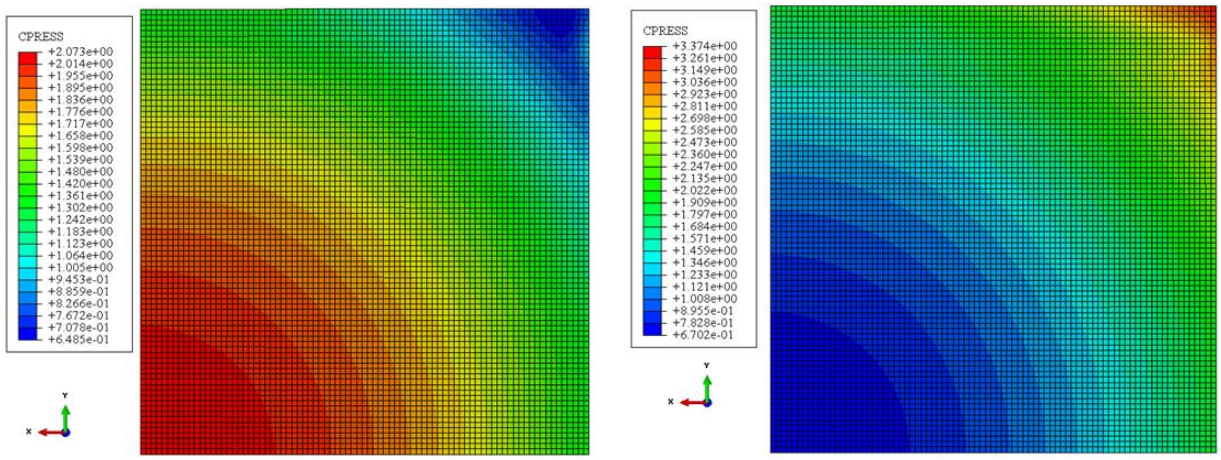
شکل ۵: توزیع تنش بر روی صفحات انتهایی

Fig. 5. Stress distribution on end plates



شکل ۶: توزیع فشار تماسی روی صفحه انتهایی در دو هندسه مختلف در راستای محور الف: X ب: Y ج: XY

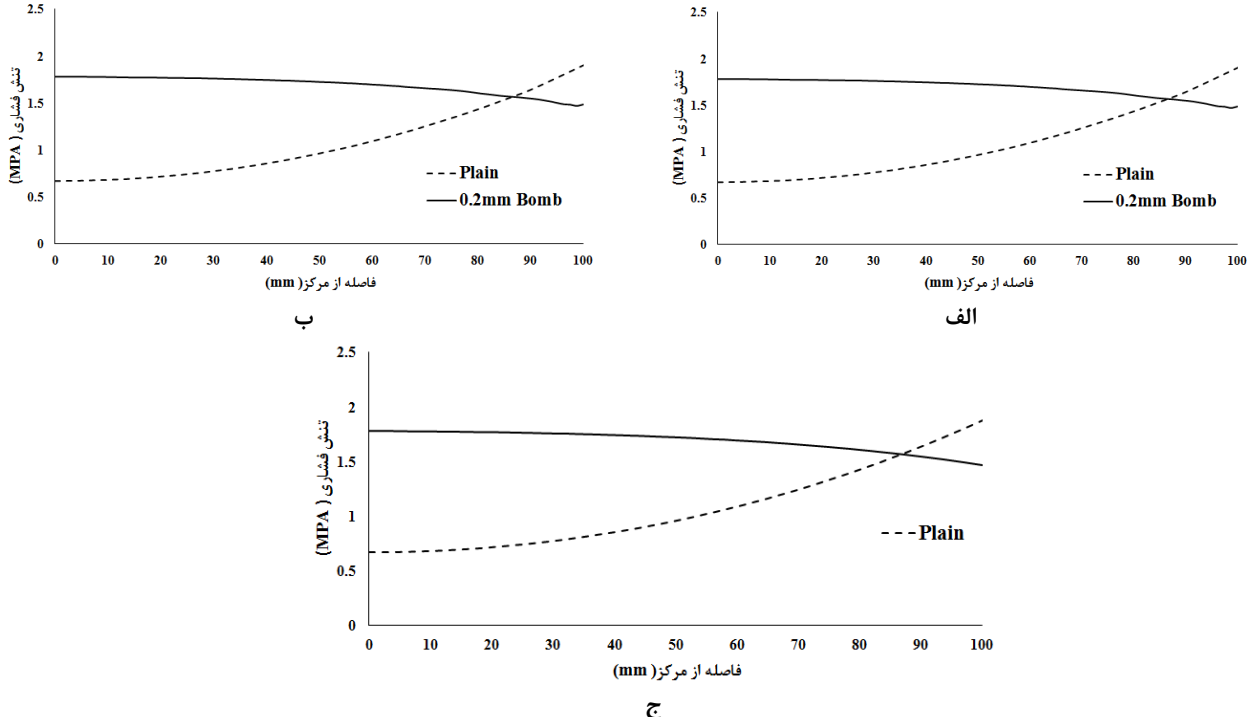
Fig. 6. Contact pressure distribution over MEA on the *x*-axis *y*-axis and *xy*-axis in two different geometries.



ب: صفحه انتهایی دارای انحنا　　الف: صفحه انتهایی ساده

شکل ۷: توزیع فشار تماسی روی غشا برای هندسه‌های مختلف صفحات انتهایی

Fig. 7. Contact pressure distribution over MEA with different endplates geometries; a) conventional, b) curved.



شکل ۸: توزیع فشار تماسی روی غشا در دو هندسه مختلف در راستای محور الف: X ب: Y ج: XY

Fig. 8. Contact pressure distribution over MEA with different endplates geometries; a) X, b) Y, c) XY.

همانطور که مشاهده می‌شود توزیع فشار تماسی روی غشا در هندسه‌های مختلف متفاوت شده است. در هندسه ساده، تنش فشاری از وسط غشا به سمت گوشه افزایش یافته است. ولی در هندسه صفحه انتهایی به همراه یک صفحه دارای انحنا، تنش از گوشه به سمت وسط افزایش یافته است. برای بررسی دقیق‌تر توزیع فشار تماسی در هندسه‌های مختلف، میزان تنش در راستای محورهای X، Y و XY در شکل ۸ نشان داده شده است.

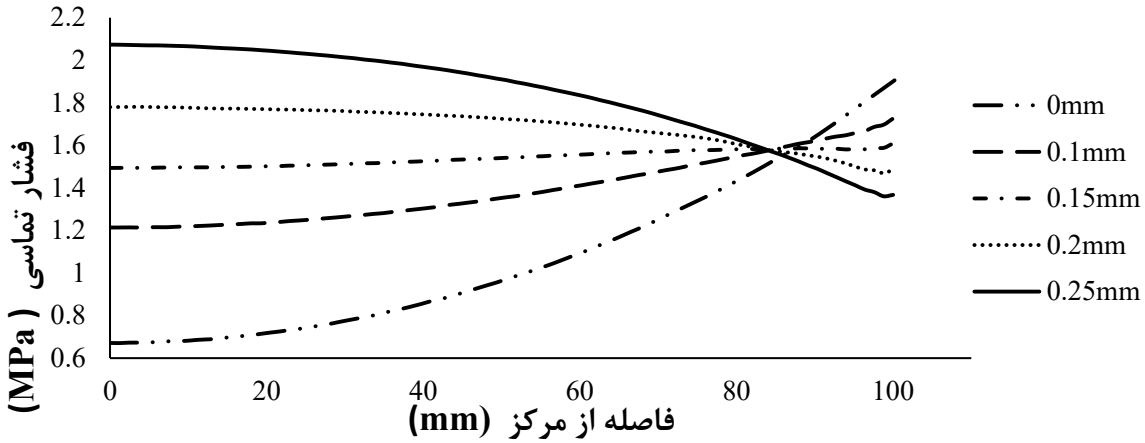
برای درک بهتر، مقدار میانگین تنش و انحراف از مقدار میانگین در هر هندسه در جدول ۲ نشان داده شده است.

همانطور که از نتایج می‌توان مشاهده نمود، مقدار میانگین تنش با قرار دادن این صفحه منحنی شکل افزایش یافت. همچنین، مقدار انحراف از میانگین تنش کاهش یافته که نتیجه آن توزیع یکنواخت‌تر تنش فشاری بر روی غشا می‌باشد. صفحات انتهایی تخت به دلیل تغییر شکل و خمش ایجاد شده به وسیله نیروی پیچ‌ها دارای توزیع

جدول ۲:مقدار تنش و انحراف از مقدار میانگین

Table .2. Mean value and deviation from the mean value of stress over MEA.

هندسه	مقدار میانگین تنش (MPa)	مقدار انحراف از مقدار میانگین (MPa)
صفحه تخت	۰/۹۶۱	۰/۲۳۵
صفحه به همراه انحنا	۱/۶۹	۰/۰۷۵



شکل ۹: توزیع فشار تماسی روی غشا در راستای محور X برای میزان انحناهای مختلف (۰ تا ۰/۲۵ میلی‌متر)

Fig. 9. Contact pressure distribution in *x*-direction over MEA for different curvatures (0 to 0.25 mm).

تنش غیر یکنواخت می‌باشد. تغییر شکل به وجود آمده در صفحات انتهایی را می‌توان با استفاده از یک صفحه محدب شکل که در هندسه استفاده شد جبران نمود. برای رسیدن به توزیع فشار تماسی یکنواخت بر روی غشا، پارامتر انحنا برای صفحه انتهایی مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

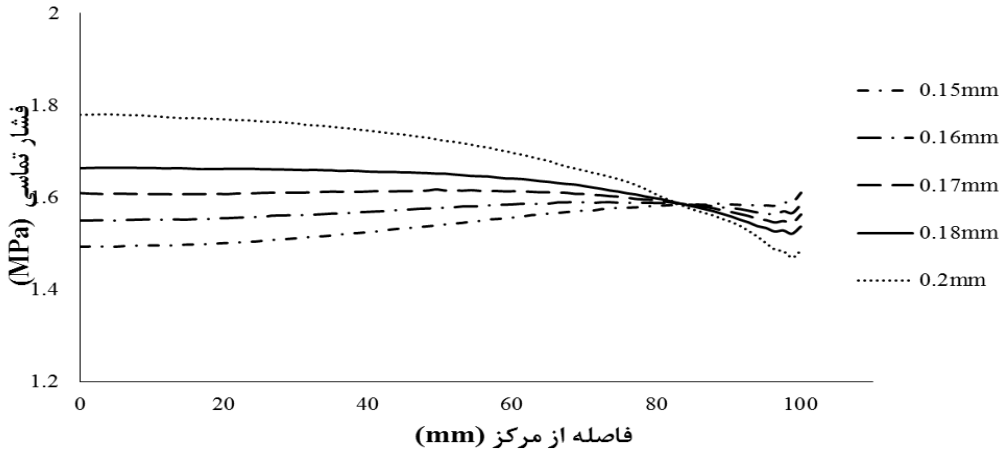
۲-۳- تأثیر میزان انحنا بر مقدار میانگین و انحراف از مقدار میانگین فشار تماسی روی غشا

برای ایجاد توزیع فشار تماسی یکنواخت در پیل‌سوختی با صفحه انتهایی به همراه انحنا، انحناهای مختلف مورد بررسی قرار گرفت. در ابتدا میزان انحنا در بازه صفر تا ۰/۲۵ میلی‌متر با پله‌های ۰/۰۵ میلی‌متر برای پیل‌سوختی با سطح فعال ۲۰۰×۲۰۰ میلی‌متر مربع مورد مطالعه قرار گرفت. توزیع فشار تماسی در راستای محور X در شکل ۹ مشاهده می‌شود.

همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش میزان انحنا از صفر تا ۰/۱۵ میلی‌متر، توزیع فشار تماسی یکنواخت‌تر شده و میزان تنش در وسط سطح فعال افزایش می‌یابد. همچنین، توزیع تنش در نواحی میانی و گوشه سطح فعال یکنواخت شده است. اگرچه با افزایش انحنا، مقدار تنش در نواحی میانی بیشتر از کناره‌های سطح فعال شده است. همانطور که در شکل ۹ نمایش داده شده است، مقدار تنش برای انحنای بین ۰/۱۵ میلی‌متر تا ۰/۲ میلی‌متر منتج به یکنواخت‌ترین توزیع فشار تماسی می‌گردد. با توجه به این موضوع، مطالعه روی صفحات انتهایی با انحناهای ۰/۱۶، ۰/۱۷ و ۰/۱۸ میلی‌متر نیز مورد بررسی قرار گرفت که نتایج به دست‌آمده در شکل ۱۰ ارائه شده است.

همانطور که مشاهده می‌شود بهترین یکنواختی برای صفحات انتهایی با مقدار انحنای ۰/۱۷ و ۰/۱۶ میلی‌متر رخ داده است. در جدول۳ میزان میانگین تنش و مقدار انحراف از مقدار میانگین برای صفحات انتهایی با انحناهای مختلف ارائه شده است.

همانطور که مشخص است، با افزودن انحنا مقدار میانگین تنش بر روی غشا افزایش یافته است. همچنین مقدار انحراف از مقدار میانگین تنش ابتدا کاهش یافته است. این کاهش تا انحنای ۰/۱۶ میلی‌متر ادامه داشته و با افزایش انحنا از این مقدار، میزان انحراف از مقدار میانگین کاهش یافته است. دلیل این موضوع این است که با افزایش انحنا تغییر شکل ایجاد شده در صفحه در اثر نیروی مهار



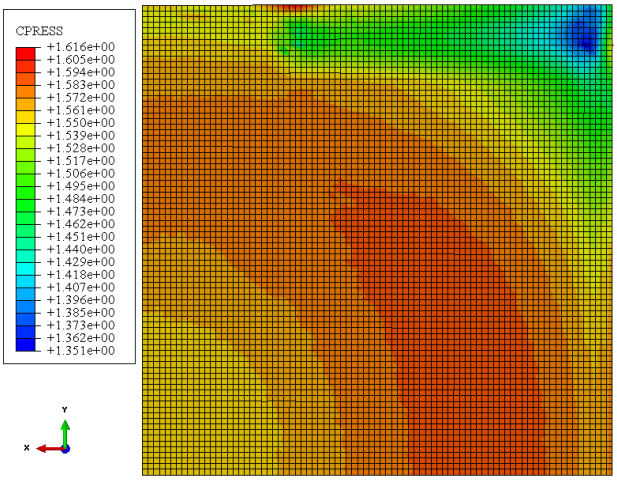
شکل ۱۰: توزیع فشار تماسی روی غشا در راستای محور X برای میزان انحناهای مختلف (۰/۱۵ تا ۰/۲ میلی‌متر)

Fig. 10. Contact pressure distribution in *x*-axis over MEA for different curvatures (0.15 to 0.20 mm).

جدول ۳ :میانگین تنش و انحراف از میانگین تنش برای صفحات انتهایی با انحناهای مختلف

Table 3. Mean value of stress and its deviation for endplates with different curvatures.

انحنای صفحه (mm)	مقدار میانگین X (MPa)	انحراف از مقدار میانگین X (MPa)
۱/۵	۴/۵۳۳	۲/۷۷
۰/۱	۱/۳۸۹	۰/۱۳۱
۰/۱۵	۱/۵۴۱	۰/۰۳۱
۰/۱۶	۱/۵۷۱	۰/۰۱۲
۰/۱۷	۱/۶	۰/۰۱۴
۰/۱۸	۱/۶۳	۰/۰۳۳
۰/۲	۱/۶۹	۰/۰۷۵
۰/۲۵	۱/۸۴	۰/۱۸۴



شکل ۱۱: توزیع فشار تماسی روی غشا برای صفحه انتهایی استیل با انحنای ۰/۱۶ mm

Fig. 11. Contact pressure distribution over MEA for a 0.16 mm curved (bomb-shaped) endplate.

جبران می‌شود و با افزایش انحنا مقدار تنش در میانه‌های غشا افزایش می‌یابد. لازم به ذکر است که اگر مقدار انحنا از مقدار مشخص بیشتر شود، مقدار تنش فشاری در وسط غشا از کناره‌ها بیشتر شده و باعث افزایش انحراف از مقدار میانگین می‌شود. در مقایسه می‌توان گفت میزان انحراف در صفحه انتهایی ساده ۰/۲۳۵ مگاپاسکال بوده که این انحراف در صفحه انتهایی با افزودن صفحه با انحنای ۰/۱۶ میلی‌متر برابر با ۰/۰۱۲ مگاپاسکال شده است. با توجه به نتایج به دست آمده و مقایسه با صفحه انتهایی تخت، توزیع فشار تماسی روی غشا یکنواخت‌تر شده است. توزیع تنش در غشا برای پیل‌سوختی با صفحه انتهایی دارای انحنای ۰/۱۶ میلی‌متر در شکل ۱۱ نشان داده شده است.

همانطور که مشاهده می‌شود، توزیع فشار تماسی بر روی غشا نسبت به توزیع فشار تماسی با صفحه انتهایی تخت بهبود قابل ملاحظه‌ای داشته است.

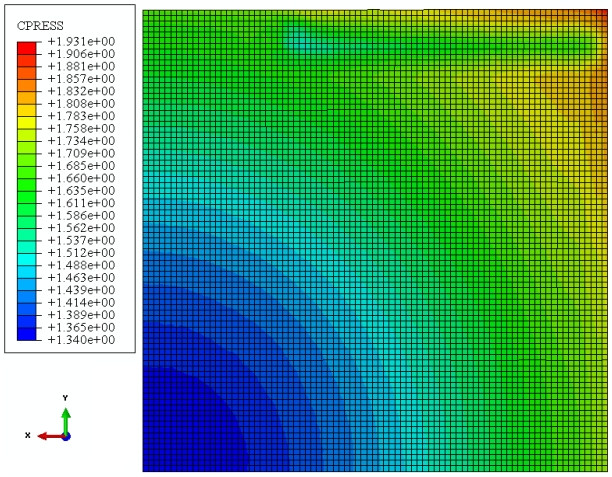
۳-۳- تأثیر جنس صفحه انتهایی بر توزیع فشار تماسی روی غشا

یکی از قطعاتی که در وزن پیل‌سوختی پلیمری تأثیر قابل توجهی دارد، صفحات انتهایی است. به همین دلیل، مطالعه روی اثر جنس صفحه انتهایی (صفحات انتهایی استیل و آلومینیوم) با هدف کاهش وزن پیل‌سوختی پلیمری نیز مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به صلبیت کمتر آلومینیوم نسبت به استیل، صفحه آلومینیومی تخت

جدول ۴ :میانگین تنش و انحراف از میانگین تنش

Table 4. Mean value of pressures and the deviations for Aluminum curved plates.

پارامتر صفحه			تنش گیره‌بندی (MPa)	تنش در راستای X (MPa)		تنش در راستای Y (MPa)		تنش در راستای XY (MPa)	
نوع صفحه	ضخامت	مقدار انحنا		مقدار میانگین	انحراف از مقدار میانگین	مقدار میانگین	انحراف از مقدار میانگین	مقدار میانگین	انحراف از مقدار میانگین
صفحه منحنی شکل (آلومینیومی)	۴۰	۰/۱۷	۱۵	۱/۴۸۴	۰/۱۰۶	۱/۴۶۹	۰/۰۹۳	۱/۵۵۹	۰/۱۴۵
	۴۳		۱۵	۱/۵۵	۰/۰۱۷	۱/۵۳۸	۰/۰۰۸	۱/۵۱۸	۰/۰۴
	۴۵		۱۵	۱/۶۵۲	۰/۰۱۹	۱/۶۴۱	۰/۰۲۸	۱/۵۸۲	۰/۰۹۴
	۵۰		۱۵	۱/۷۶۹	۱/۱۰۸	۱/۷۶۲	۰/۱۱۵	۱/۶۰۳	۰/۲۴۷



شکل ۱۲: توزیع فشار تماسی روی غشا با صفحه انتهایی تخت از جنس آلومینیوم

Fig. 12. Contact pressure distribution over MEA with a conventional (flat) Aluminum end plate

با ضخامت ۴۰ میلی‌متر برای شبیه‌سازی انتخاب گردید. در شکل ۱۲ توزیع فشار تماسی روی غشا برای صفحه انتهایی تخت از جنس آلومینیوم نشان داده شده است.

در ادامه، برای ایجاد توزیع فشار تماسی یکنواخت پارامترهای ضخامت و میزان انحنا در صفحه انتهایی با جنس آلومینیوم مورد بررسی قرار گرفته شد. در جدول ۴ نتایج حاصل از شبیه‌سازی نشان داده شده است.

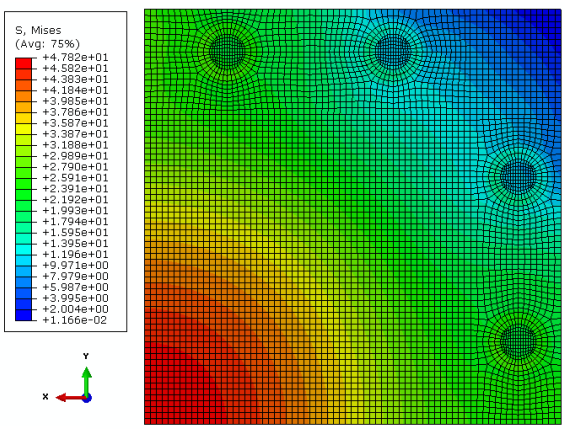
مقدار انحناهای مختلف برای این هندسه مورد بررسی قرار گرفت و با توجه به نتایج به دست‌آمده، توزیع فشار تماسی در انحنای۰/۱۷ میلی‌متر یکنواخت‌تر شده است. به همین دلیل، این انحنا به صورت دقیق‌تر مورد مطالعه قرار گرفت. با توجه به نتایج حاصل از شبیه‌سازی، در ضخامت ۴۳ میلی‌متر انحراف از مقدار میانگین به کمترین مقدار خود در بین دیگر صفحات انتهایی رسیده است. لازم به ذکر است که ضخامت صفحه‌ای که دارای انحنا است برابر با ۵ میلی‌متر بوده که در مجموع ضخامت صفحه انتهایی همراه با انحنا ۴۸ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. توزیع تنش در صفحه انتهایی با دو جنس مختلف در شکل ۱۳ نشان داده شده است.

برای بررسی دقیق‌تر، مقدار تنش در سه راستای X، Y و XY روی دو صفحه انتهایی با جنس‌های آلومینیوم و فولاد مورد بررسی قرار گرفته شد که در شکل ۱۴ نشان داده شده است.

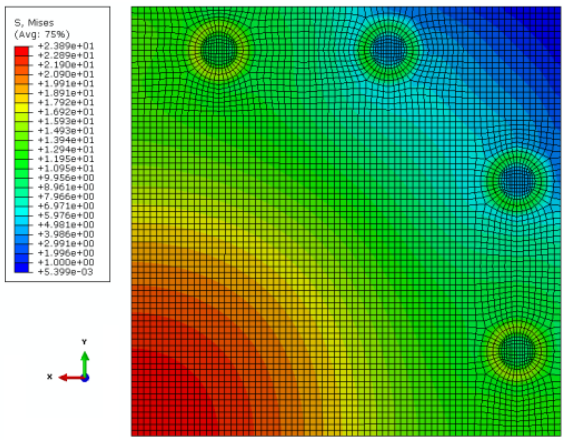
در شکل ۱۵ توزیع فشار تماسی روی غشا با صفحه انتهایی منحنی شکل از جنس آلومینیوم نشان داده شده است. همانطور که در این شکل نمایش داده شده است، توزیع فشار تماسی بر روی غشا دارای یکنواختی مناسبی شده است. مقدار انحراف از مقدار میانگین تنش برای صفحه انتهایی آلومینیومی تخت و صفحه انتهایی آلومینیومی منحنی شکل به ترتیب برابر با ۰/۱۸۷ و ۰/۰۱۷ مگاپاسکال می‌باشد. بنابراین، واضح است که یکنواختی توزیع فشار تماسی بهبود قابل ملاحظه‌ای داشته است.

برای بررسی دقیق‌تر، توزیع فشار تماسی برای ضخامت‌های مختلف صفحه انتهایی در راستای محور X در شکل ۱۶ نشان داده شده است.

همانطور که مشاهده می‌شود، توزیع فشار تماسی در ضخامت ۴۳ میلی‌متر و انحنای ۰/۱۷ میلی‌متر دارای بیشترین یکنواختی می‌باشد. با توجه به نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی‌های انجام شده، مشاهده شد که بهترین توزیع فشار تماسی در صفحات انتهایی



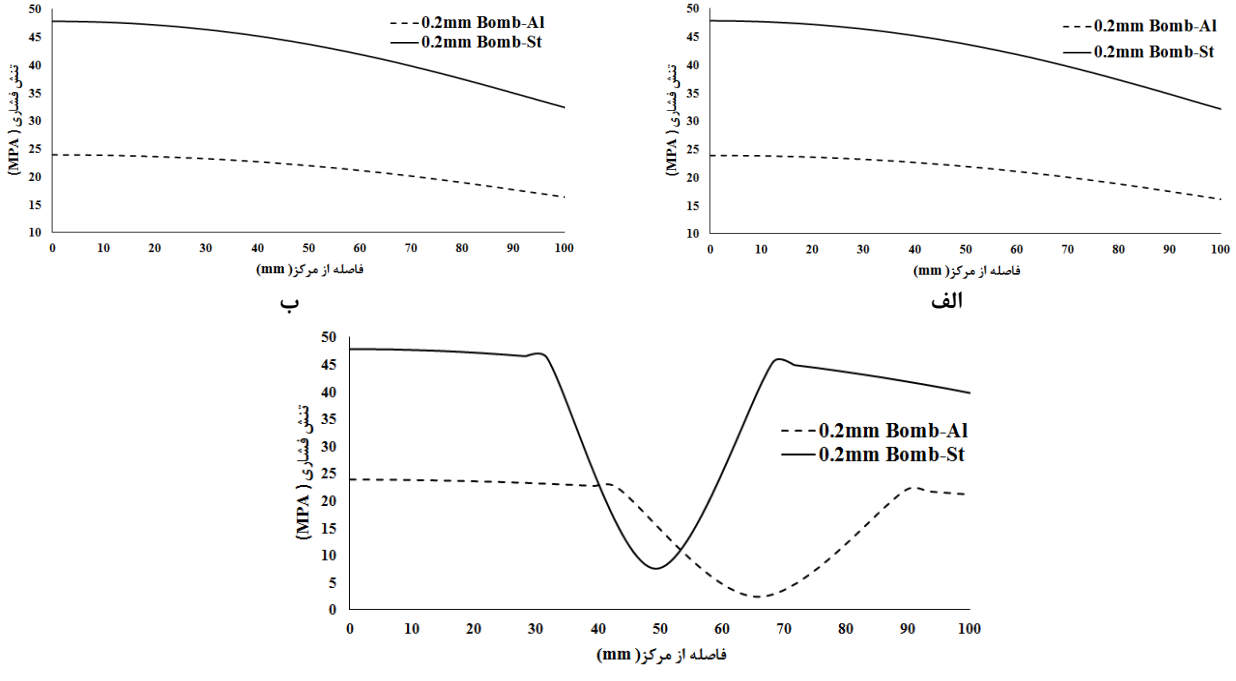
ب: صفحه انتهایی به همراه یک صفحه منحنی از جنس فولاد



الف: صفحه انتهایی به همراه یک صفحه منحنی از جنس آلومینیوم

شکل ۱۳: مقایسه توزیع تنش در صفحه انتهایی از دو جنس فولاد و آلومینیوم

Fig. 13. Comparison of stress distribution at the bottom plate of both steel and aluminum



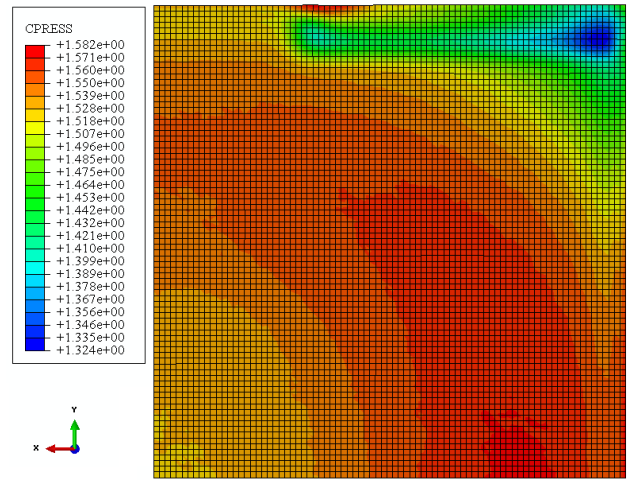
شکل ۱۴:توزیع فشار تماسی روی صفحه انتهایی در راستای محور الف: X ب: Y ج: XY برای دو جنس مختلف

Fig. 14. Distribution of contact pressure on the end plate along the *X*, *Y* and *XY* axis for two different material

استیل و آلومینیوم به ترتیب برای ضخامت‌های ۳۰ و ۴۳ میلی‌متر به دست آمد. با درنظر گرفتن اهمیت وزن صفحات انتهایی که یکی از پارامترهای مهم پیل‌سوختی به شمار می‌رود و با مقایسه وزنی این دو صفحه مشخص می‌شود که استفاده از صفحات انتهایی آلومینیومی منتج به کاهش بیش از ۵۰ درصدی وزن صفحات انتهایی می‌شود که توجیه قابل قبولی در استفاده از این صفحات است.

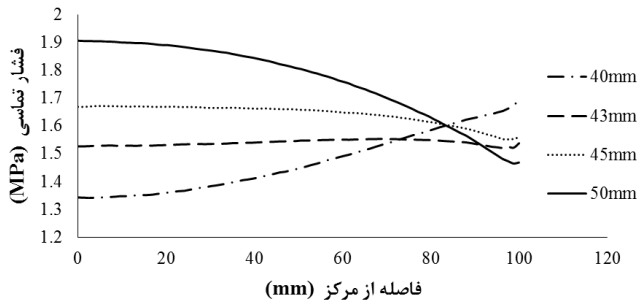
۴-۳- نتایج تست آزمایشگاهی

با توجه به نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی المان محدود، پیل‌سوختی با صفحات انتهایی آلومینیومی با انحنای ۰/۱۷ میلی‌متر



شکل ۱۵: توزیع فشار تماسی روی غشا با صفحه انتهایی منحنی شکل از جنس آلومینیوم

Fig. 15. Contact pressure distribution over MEA for an Aluminum endplate with curvature.



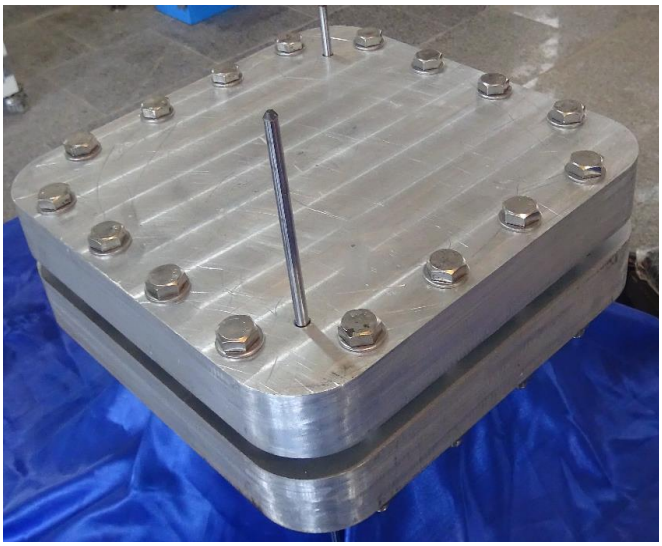
شکل ۱۶: فشار تماسی روی غشا با صفحه انتهایی از جنس آلومینیوم با صفحه دارای انحنا در راستای محور X

Fig. 16. Contact pressure distribution for Aluminum curved endplates in the *x*-direction as a function of plate thickness.

طراحی و ساخته شد. در شکل ۱۷ پیل‌سوختی مورد نظر نشان داده شده است.

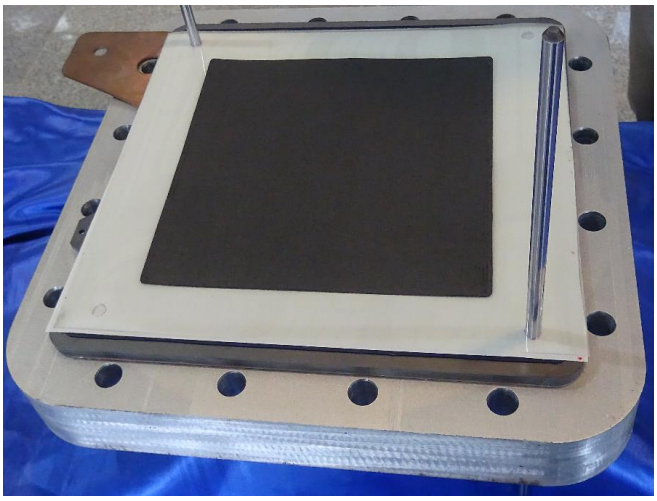
برای بررسی توزیع تنش فشاری روی سطح فعال پیل‌سوختی از فیلم اندازه‌گیری فشار استفاده می‌شود. فیلم فشار بین دو لایه نفوذ گاز قرار داده می‌شود که جانمایی آن در شکل ۱۸ نشان داده شده است.

پس از اتمام مونتاژ پیل سوختی، برای اعمال نیروی مهار از پیچ استفاده شد. مقدار گشتاور اعمالی برای ایجاد تنش فشاری مورد نیاز محاسبه گردید که مقدار آن برابر با ۱۳ نیوتن‌متراست. برای اعمال این گشتاور از ترک‌متر دیجیتال استفاده شد. در شکل ۱۹ نمایی از نحوه وارد نمودن گشتاور به پیچ‌ها به وسیله ترک‌متر و نحوه نمایش



شکل ۱۷:پیل‌سوختی طراحی شده با صفحه انتهایی آلومینیومی

Fig. 17. Assemble cell using a curved Aluminum endplate.

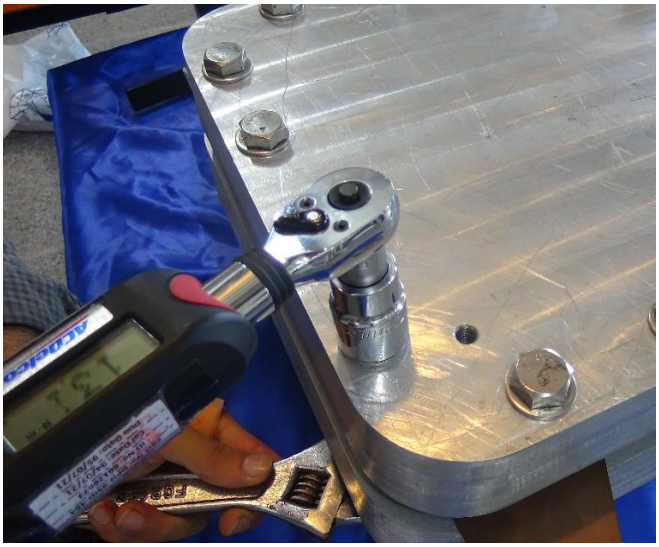


شکل ۱۸: محل قرارگیری فیلم فشار برای انجام تست

Fig. 18. The location of pressure measurement film in a cell.

گشتاور اعمالی نمایش داده شده است.

فیلم‌های اندازه‌گیری فشار مورد استفاده در این پژوهش ساخت شرکت فوجی‌فیلم می‌باشد. این فیلم‌ها حاوی تعداد زیادی میکروکپسول است که پس از اعمال فشار مهار ترکیده و ماده رنگی داخل آن روی سطح فیلم آزاد می‌شود. رابطه مستقیمی بین چگالی رنگ فیلم‌های اندازه‌گیری فشار و شدت فشار اعمالی وجود دارد. با اعمال نیروی مهار و با توجه به تنش فشاری اعمال شده روی سطح فعال پیل‌سوختی، توزیع فشار تماسی روی غشا قابل بررسی خواهد بود. توزیع فشار تماسی روی سطح فعال پیل‌سوختی با صفحات



شکل ۱۹: نحوه استفاده از ترک‌متر برای بستن پیچ‌ها

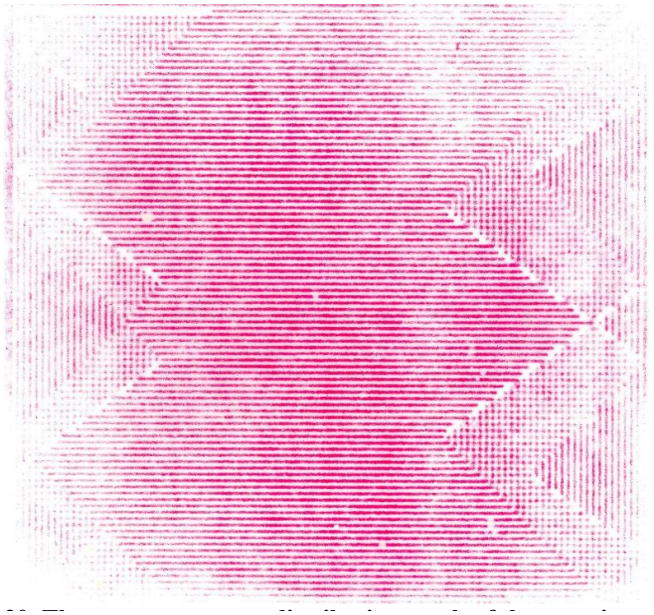
Fig. 19. The use of digital torque meter for fastening the bolts.

انتهایی آلومینیومی بهینه شده در شکل ۲۰ نشان داده شده است.

همانطور که از نتایج شبیه‌سازی و تست‌های آزمایشگاهی انجام شده در این پژوهش مشخص است، توزیع فشار تماسی برای صفحات انتهایی طراحی شده نسبت به صفحات انتهایی تخت بهبود قابل توجهی داشته است که حاکی از طراحی مطلوب هندسه مورد نظر می‌باشد.

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش به بررسی هندسه توسعه یافته برای صفحه انتهایی پرداخته شد. در ابتدا، این هندسه با هندسه تخت متداول در صفحات انتهایی پیل‌سوختی مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی نشان داد که میانگین تنش در نیروی مهار ثابت در مدل پیشنهادی افزایش یافته و همچنین مقدار انحراف از مقدار میانگین نیز به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش یافته است. در ادامه پارامترهای هندسی صفحه برای رسیدن به توزیع یکنواخت در صفحه انتهایی با هندسه جدید مورد بررسی قرار گرفت. همچنین، تأثیر جنس صفحه نیز مورد مطالعه قرار گرفت. از مقایسه وزنی دو صفحه با دو جنس متفاوت مشخص شد که با استفاده از صفحه آلومینیومی مقدار وزن صفحه انتهایی بیش از ٪۵۱ کاهش می‌یابد. هندسه بهینه با جنس آلومینیوم با استفاده از شبیه‌سازی المان محدود تعیین گردید. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که توزیع فشار تماسی بهینه برای صفحه



شکل ۲۰: توزیع فشار تماسی روی غشا در صفحه با هندسه طراحی شده

Fig. 20. The contact pressure distribution result of the experimental test.

آلومینیومی با انحنای ۰/۱۷ میلی‌متر و ضخامت ۴۳ میلی‌متر بوده است که مقدار میانگین تنش و انحراف ازمقدار میانگین برای این حالت به ترتیب برابر با ۱/۵۵ و ۰/۰۱۷ مگاپاسکال است. در ادامه برای صحه‌گذاری نتایج شبیه‌سازی، پیل‌سوختی با صفحات انتهایی مورد نظر ساخته شد و توزیع فشار تماسی با استفاده از فیلم‌های اندازه‌گیری فشار مورد بررسی قرار گرفت.

مراجع

[1] W.K. Lee, C.H. Ho, J. 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.

[2] 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.

[3] W. Chang, J. Hwang, F. Weng, S. Chan, Effect of clamping pressure on the performance of a PEM fuel cell, Journal of Power Sources, 166(1) (2007) 149-154.

[4] 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.

[5] 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) (2010) S59-S61.

[6] X. Lai, 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] 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.

[10]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.

[11]S. Asghari, M. Shahsamandi, M.A. Khorasani, Design and manufacturing of end plates of a 5 kW PEM fuel cell, International Journal of Hydrogen Energy, 35(17) (2010) 9291-9297.

[12]H.N. Yu, S.S. Kim, J. Do Suh, Composite endplates with pre-curvature for PEMFC (polymer electrolyte membrane fuel cell), Composite Structures, 92(6) (2010) 1498-1503.

[13]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, 196(20) (2011) 8484-8493.

[14] C. Carral, P. Mele, A numerical analysis of PEMFC stack assembly through a 3D finite element model, International Journal of Hydrogen Energy, 39(9) (2014) 4516-4530.

[15] P. Zhou, P. Lin, C. 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. Barzegari, M. Momenifar, M. Ghadimi, S. 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. Wei, G. Ma, W. Zhang, C. Wu, Stepwise optimization of endplate of fuel cell stack assembled by steel belts, International Journal of Hydrogen Energy, 41(4) (2016) 2911-2918.

[18] M. Habibnia, M. Shakeri, S. Nourouzi, Determination of the effective parameters on the fuel cell efficiency, based on sealing behavior of the system, International Journal of Hydrogen Energy, 41(40) (2016) 18147-18156.

[19] E. Alizadeh, M. Ghadimi, M. Barzegari, M. Momenifar, S. Saadat, Development of contact pressure distribution of PEM fuel cell's MEA using novel clamping mechanism, Energy, 131 (2017) 92-97.

این صفحه عمداً خالی است