



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

محمد مهدی برزگری<sup>۱\*</sup>، مصطفی حبیب‌نیا<sup>۲</sup>، محمد مومنی‌فر<sup>۱</sup>، مجتبی قدیمی<sup>۱</sup>، کمال محمدی<sup>۱</sup>

<sup>۱</sup> دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران  
<sup>۲</sup> دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد جویبار، جویبار، ایران

### تاریخچه داوری:

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

### کلمات کلیدی:

صفحه انتهایی منحنی شکل  
توزیع فشار تماسی  
غشا  
فیلم اندازه‌گیری فشار

**خلاصه:** مقاومت تماسی بین صفحات پیل سوختی تأثیر زیادی در بازدهی پیل‌های سوختی پلیمری دارد. هندسه صفحه انتهایی پیل سوختی پلیمری تأثیر قابل توجهی بر توزیع فشار تماسی روی مجموعه غشا و الکتروود 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 پیل سوختی به صورت سه‌بعدی مدل‌سازی شد. نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی‌ها عملکرد مناسب صفحات انتهایی طراحی شده و توزیع یکنواخت فشار تماسی روی سطح فعال پیل سوختی را در مقایسه با صفحات انتهایی متداول مورد استفاده در پیل‌های سوختی نشان می‌دهد. در نهایت، یک پیل سوختی پلیمری تک‌سلی با مشخصات هندسی به دست آمده از شبیه‌سازی اجزای محدود ساخته شد و توزیع تنش تماسی بر روی غشا با استفاده از فیلم‌های اندازه‌گیری فشار شرکت فوجی فیلم با هدف صحت‌گذاری طراحی مورد بررسی قرار گرفت.

### ۱- مقدمه

از پیل‌های سوختی دارای اجزای مختلفی شامل صفحات انتهایی<sup>۱</sup>، صفحات دوقطبی<sup>۲</sup>، صفحات جمع‌کننده جریان<sup>۳</sup>، واشر<sup>۴</sup>، مجموعه غشا و الکتروود<sup>۵</sup> و لایه نفوذ گاز<sup>۶</sup> است. در یک پیل سوختی، سوخت به طور پیوسته به الکتروود آند و اکسیژن به الکتروود کاتد تزریق شده و واکنش‌های الکتروشیمیایی در الکتروودها 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 پیل سوختی تأثیر زیادی دارد. پارامترهای گوناگونی در بازدهی پیل‌های سوختی

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 پیل سوختی در وسایل حمل و نقل و نیروگاهی می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. بر اساس نوع الکترولیت، پیل‌های سوختی به پیل سوختی 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

\* نویسنده‌دار مکاتبات: barzegari@mut.ac.ir

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

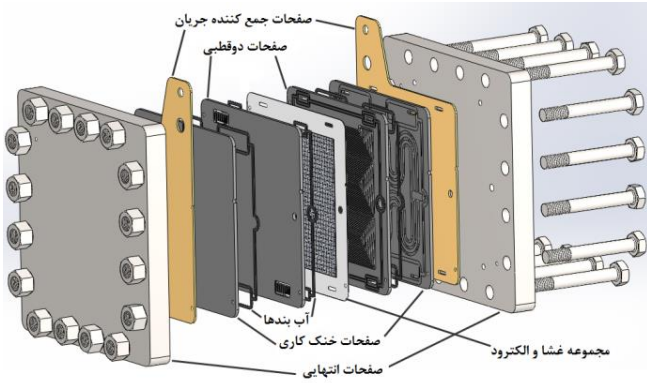


پلیمری تاثیرگذار بوده که تحقیقات گسترده‌ای تاکنون در این زمینه انجام شده است. یکی از پارامترها که در بازدهی پیل‌های سوختی نقشی بسیار مهمی را ایفا می‌کند مقاومت تماسی بین صفحات پیل سوختی است که باعث افت اهمی در پیل سوختی می‌شود. از آنجایی که مقاومت تماسی بین صفحات دوقطبی و لایه نفوذ گاز مهم‌ترین بخش از تلفات اهمی در پیل سوختی را شامل می‌شود، کاهش این مقاومت تأثیر زیادی در بهبود بازدهی پیل سوختی 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 پیل سوختی 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 پیل سوختی 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 پیل سوختی 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 پیل سوختی پرداختند. چانگ و همکاران [۳] در سال ۲۰۰۷ تأثیر نیروی مهار بر روی بازدهی پیل سوختی 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 پیل سوختی را مورد مطالعه قرار دادند. ییم و همکاران [۵] در سال ۲۰۱۰ تأثیر نیروی مهار بر بازدهی پیل سوختی 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 پیل سوختی 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 پیل سوختی 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 پیل سوختی در فشارهای مختلف پرداخته‌اند. آن‌ها در ادامه به بررسی توزیع فشار در پیل‌های سوختی من‌فرد و ۱۶ سلولی پرداختند. نتایج نشان داد که توزیع فشار بر روی لایه نفوذ گاز بین صفر تا ۵/۲ 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 الکتروود 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 پیل سوختی می‌شود، سیستم مهار هیدرولیکی طراحی نمودند. اصغری و همکاران [۱۱] صفحات انتهایی پیل سوختی 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 پیل سوختی 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



شکل ۱: شماتیک پیل سوختی پلیمری تک سل  
Fig. 1 Schematic of single PEM fuel cell

در این پژوهش هندسه جدیدی برای صفحه انتهایی پیل سوختی پلیمری ارائه گردید و نتایج به دست آمده 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 پیل سوختی، شبیه سازی المان محدود در نرم افزار آباکوس به صورت سه بعدی صورت پذیرفت. در انتها نیز، برای صحت گذاری نتایج، پیل سوختی مورد نظر با هندسه و پارامترهای بهینه صفحات انتهایی ساخته شد و تست های آزمایشگاهی جهت ارزیابی توزیع فشار تماسی با استفاده از فیلم های اندازه گیری فشار انجام گرفت.

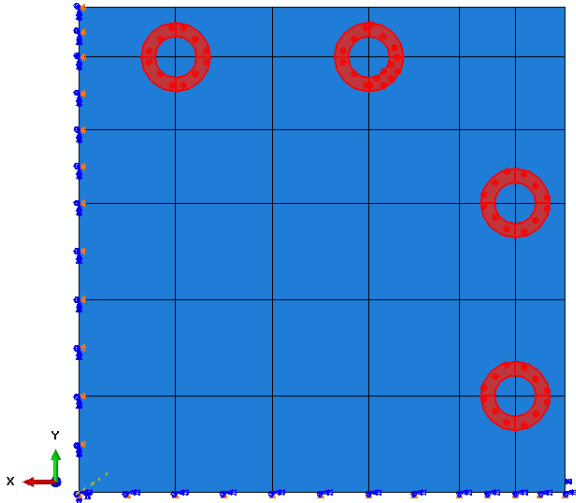
## ۲- تشریح مدل

شکل ۱ پیل سوختی پلیمری با سیستم مهار مرسوم پیچ و مهره را نشان می دهد. این پیل سوختی شامل صفحات انتهایی، صفحات جمع کننده جریان، صفحات خنک کاری، صفحات دوقطبی، مجموعه غشا و الکتروود، آب بندها و اجزای اتصال دهنده (پیچ و مهره) می باشد. برای بررسی عددی توزیع فشار تماسی روی مجموعه غشا و الکتروود از نرم افزار اجزای محدود آباکوس استفاده شده است. هندسه مدل در شکل ۲ نشان داده شده است.

با توجه به تقارن پیل سوختی مورد نظر، برای کاهش زمان شبیه سازی یک هشتم پیل سوختی مدل شده است. پیل سوختی مدل شده شامل صفحه انتهایی، صفحه جمع کننده جریان، واشرها، صفحه دوقطبی، لایه نفوذ گاز و غشا می باشد. برای اعمال نیروی مهار از پیچ استفاده شده است که برای ساده سازی در شبیه سازی به جای

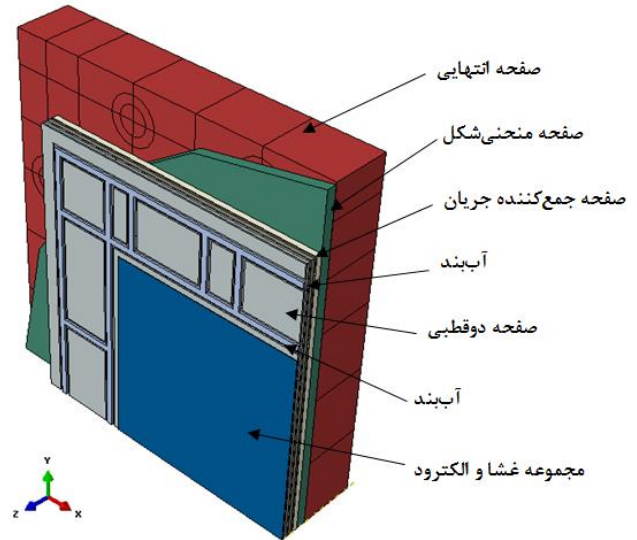
پرداخته و در این مدل تأثیر تعداد سل های پیل سوختی روی توزیع فشار تماسی وارده بر مجموعه غشا و الکتروود را تحلیل نمودند. نتایج این پژوهش نشان داد که با افزایش نیروی مهار میزان تغییر شکل صفحه انتهایی افزایش می یابد. همچنین، با افزایش تعداد سلول های پیل سوختی یکنواختی فشار تماسی بهبود یافته است. زو و همکاران [۱۵] به بررسی تأثیر توزیع فشار غیر یکنواخت بر مقاومت تماسی پرداخته اند. نتایج آن ها نشان می دهد با افزایش یکنواختی توزیع تنش بر روی لایه نفوذ گاز، مقاومت تماسی کاهش می یابد. علیزاده و همکاران [۱۶] تأثیر ضخامت و جنس صفحه انتهایی، سختی واشر و تعداد سلول های سوختی بر توزیع تنش فشاری روی غشا را مورد مطالعه قرار دادند. در بررسی اثر سختی آب بند مشخص شد که روند توزیع فشار تماسی با تغییر سختی بطور قابل توجهی تغییر نمی کند، اما فشار اعمال شده برای داشتن همان فشار تماسی با استفاده از آب بند نرم تر کمتر شده است. لیو و همکاران [۱۷] به بهینه سازی هندسی صفحه انتهایی پرداخته که باعث کاهش وزن پیل سوختی و افزایش یکنواختی توزیع فشار تماسی شده است. حبیب نیا و همکاران [۱۸] پارامترهای طراحی و مونتاژ در پیل سوختی 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 پیل سوختی 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 نموده اند. آن ها 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 یکنواخت تر از حالت متداول شده است.

همانطور که در پژوهش های قبلی ذکر گردید، توزیع فشار تماسی روی غشا و لایه نفوذ گاز نقش بسیار مهمی در بازدهی پیل سوختی ایفا می نماید. 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 می شود. همچنین، افزایش نیروی مهار باعث ایجاد تغییر شکل بیشتر در صفحه انتهایی و موجب توزیع فشار غیر یکنواخت بر روی غشا می شود که این عوامل باعث کاهش بازدهی در پیل سوختی خواهد شد.



شکل ۳: محل اعمال تنش فشاری پیچ‌ها روی صفحه انتهایی

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



شکل ۲: مدل پیل سوختی مورد نظر

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

جدول ۱: خواص مکانیکی قطعات مورد استفاده در پیل سوختی

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

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

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  $XY$  و  $Y, X$  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 الکتروود برای هر دو صفحه انتهایی در شکل ۷ نمایش داده شده است.

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.

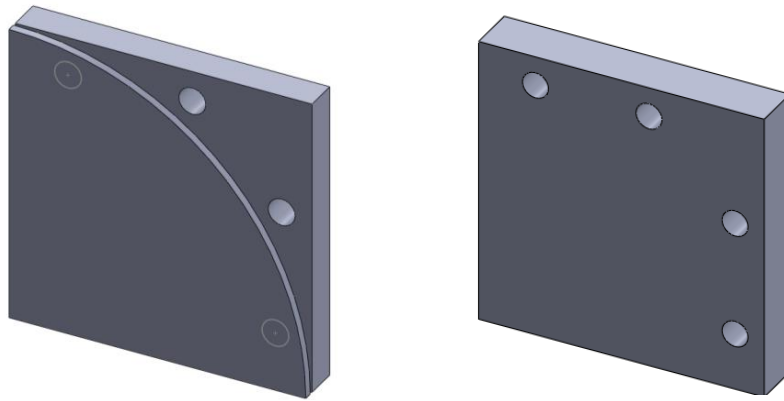
سطح فعال غشا برابر با  $200 \times 200$  میلی‌متر مربع در نظر گرفته شده است. خواص مکانیکی قطعات در جدول ۱ نشان داده شده است.

### ۳- نتایج

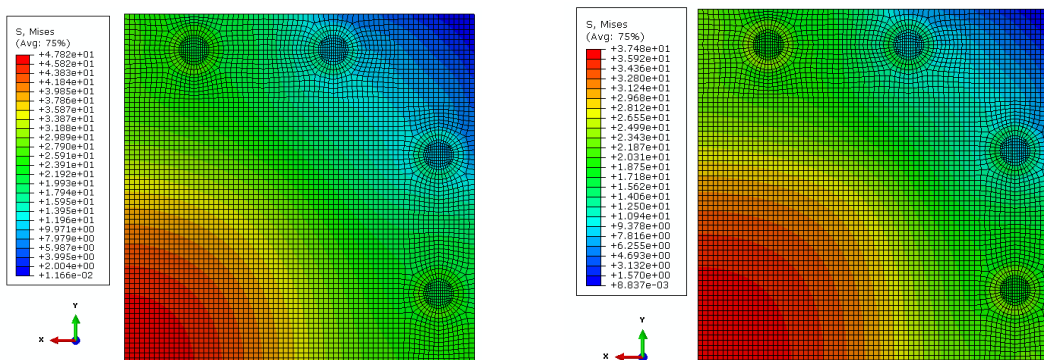
#### ۳-۱- تأثیر هندسه صفحه انتهایی

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

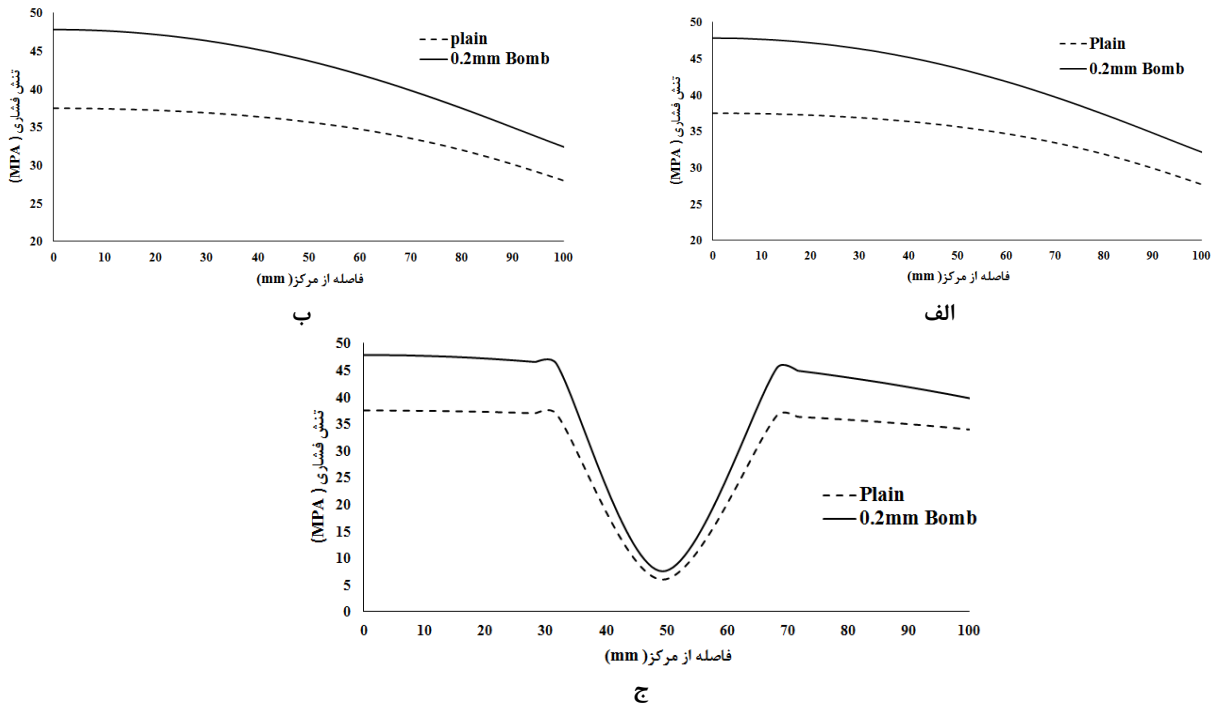
برای مقایسه دقیق، پارامترهای طراحی و مونتاژ در دو مدل یکسان در نظر گرفته شده است. ابعاد سطح فعال  $200 \times 200 \text{ mm}^2$  می‌باشد.



شکل ۴: هندسه‌های مختلف صفحه انتهایی پیل سوختی پلیمری  
 Fig. 4. Geometries of the endplate; a) conventional, b) curved.

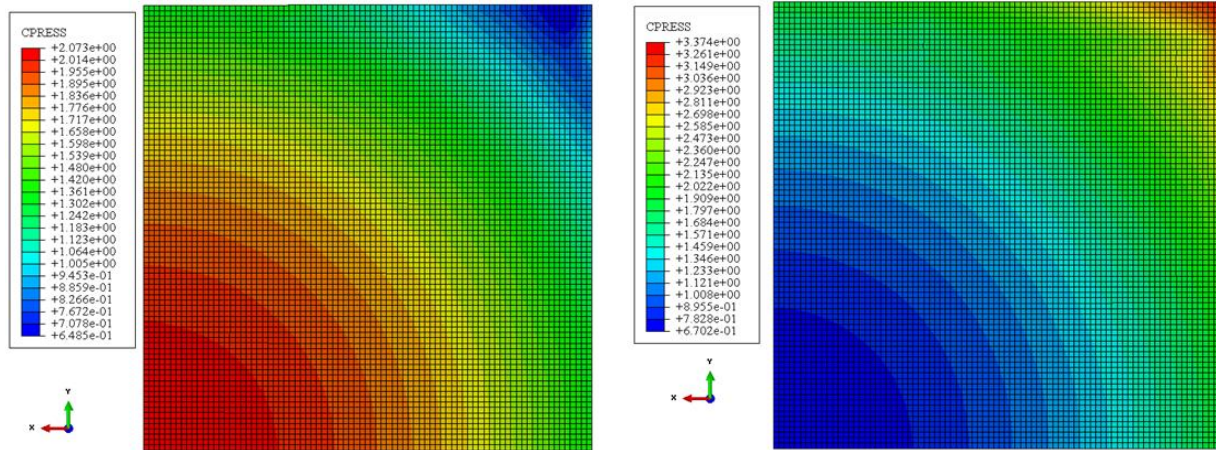


شکل ۵: توزیع تنش بر روی صفحات انتهایی  
 Fig. 5. Stress distribution on end plates



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.



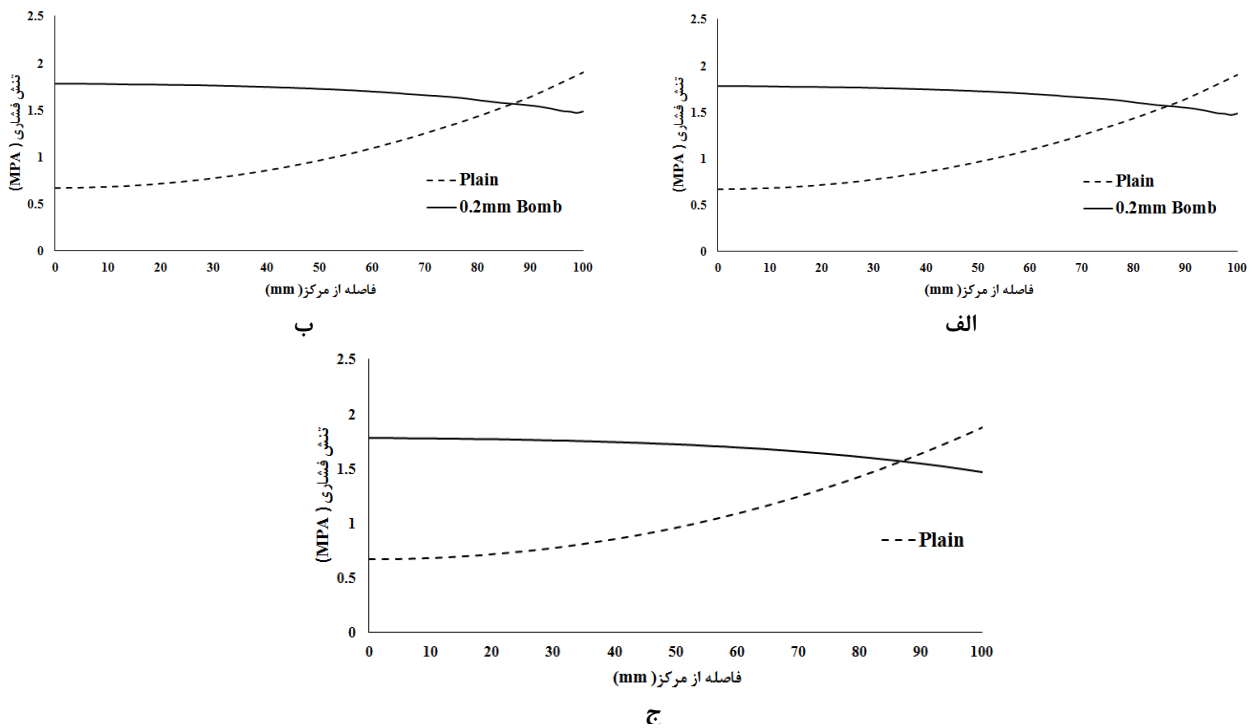


ب: صفحه انتهایی دارای انحنا

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.



ب

الف

ج

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.

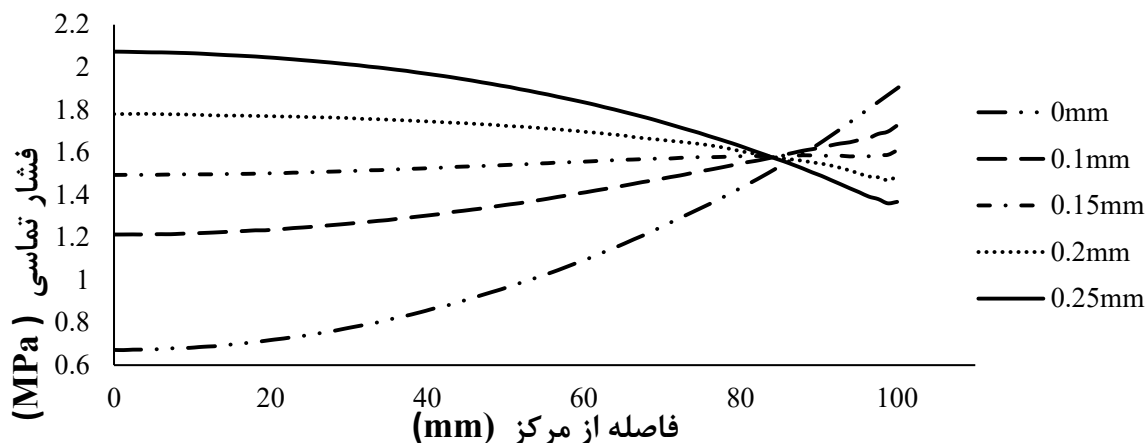
برای درک بهتر، مقدار میانگین تنش و انحراف از مقدار میانگین در هر هندسه در جدول ۲ نشان داده شده است. همانطور که از نتایج می‌توان مشاهده نمود، مقدار میانگین تنش با قرار دادن این صفحه منحنی شکل افزایش یافت. همچنین، مقدار انحراف از میانگین تنش کاهش یافته که نتیجه آن توزیع یکنواخت‌تر تنش فشاری بر روی غشا می‌باشد. صفحات انتهایی تخت به دلیل تغییر شکل و خم شدن ایجاد شده به وسیله نیروی پیچ‌ها دارای توزیع

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.

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).

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 انحناهای 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 دست آمده در شکل ۱۰ ارائه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود بهترین یکنواختی برای صفحات انتهایی با مقدار انحنا ۰/۱۷ و ۰/۱۶ میلی‌متر رخ داده است. در جدول ۳ میزان میانگین تنش و مقدار انحراف از مقدار میانگین برای صفحات انتهایی با انحناهای مختلف ارائه شده است.

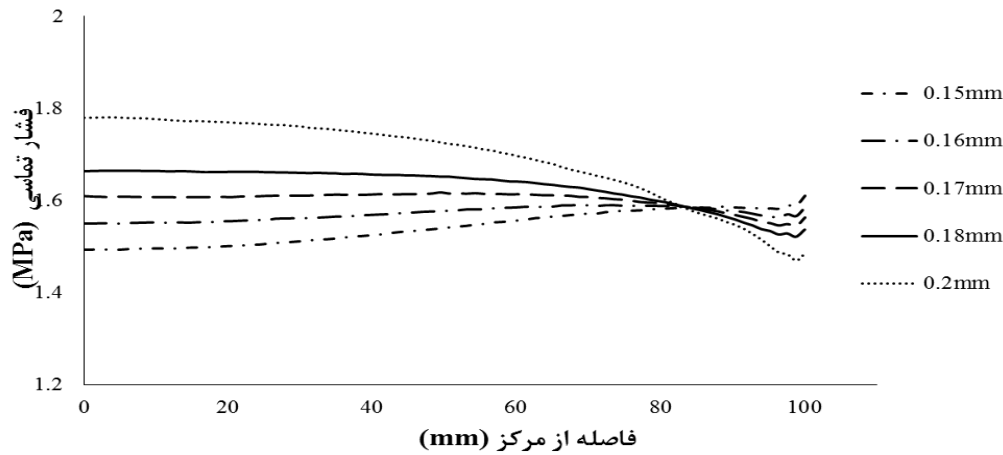
همانطور که مشخص است، با افزودن انحنا مقدار میانگین تنش بر روی غشا افزایش یافته است. همچنین مقدار انحراف از مقدار میانگین تنش ابتدا کاهش یافته است. این کاهش تا انحنا ۰/۱۶ میلی‌متر ادامه داشته و با افزایش انحنا از این مقدار، میزان انحراف از مقدار میانگین کاهش یافته است. دلیل این موضوع این است که با افزایش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

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.

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

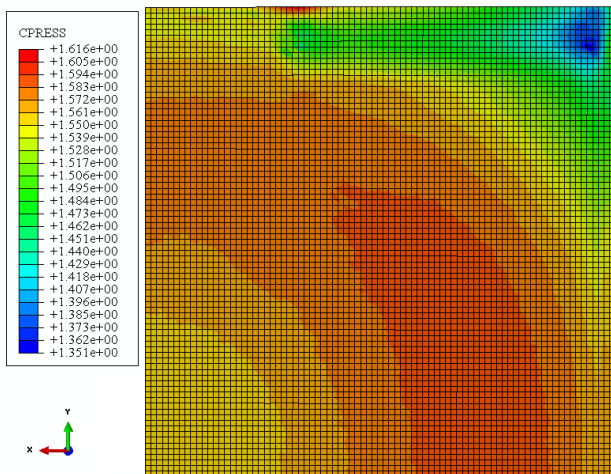
برای ایجاد توزیع فشار تماسی یکنواخت در پیل سوختی با صفحه انتهایی به همراه انحنا، انحناهای مختلف مورد بررسی قرار گرفت. در ابتدا میزان انحنا در بازه صفر تا ۰/۲۵ میلی‌متر با پله‌های ۰/۰۵ میلی‌متر برای پیل سوختی با سطح فعال ۲۰۰×۲۰۰ میلی‌متر مربع مورد مطالعه قرار گرفت. توزیع فشار تماسی در راستای محور X در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



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).



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

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

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 پیل سوختی 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 پیل سوختی پلیمری نیز مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به صلبیت کمتر آلومینیوم نسبت به استیل، صفحه آلومینیومی تخت

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.

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

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 انحنا ۰/۱۶ میلی‌متر برابر با ۰/۱۲ 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 پیل سوختی با صفحه انتهایی دارای انحنا ۰/۱۶ میلی‌متر در شکل ۱۱ نشان داده شده است.



جدول ۴: میانگین تنش و انحراف از میانگین تنش

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

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

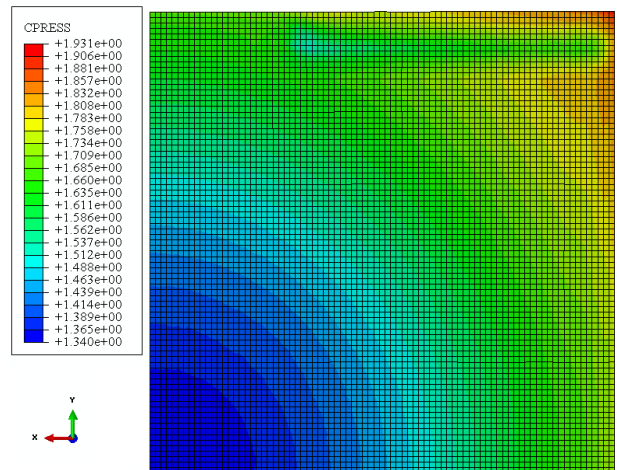
در ضخامت ۴۳ میلی‌متر انحراف از مقدار میانگین به کمترین مقدار خود در بین دیگر صفحات انتهایی رسیده است. لازم به ذکر است که ضخامت صفحه‌ای که دارای انحنای برابر با ۵ میلی‌متر بوده که در مجموع ضخامت صفحه انتهایی همراه با انحنای ۴۸ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. توزیع تنش در صفحه انتهایی با دو جنس مختلف در شکل ۱۳ نشان داده شده است.

برای بررسی دقیق‌تر، مقدار تنش در سه راستای  $XY$  و  $Y$  و  $X$  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



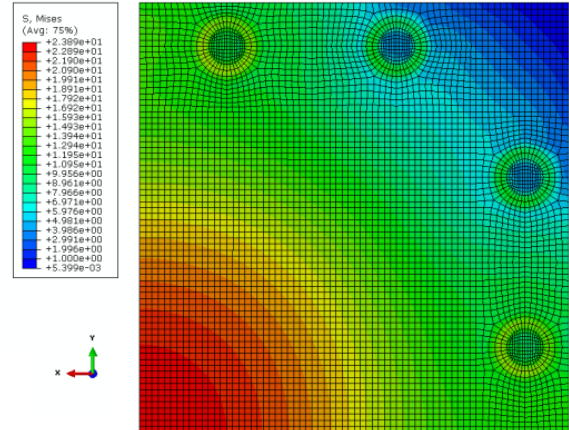
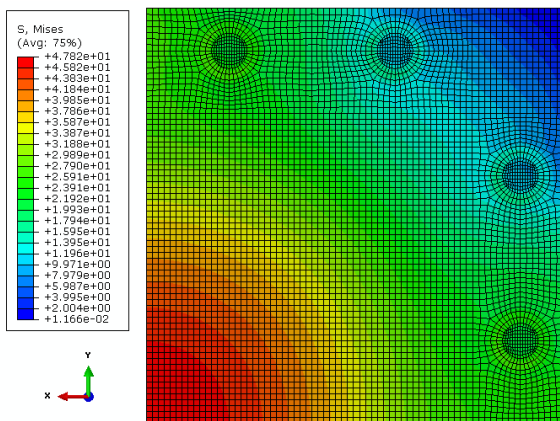
شکل ۱۲: توزیع فشار تماسی روی غشا با صفحه انتهایی تخت از جنس آلومینیوم

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 انحنای در صفحه انتهایی با جنس آلومینیوم مورد بررسی قرار گرفته شد. در جدول ۴ نتایج حاصل از شبیه‌سازی نشان داده شده است.

مقدار انحنای مختلف برای این هندسه مورد بررسی قرار گرفت و با توجه به نتایج به دست آمده، توزیع فشار تماسی در انحنای ۰/۱۷ میلی‌متر یکنواخت‌تر شده است. به همین دلیل، این انحنای به صورت دقیق‌تر مورد مطالعه قرار گرفت. با توجه به نتایج حاصل از شبیه‌سازی،

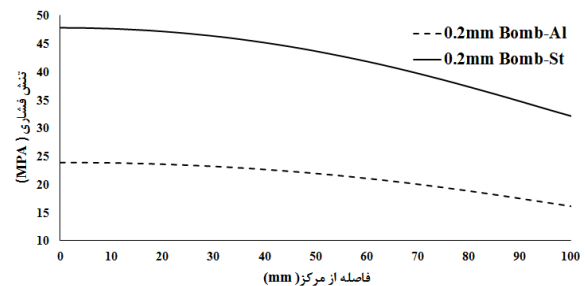
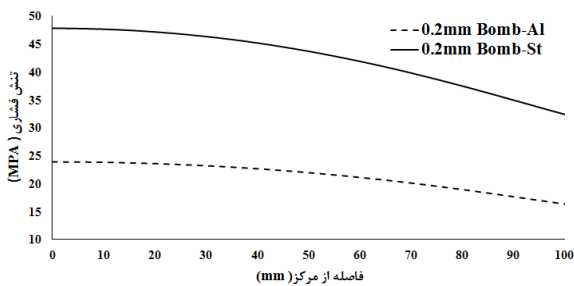


الف: صفحه انتهایی به همراه یک صفحه منحنی از جنس آلومینیوم

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

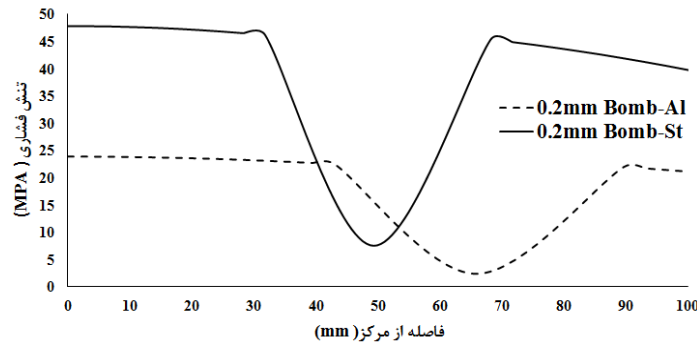
شکل ۱۳: مقایسه توزیع تنش در صفحه انتهایی از دو جنس فولاد و آلومینیوم

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



ب

الف



ج

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

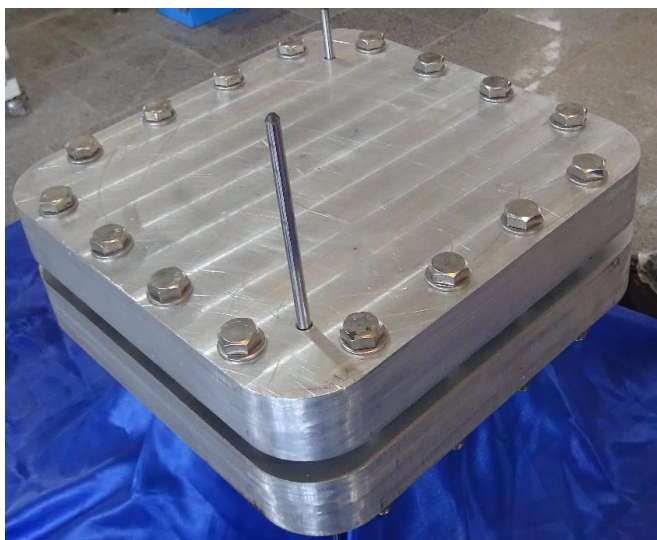
Fig. 14. Distribution of contact pressure on the end plate along the X, Y and XY axis for two different material

توجیه قابل قبولی در استفاده از این صفحات است.

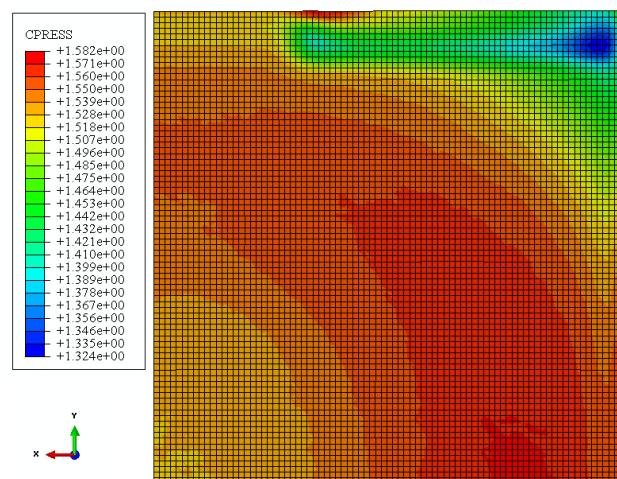
#### ۴-۳- نتایج تست آزمایشگاهی

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

استیل و آلومینیوم به ترتیب برای ضخامت‌های ۳۰ و ۴۳ میلی‌متر به دست آمد. با در نظر گرفتن اهمیت وزن صفحات انتهایی که یکی از پارامترهای مهم پیل سوختی 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

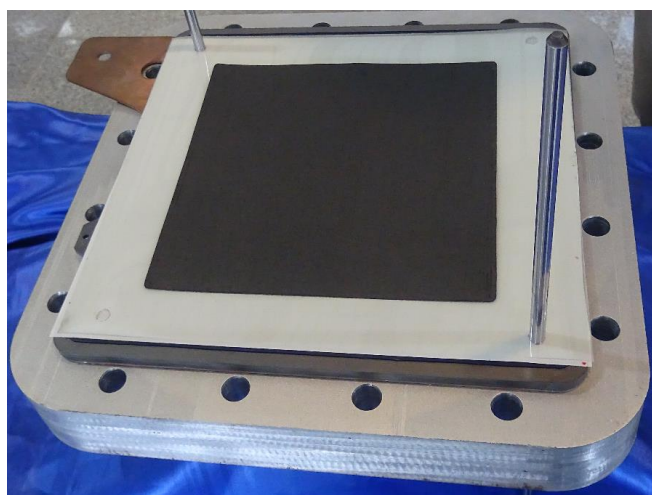


شکل ۱۷: پیل سوختی طراحی شده با صفحه انتهایی آلومینیومی  
**Fig. 17. Assemble cell using a curved Aluminum endplate.**

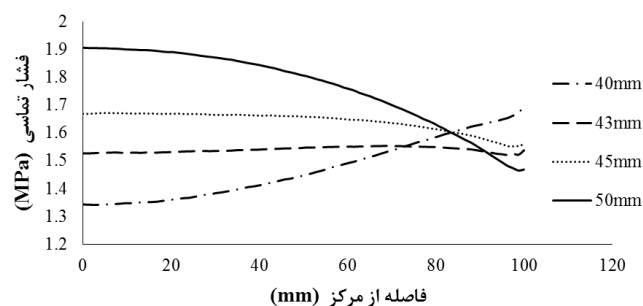


شکل ۱۵: توزیع فشار تماسی روی غشا با صفحه انتهایی منحنی شکل از جنس آلومینیوم

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



شکل ۱۸: محل قرارگیری فیلم فشار برای انجام تست  
**Fig. 18. The location of pressure measurement film in a cell.**



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.**

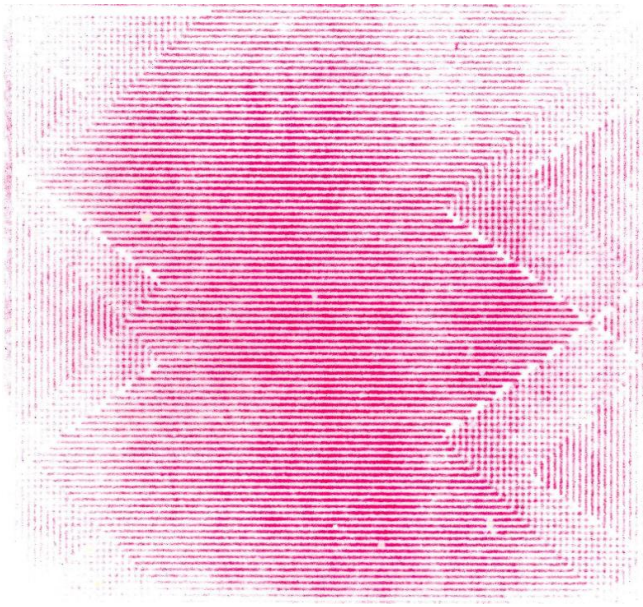
طراحی و ساخته شد. در شکل ۱۷ پیل سوختی مورد نظر نشان داده شده است.

برای بررسی توزیع تنش فشاری روی سطح فعال پیل سوختی 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 نیوتن‌متر است. 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

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 پیل سوختی، توزیع فشار تماسی روی غشا قابل بررسی خواهد بود. توزیع فشار تماسی روی سطح فعال پیل سوختی با صفحات



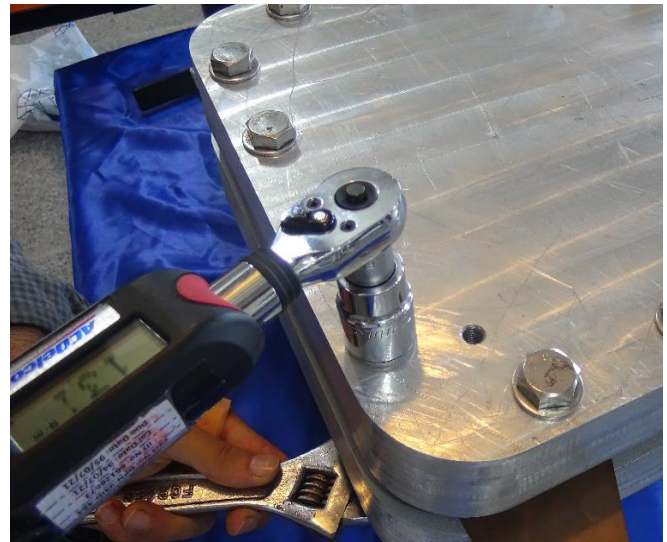


شکل ۲۰: توزیع فشار تماسی روی غشا در صفحه با هندسه طراحی شده  
**Fig. 20. The contact pressure distribution result of the experimental test.**

آلومینیومی با انحنای  $0/17$  میلی‌متر و ضخامت  $43$  میلی‌متر بوده است که مقدار میانگین تنش و انحراف از مقدار میانگین برای این حالت به ترتیب برابر با  $1/55$  و  $0/017$  مگاپاسکال است. در ادامه برای صحت‌گذاری نتایج شبیه‌سازی، پیل سوختی 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.



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 پیل سوختی 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  $51\%$  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

- [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.
- [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.



