



تحلیل خطاهای ابعادی صفحات دوقطبی فلزی در تک سلول پیل سوختی پلیمری

پویا پاشایی¹، محسن شاکری^{2*}، سلمان نوروزی³

1- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل

2- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل

3- دانشیار، مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل

* بابل، صندوق پستی 4714871167، shakeri@nit.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 17 خرداد 1396

پذیرش: 28 تیر 1396

ارائه در سایت: 10 شهریور 1396

کلید واژگان:

کارایی پیل سوختی پلیمری

صفحات دوقطبی فلزی

خطاهای ابعادی

مدل اجزا محدود

روش مونت کارلو

چکیده

توسعه فناوری پیل های سوختی پلیمری جهت تولید برق و حرارت در سال های اخیر مورد توجه قرار گرفته است. در میان اجزای اصلی پیل های سوختی پلیمری، صفحات دوقطبی تأثیر قابل توجهی بر هزینه و کارایی سامانه دارند. صفحات دوقطبی فلزی شکل دهی شده با ورق های نازک، به دلیل مزایایی همچون هزینه، استحکام مکانیکی و چگالی توان مناسب به عنوان جایگزین صفحات مرسوم گرافیتی گسترش یافته اند. انعطاف پذیری این قطعات و برگشت فزنی حین شکل دهی، خطاهای ابعادی را اجتناب ناپذیر می نماید و منجر به توزیع نامناسب فشار تماسی صفحات دوقطبی با لایه نفوذ گاز و افت کارایی پیل سوختی می گردد. افزایش بیش از حد دقت تولید صفحات دوقطبی موجب افزایش هزینه و کاهش قابلیت گسترش عمومی فناوری می شود. بنابراین، به منظور کاهش هزینه های غیر ضروری، مدیریت طراحی و ساخت، بهبود کارایی و تدوین دانش فنی، تحلیل خطاهای ابعادی صفحات دوقطبی فلزی توسط روش اجزا محدود و شبیه سازی مونت کارلو انجام می گردد. ابتدا مدل تماس صفحه دوقطبی و لایه نفوذ گاز توسعه می یابد و ارتفاع کانال ها و دندان های صفحه دوقطبی به صورت پارامتری با تغییرات تصادفی و توزیع نرمال خطای ابعادی مطرح می گردد. سپس، توزیع فشار روی لایه نفوذ گاز (P_{std} و P_{ave}) به ازای خطاهای ابعادی مختلف توسط شبیه سازی مونت کارلو به دست می آید. با افزایش مقدار تolerانس ابعادی از ± 0.015 mm تا ± 0.075 mm، میانگین فشار تماسی (P_{ave}) 11% افت و انحراف معیار فشار تماسی (P_{std}) تا بیش از 90% افزایش یافته است. یعنی توزیع مطلوب فشار لایه نفوذ گاز با افزایش خطای ابعادی کاهش می یابد و باید تolerانس های ابعادی مناسب برای صفحات دوقطبی فلزی را مطابق نیازهای مهندسی تعیین نمود.

Analysis of dimensional errors for metallic bipolar plates in single PEM fuel cell

Pouya Pashaie, Mohsen Shakeri*, Salman Nourouzi

Department of Mechanical Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran

* P.O.B. 4714871167, Babol, Iran, shakeri@nit.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper

Received 07 June 2017

Accepted 19 July 2017

Available Online 01 September 2017

Keywords:

PEM fuel cell performance

metallic bipolar plates

dimensional errors

finite element model

Monte Carlo simulation

ABSTRACT

In recent years, development of polymer electrolyte membrane fuel cells (PEMFCs) has been considered to generate electricity and heat. Among the main components of PEMFCs, bipolar plates (BPPs) have significant influence on cost and performance of the system. Metallic BPPs, formed using thin sheets, have been developed as an alternative to conventional graphite plates because of advantages such as suitable cost, mechanical strength and power density. Flexibility of the sheets and spring back during forming process make dimensional errors inevitable and lead to inappropriate contact pressure distribution between BPPs and gas diffusion layer (GDL), resulting in decrease of fuel cell performance. Excessive accuracy in BPP production results in an increase in the final cost and a decrease in the general usability of the technology. Therefore, to reduce unnecessary costs, managing design process and improving efficiency, analysis of BPP dimensional errors is done using finite element method and Monte Carlo simulation (MCS). First, contact model of the metallic BPP and GDL is developed and heights of each channel and each rib of BPP are fully parameterized due to stochastic variations of dimensional errors with normal distribution. Then, contact pressure distributions of GDL (P_{ave} , P_{std}) for different dimensional errors are obtained by MCSs. Increasing dimensional tolerance from ± 0.015 mm to ± 0.075 mm, average contact pressure (P_{ave}) has decreased by 11% and standard deviation of contact pressure (P_{std}) has increased up to 90%. Namely desirable distribution of GDL pressure is reduced by increasing the dimensional error and suitable dimensional tolerances for BPPs must be determined according to engineering requirements.

1- مقدمه

کاهش آلایندگی ناشی از مصرف گسترده ی حامل های انرژی هیدروکربنی می باشد. البته گسترش استفاده از هیدروژن به عنوان یک حامل انرژی، نیازمند توسعه ی زیرساخت های لازم جهت تبدیل انرژی نهفته در عنصر هیدروژن به انرژی های قابل استفاده برای مصارف بشر خواهد بود.

استفاده از منابع تجدیدپذیر انرژی در جهت کاهش مصرف سوخت های فسیلی بسیار حائز اهمیت است. هیدروژن به عنوان فراوان ترین عنصر موجود در جهان، از جمله گزینه های مناسب برای جایگزینی سوخت های فسیلی و

Please cite this article using:

P. Pashaie, M. Shakeri, S. Nourouzi, Analysis of dimensional errors for metallic bipolar plates in single PEM fuel cell, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 9, pp. 55-64, 2017 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

مورد بررسی قرار دادند [5]. بلالی و همکاران شکل‌دهی صفحات دوقطبی فلزی پیل سوختی با الگوی پینی به کمک فرایند هیدروفرمینگ در قالب‌های محدب را مورد مطالعه قرار دادند [6] و پارامترهای فرایندی و هندسی به منظور شکل‌دهی صفحات دوقطبی فلزی با الگوی پین‌شکل را به صورت تجربی و شبیه‌سازی بررسی نمودند [7]. همچنین، الیاسی و همکاران الگوهای قالب فرایند شکل‌دهی لاستیکی در تولید صفحات دوقطبی فلزی را به صورت تجربی مطالعه کردند [8]. کارگر و همکاران نیز شکل‌پذیری آلایژ AA8111 در میکروکانال‌های شیاری صفحات دوقطبی به وسیله فرایند شکل‌دهی با دمش گاز را بررسی نمودند [9]. البته به علت انعطاف‌پذیری و برگشت فنری صفحات دوقطبی فلزی تولید شده به روش شکل‌دهی ورق‌های نازک، خطاهای ابعادی اجتناب‌ناپذیر می‌باشند. الیاسی و همکاران دقت ابعادی میکرو کانال‌های صفحات دوقطبی فلزی در فرایند شکل‌دهی لاستیکی را مورد مطالعه قرار دادند [10]. مطابق با نتایج این پژوهش، تغییر پارامترهای فرایند شکل‌دهی موجب تغییر دقت ابعادی کانال‌های صفحه دوقطبی فلزی می‌گردد.

ارزیابی دقیق کارایی پیل سوختی پلیمری با استفاده از تنها یک مدل، پیچیده و مشکل است. توزیع مناسب و یکنواخت فشار تماسی روی لایه نفوذ گاز (GDL) و تماس الکتریکی مناسب بین قطعات برای رسیدن به کارایی خوب پیل سوختی پلیمری ضروری است. اگرچه افزایش فشار یکنواخت روی لایه نفوذ گاز منجر به افزایش رسانایی الکتریکی می‌گردد، فشار تماسی زیاد می‌تواند منجر به فشرده شدن بیش از حد لایه نفوذ گاز و اعوجاج مجموعه الکترود غشائی شود که افزایش مقاومت در برابر جریان، نشتی و اتصال داخلی را در پی خواهد داشت [11,12]. بنابراین، واریاسیون توزیع فشار لایه نفوذ گاز در تماس با صفحات دوقطبی پیل سوختی پلیمری به منظور بهبود کارایی آن ضروری می‌باشد. ون و همکاران تأثیر گیره‌بندی بر عملکرد تک‌سلول و توده⁵ 10 تایی پیل سوختی پلیمری را به صورت تجربی مطالعه کردند [13]. همچنین، زو و همکاران تأثیر نیروی گیره‌بندی بر کارایی پیل سوختی پلیمری را با استفاده از مدل‌سازی عددی بررسی نمودند [14]. حبیب‌نیا و همکاران نیز به بررسی تجربی و شبیه‌سازی اجزا محدود اثر پارامترهای طراحی و مونتاژی بر خواص مکانیکی-الکتریکی پیل سوختی پلیمری پرداختند [15].

خطاهای ابعادی صفحات دوقطبی فلزی منجر به توزیع نامناسب فشار تماسی روی لایه نفوذ گاز و در نتیجه افت کارایی پیل سوختی می‌گردند. از یک سو، به منظور بهبود کارایی پیل سوختی پلیمری، خطاهای ابعادی باید کنترل شوند و تا حد امکان کاهش یابند. از سوی دیگر، با توجه به فرایندهای متداول تولید قطعات پیل سوختی پلیمری، محدود نمودن خطای ابعادی صفحات دوقطبی تا مقادیر خیلی کوچک منجر به افزایش هزینه‌ی نهایی ساخت و مونتاژ مجموعه و کاهش قابلیت گسترش این فناوری در سطح عمومی خواهد شد. بنابراین، به منظور جهت‌دهی و هدایت فرایند ساخت و حصول تعادل میان کارایی و هزینه پیل سوختی پلیمری، مطالعه تأثیر خطای ابعادی صفحه دوقطبی بر رفتار تماسی اجزای اصلی مجموعه مورد نیاز است. اگرچه هنوز توجه کافی به این موضوع توسط محققان صورت نگرفته، پیرامون بررسی تأثیر خطاهای ساخت اجزا بر عملکرد پیل سوختی پلیمری تحقیقات محدودی انجام شده است. لاهینوز و همکاران یک مدل برای ملاحظه‌ی ماده و متغیرهای ساخت صفحه دوقطبی ارائه نمودند و تأثیر این

امروزه پیل‌های سوختی پلیمری دما-پایین¹ که از واکنش شیمیایی میان هیدروژن و اکسیژن، الکتریسیته، حرارت و آب تولید می‌کنند در راستای گسترش اقتصاد هیدروژنی² در سطح جهان مورد توجه قرار گرفته‌اند. افزایش قابلیت استفاده از سامانه‌های مبتنی بر پیل‌های سوختی پلیمری دما-پایین در سطح عمومی (مانند سامانه‌های تولید هم‌زمان برق و حرارت موردنیاز برای مصارف خانگی [1]) نیازمند کاهش هزینه‌ی ساخت محصول در کنار حفظ کارایی مناسب مجموعه می‌باشد.

پیل سوختی پلیمری دما-پایین از اجزای گوناگونی تشکیل شده است (شکل 1). صفحات دوقطبی (BPP) و مجموعه‌ی الکترود غشائی (MEA) از جمله اجزای اصلی سامانه می‌باشند که بخش قابل توجهی از هزینه‌ی مجموعه را به خود اختصاص می‌دهند [2] و نقش مؤثری در عملکرد مناسب پیل سوختی دارند.

صفحات دوقطبی وظایف مهمی از جمله انتقال گازهای واکنش‌گر، هدایت حرارت و آب حاصل از واکنش و انتقال الکتریسیته‌ی تولید شده در واکنش را بر عهده دارند. اگرچه معمولاً صفحات دوقطبی از جنس گرافیت و به شیوه ماشین‌کاری ساخته می‌شوند (شکل 2-الف)، اما امروزه صفحات دوقطبی فلزی شکل‌دهی شده (شکل 2-ب) به دلیل مزایایی همچون هزینه‌ی نسبتاً پایین، استحکام مکانیکی بالاتر، رسانش حرارتی مناسب و چگالی توان بالا، به عنوان جایگزین مناسبی برای صفحات دوقطبی مرسوم (گرافیتی) گسترش یافته‌اند. البته خوردگی صفحات دوقطبی فلزی در محیط شیمیایی پیل سوختی از جمله معایبی است که باید مدنظر قرار گیرد.

مطالعات متعددی در زمینه ساخت صفحات دوقطبی فلزی از شکل‌دهی ورق‌های نازک صورت پذیرفته است. محمدتبار و همکاران پارامترهای مؤثر در هیدروفرمینگ صفحات دوقطبی فلزی پیل سوختی با شیار مارپیچ موازی را

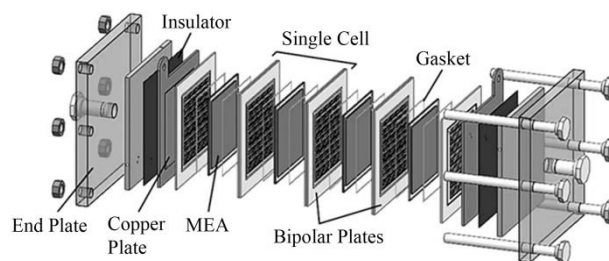


Fig. 1 various components of the low-temperature PEM fuel cell.

شکل 1 اجزای گوناگون تشکیل دهنده پیل سوختی پلیمری دما-پایین.

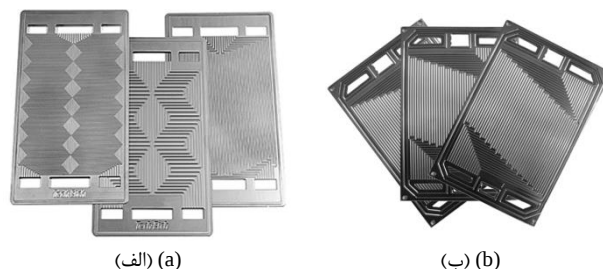


Fig. 2 samples of the (a) graphite bipolar plates (conventional) [3]; (b) metallic bipolar plates [4]; of PEM fuel cell

شکل 2 نمونه‌هایی از صفحات دوقطبی گرافیتی (مرسوم) [3]؛ (ب) صفحات دوقطبی فلزی پیل سوختی پلیمری [4]

¹ low-temperature PEM fuel cells

² hydrogen economy

³ Bipolar Plates

⁴ Membrane Electrode Assembly

⁵ Gas Diffusion Layer

⁶ stack

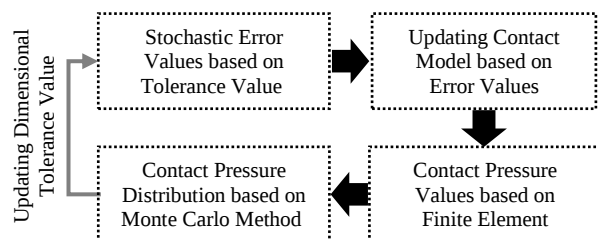


Fig. 3 methodology for analysis of the BPP ribs dimensional tolerance effect on the GDL contact pressure distribution

شکل 3 روش تحلیل تأثیر تolerانس ابعادی دندانه‌های صفحه‌ی دوقطبی بر توزیع فشار لایه نفوذ گاز

ابعادی کانال‌ها و دندانه‌های صفحه‌ی دوقطبی بر توزیع فشار لایه نفوذ گاز را نشان می‌دهد.

ابتدا محدوده‌ی مطالعه خطاهای ابعادی صفحه دوقطبی براساس بررسی آزمایشگاهی نمونه‌های صفحه دوقطبی و تجربه مولفان تعیین می‌گردد. جهت بررسی کیفیت صفحات دوقطبی فلزی تولید شده به روش شکل‌دهی ورق، نمونه‌های صفحه‌ی دوقطبی فلزی از جنس فولاد زنگ نزن 316-L به روش مهرزنی سرد³ ساخته شده (شکل 4-الف) و مدل سه‌بعدی آن توسط اسکن نوری⁴ به دست آمده است (شکل 4-ب). همان‌طور که در شکل ملاحظه می‌شود، ارتفاع دندانه‌های صفحه دوقطبی نسبت به ابعاد نامی قطعه دارای خطای ابعادی می‌باشد. برای مثال، دندانه نشان داده شده در "شکل 4-ب" دارای خطای ابعادی به مقدار 0.025 mm نسبت به ارتفاع نامی خود است که می‌تواند ناشی از عدم پرشدن کامل حفره قالب و برگشت فنی حین شکل‌دهی قطعه باشد.

تحلیل تolerانس‌های ابعادی کانال‌ها و دندانه‌های صفحه دوقطبی یک فرایند تصادفی و آمار احتمالاتی است و به همین منظور از روش تحلیل مونت کارلو استفاده می‌گردد. ابتدا مقادیر تصادفی با توزیع نرمال در محدوده‌ی تolerانس مورد مطالعه (مطابق تئوری 3σ) به اندازه‌ی نامی ارتفاع دندانه‌های صفحه‌ی دوقطبی اعمال می‌گردد و سپس با استفاده از مدل اجزا محدود پارامتری، وضعیت تماس صفحه‌ی دوقطبی (دارای خطای ابعادی) با لایه نفوذ گاز شبیه‌سازی می‌گردد. با توجه به مقدار و توزیع فشار تماسی در سطح لایه نفوذ گاز، پراکندگی توزیع فشار تماسی مربوط به تolerانس مورد مطالعه براساس مدل اجزا محدود محاسبه و در بانک اطلاعات ذخیره می‌شود. درنهایت می‌توان براساس مقادیر محاسبه شده و به‌صورت آماری در مورد

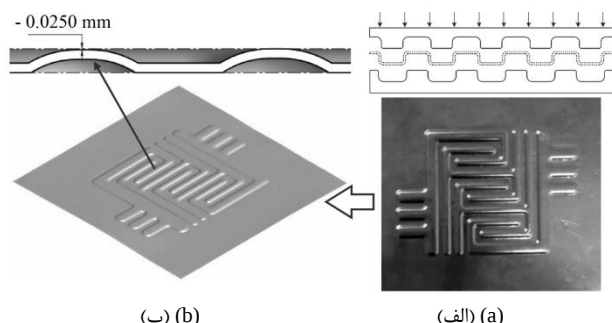


Fig. 4 (a) sample of the formed metallic bipolar plate; (b) optic scanning of the BPP sample and evaluating the dimensional errors.

شکل 4 (الف) نمونه صفحه دوقطبی فلزی شکل‌دهی شده؛ (ب) اسکن نوری قطعه و بررسی خطای ابعادی آن.

متغیرها روی توزیع فشار مجموعه الکترود غشائی را تحلیل کردند [16]. در این مطالعه از تحلیل اجزا محدود آماری بر روی یک مدل ساده شده از توده پیل سوختی استفاده شده و ضخامت صفحه دوقطبی، مدول الاستیک و بار ناشی از بستن پیچ‌های صفحه انتهایی به عنوان پارامترهای دارای تغییرات تصادفی در نظر گرفته شده است. در نهایت یکنواختی تنش نرمال مجموعه الکترود غشائی برحسب متغیرهای احتمالاتی ورودی تعیین شد. هنگ و همکاران، یک مدل اجزا محدود برای پیل سوختی پلیمری توسعه دادند و تأثیر توزیع بارهای متفاوت روی مقاومت تماسی بین صفحه دوقطبی کربنی و لایه نفوذ گاز را مطالعه کردند [17]. لیو و همکاران نیز، تأثیر تغییرات پارامترهای مونتاژ روی توزیع فشار لایه نفوذ گاز در پیل سوختی پلیمری را مورد بررسی قرار دادند و یک حل پایدار¹ از پارامترهای مونتاژ برای توده پیل سوختی پلیمری به‌دست آوردند [18]. هم‌چنین، شیمپالی و همکاران تأثیر ابعاد دندانه‌ها و کانال‌های جریان صفحه دوقطبی بر کارایی پیل سوختی پلیمری را به‌صورت عددی مورد مطالعه قرار دادند [19]. پیرامون بررسی تأثیر خطاهای ساخت اجزا (به خصوص صفحه دوقطبی به‌عنوان یک جز اصلی) بر عملکرد پیل سوختی پلیمری نیز تحقیقات محدودی صورت گرفته است. لیو و همکاران یک روش تحقیق براساس مدل اجزا محدود و شبیه‌سازی مونت کارلو² برای بررسی تأثیر خطای ابعادی صفحه دوقطبی بر توزیع فشار لایه نفوذ گاز در پیل سوختی پلیمری ارائه نمودند [20]. شیمپالی و همکاران نیز، تأثیر تolerانس‌های کانال صفحه دوقطبی بر عملکرد پیل سوختی پلیمری را به‌صورت تجربی مورد ارزیابی قرار دادند [21]. هم‌چنین، کیو و همکاران به بررسی تجربی تأثیر خطای شکل صفحات دوقطبی فلزی نازک بر توزیع فشار تماسی لایه نفوذ گاز در پیل سوختی پلیمری پرداختند [22].

اگرچه مطالعات انجام شده به بررسی موردی برخی جوانب موضوع پرداخته‌اند، اما ارائه‌ی روشی جامع برای تحلیل تolerانس صفحات دوقطبی پیل سوختی پلیمری به منظور هدایت سازندگان این محصول در راستای توسعه فناوری حائز اهمیت می‌باشد. هدف اصلی مطالعه حاضر، توسعه روش تحقیق و فرایند شبیه‌سازی اجزا محدود برای تحلیل تolerانس‌های ابعادی صفحات دوقطبی فلزی پیل سوختی پلیمری می‌باشد. در همین راستا، به‌منظور کاهش هزینه‌های غیرضروری، مدیریت فرایند طراحی و ساخت صفحات دوقطبی فلزی، بهبود کارایی و تدوین دانش فنی تولید محصول، تحلیل تolerانس‌های ابعادی صفحات دوقطبی فلزی با استفاده از روش اجزا محدود و شبیه‌سازی مونت کارلو انجام می‌گردد. ابتدا مدل تماس صفحه‌ی دوقطبی فلزی و لایه نفوذ گاز توسعه می‌یابد و ارتفاع کانال‌ها و دندانه‌های صفحه‌ی دوقطبی به‌صورت پارامتری با تغییرات تصادفی و توزیع نرمال به واسطه‌ی خطای ابعادی مطرح می‌گردد. سپس، توزیع فشار روی لایه نفوذ گاز به ازای خطاهای ابعادی مختلف توسط شبیه‌سازی مونت کارلو به‌دست می‌آید. در نهایت، تolerانس ابعادی مناسب برای صفحات دوقطبی فلزی بررسی می‌گردد.

2- روش تحقیق

هدف اصلی تحقیق حاضر، توسعه یک روش برای تحلیل تأثیر خطاهای ابعادی صفحات دوقطبی پیل سوختی پلیمری بر عملکرد پیل سوختی می‌باشد. یکنواختی توزیع و مقدار فشار تماسی بین صفحه دوقطبی و لایه نفوذ گاز به عنوان معیار ارزیابی کیفیت عملکرد پیل سوختی در نظر گرفته شده است. "شکل 3" روش تحقیق حاضر به‌منظور تحلیل تأثیر تolerانس

³ cold stamping

⁴ optic Scan

¹ robust solution

² Monte Carlo simulation

مطلوب یا نامطلوب بودن تلرانس مورد بررسی، اظهار نظر نمود.

3- مدل پارامتری اجزا محدود

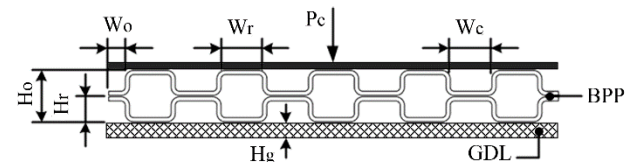
مدل سازی عددی تماس صفحه دوقطبی و لایه نفوذ گاز به روش اجزا محدود و با استفاده از نرم افزار اباکوس¹ انجام می گردد. "شکل 5" ابعاد نامی مدل مورد مطالعه را نشان می دهد. در این مدل، یک مقطع دوبعدی از مدل سه بعدی صفحه دوقطبی نمونه، در تماس با لایه نفوذ گاز در یک سمت مجموعه الکترود غشائی در نظر گرفته شده است.

حین ایجاد مدل اجزا محدود، ارتفاع کانال ها و دندانهای صفحه دوقطبی فلزی کاملاً پارامتری لحاظ می شوند. در ابتدا ابعاد دندانهای صفحه دوقطبی با توجه به مقادیر تصادفی خطا در محدوده تلرانس ابعادی مورد بررسی، به روزرسانی و مدل CAD² صفحه دوقطبی در وضعیت صحیح روی لایه نفوذ گاز مونتاژ می گردد. سپس، خواص مواد به قطعات اعمال می شود. خواص مواد به کار رفته برای شبیه سازی اجزا محدود در جدول 1 مشاهده می گردد.

هم چنین برای به دست آوردن یک جواب دقیق، المان بندی³ حائز اهمیت است. به منظور حصول یک رفتار فیزیکی واقع گرایانه، می بایست نوع مناسب المان برای هر قطعه و سطوح تماس آن ها انتخاب گردد. در نهایت، بارگذاری و شرایط مرزی و نحوه تماس سطوح مشترک قطعات به طور مناسب تعریف و مدل عددی اجزا محدود حل می شود. مقادیر میانگین و انحراف معیار فشار تماسی صفحه دوقطبی و لایه نفوذ گاز به عنوان خروجی تحلیل محاسبه و ذخیره می گردد و فرایند حل با ایجاد مقادیر تصادفی جدید در محدوده تلرانس ابعادی ادامه می یابد. با بررسی توزیع مقادیر میانگین و انحراف معیار فشار تماسی مربوط به خطاهای ابعادی گوناگون، می توان در مورد میزان مطلوبیت تلرانس ابعادی مورد مطالعه اظهار نظر نمود.

4- معیار ارزیابی عملکرد پیل سوختی پلیمری

توزیع مناسب و یکنواخت فشار تماسی روی لایه نفوذ گاز و تماس الکتریکی مناسب بین قطعات برای رسیدن به کارایی خوب پیل سوختی پلیمری



edge width (Wo) :	0.3 mm	rib height (Hr) :	0.5 mm
rib width (Wr) :	1 mm	GDL thickness (Hg) :	0.2 mm
channel width (Wc) :	1 mm	clamping pressure (Pc) :	0.5 MPa
overall height (Ho) :	1 mm	BPP thickness :	0.2 mm

Fig. 5 nominal dimensions of the BPP/GDL contact model

شکل 5 ابعاد نامی مدل تماس صفحه دوقطبی و لایه نفوذ گاز

جدول 1 خواص مواد به کار رفته در شبیه سازی اجزا محدود

Table 1 properties of materials used in finite element simulation.

چگالی (gcm ⁻³)	نسبت پواسون	مدول کشسانی (MPa)	جنس	قطعه
7.8	0.3	1.97×10 ⁵	فولاد زنگ نزن 316L	صفحه فلزی
0.44	0.1	6.1	مدل تجاری Toray TGP-H-060	لایه نفوذ گاز

¹ ABAQUS

² Computer Aided Design

³ meshing

ضروری است. اگرچه افزایش فشار یکنواخت روی لایه نفوذ گاز منجر به افزایش رسانایی الکتریکی می گردد، فشار تماسی زیاد می تواند منجر به فشرده شدن بیش از حد لایه نفوذ گاز و اعوجاج مجموعه الکترود غشائی شود که افزایش مقاومت در برابر جریان، نشتی و اتصال داخلی را در پی خواهد داشت. در تحقیق حاضر، مقدار میانگین و انحراف معیار فشار تماسی صفحه دوقطبی و لایه نفوذ گاز به عنوان معیار ارزیابی عملکرد پیل سوختی پلیمری در نظر گرفته شده است و به ترتیب با استفاده از روابط (1) و (2) محاسبه می گردد.

$$P_{ave} = \frac{\sum_{i=1}^n P_i}{n} \quad (1)$$

$$P_{std} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - P_{ave})^2}{n}} \quad (2)$$

که P_{ave} مقدار میانگین فشار تماسی، P_{std} مقدار انحراف معیار فشار تماسی، P_i مقدار فشار در هر گرهی تماسی مدل اجزا محدود صفحه دوقطبی و لایه نفوذ گاز و n تعداد گره های تماسی است. به منظور جلوگیری از فشردگی بیش از حد لایه نفوذ گاز و مشکلات ناشی از آن، حداکثر مقدار فشار تماسی روی لایه نفوذ گاز برابر با 2.5 MPa در نظر گرفته می شود.

در مجموع، افزایش مقدار میانگین فشار تماسی (P_{ave}) نشان دهنده تماس بهتر صفحه دوقطبی و لایه نفوذ گاز می باشد. البته با توجه به توضیحات ارائه شده، مقدار فشار تماسی موضعی نباید از 2.5 MPa بیشتر شود. هم چنین، کاهش انحراف معیار فشار تماسی (P_{std}) نشان دهنده توزیع مناسب تر فشار تماسی روی سطح لایه نفوذ گاز خواهد بود. در وضعیت ایده آل ($P_{std}=0$)، تمامی دندانهای صفحه دوقطبی با فشار یکسان روی سطح لایه نفوذ گاز تماس خواهند داشت. در تحقیق حاضر، حالت مطلوب توزیع فشار تماسی روی سطح لایه نفوذ گاز معادل با حداکثر میانگین فشار (در محدوده مجاز) و حداقل انحراف معیار فشار می باشد.

5- مطالعه آزمایشگاهی

به منظور بررسی صحت نتایج حاصل از شبیه سازی، مجموعه تست آزمایشگاهی مطابق "شکل 6" طراحی و ساخته شده است.

نمونه های کوچک صفحه دوقطبی فلزی با سطح فعال 50×50 mm² از جنس فولاد زنگ نزن جنس فولاد زنگ نزن 316-L به ضخامت 0.2 mm شکل دهی (شکل 6)، و به منظور تعیین مقادیر خطای ابعادی موجود روی

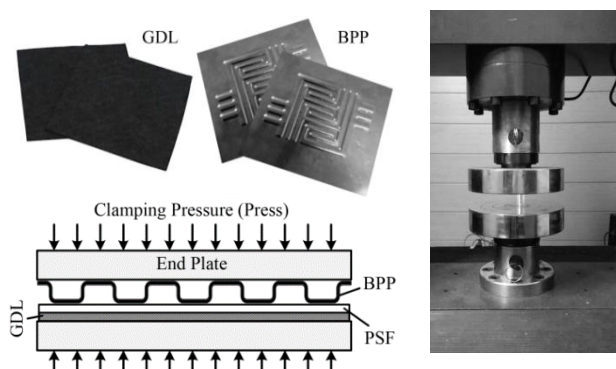


Fig. 6 experimental setup for GDL contact pressure evaluation in contact with the sample metallic bipolar plate using Fuji pressure sensitive film

شکل 6 مجموعه آزمایشگاهی برای ارزیابی فشار تماسی لایه نفوذ گاز در تماس با صفحه دوقطبی فلزی نمونه با استفاده از فیلم فشار شرکت فوجی

یکنواختی فشار گیره‌بندی حین آزمایش تجربی، وجود مقداری اختلاف بین نتایج عددی و تجربی مورد انتظار می‌باشد.

6- شبیه‌سازی مونت کارلو

در این مطالعه، تفاوت بین ارتفاع نامی دندانه‌های صفحه دوقطبی (H_p^n) و ارتفاع حقیقی دندانه‌ها (H_p^t) به عنوان خطای ابعادی (δh) تعریف می‌شود.

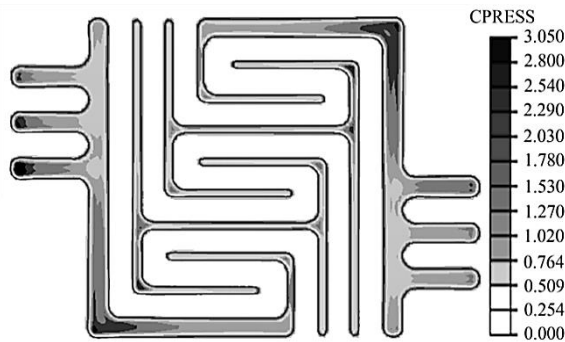


Fig. 8 Result of finite element simulation for GDL contact pressure evaluation in contact with the sample metallic bipolar plate

شکل 8 نتیجه شبیه‌سازی اجزا محدود برای ارزیابی فشار تماسی لایه نفوذ گاز در تماس با صفحه دوقطبی فلزی نمونه

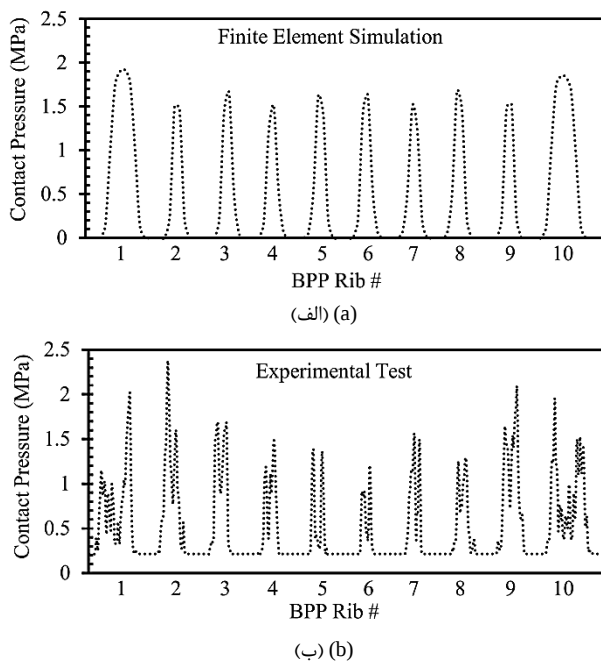


Fig. 9 Contact pressure distribution on GDL surface in middle section of contact with the simple metallic bipolar plate, (a) finite element simulation; (b) experimental test

شکل 9 توزیع فشار تماسی روی سطح لایه نفوذ گاز در مقطع میانی تماس با صفحه دوقطبی فلزی مورد مطالعه، (الف) شبیه‌سازی اجزا محدود؛ (ب) آزمایش تجربی

جدول 2 مقایسه نتایج شبیه‌سازی تماس صفحه دوقطبی و لایه نفوذ گاز با نتایج آزمایشگاهی در مقطع میانی صفحه دوقطبی (نمونه)

Table 2 Comparison of BPP/GDL contact simulation results with experimental results in middle section of bipolar plate (sample)

مقطع میانی صفحه دوقطبی	میانگین فشار (MPa)	انحراف معیار فشار (MPa)
شبیه‌سازی اجزا محدود	0.8921	0.6765
آزمایش تجربی	0.8068	0.5754

نمونه‌های مورد مطالعه، قطعات شکل‌دهی شده با استفاده از اسکن نوری بررسی شده‌اند (شکل 4). جهت شبیه‌سازی شرایط واقعی، مدل CAD قطعات نمونه حاصل از اسکن نوری مستقیماً مورد استفاده قرار گرفته‌اند. در ادامه توزیع مقادیر فشار روی سطح لایه نفوذ گاز در شرایط واقعی قطعه و با همان پارامترهای مدل شبیه‌سازی شده، به صورت تجربی به دست آمده است (شکل 6).

برای ثبت مقادیر فشار تماسی، از فیلم حساس به فشار (PSF)¹ شرکت فوجی فیلم² استفاده شده است. محدوده‌ی حساسیت فیلم فشار مورد استفاده، 0.5 MPa الی 2.5 MPa می‌باشد و بسته به مقدار فشار وارد شده به هر نقطه از فیلم حساس به فشار، شدت رنگ مشخصی روی آن ایجاد می‌گردد که قضاوت در مورد وضعیت توزیع فشار روی سطح لایه نفوذ گاز را به صورت کیفی امکان‌پذیر می‌سازد. به منظور کمی کردن توزیع فشار به دست آمده از فیلم حساس و ایجاد امکان مقایسه و اعتبارسنجی نتایج شبیه‌سازی اجزا محدود، کد کالیبراسیون فیلم فشار مورد استفاده با استفاده از نرم‌افزار متلب³ و براساس مقادیر کیفی شدت رنگ ارائه شده توسط شرکت فوجی فیلم نوشته شده است. با استفاده از کد کالیبراسیون نوشته شده برای فیلم فشار، می‌توان مقادیر فشار در هر نقطه از فیلم را به صورت دقیق و کمی محاسبه و ارائه نمود. "شکل 7" خروجی تحلیل فیلم فشار حاصل از تست آزمایش تجربی و "شکل 8" نتایج حاصل از شبیه‌سازی اجزا محدود تماس مدل CAD قطعه نمونه با لایه نفوذ گاز را نشان می‌دهد.

به منظور مقایسه کمی نتایج آزمایشگاهی و اجزا محدود، توزیع فشار تماسی روی سطح لایه نفوذ گاز در مقطع میانی تماس با صفحه دوقطبی فلزی مورد مطالعه، حاصل از شبیه‌سازی اجزا محدود و تست آزمایشگاهی به ترتیب در "شکل 9-الف" و "شکل 9-ب" نشان داده شده‌است.

هم‌چنین با در نظر گرفتن مقطع میانی سطح تماس لایه نفوذ گاز با صفحه دوقطبی، مقادیر میانگین (P_{ave}) و انحراف معیار (P_{std}) فشار بر مبنای نتایج شبیه‌سازی اجزا محدود و آزمایش تجربی محاسبه و مقایسه شده است که در جدول 2 مشاهده می‌گردد. البته با توجه به ساده‌سازی هندسه، وضعیت مونتاژ و خواص قطعات موردنظر در شبیه‌سازی اجزا محدود تماس صفحه دوقطبی و لایه نفوذ گاز و امکان بروز خطای اندازه‌گیری در مقدار و

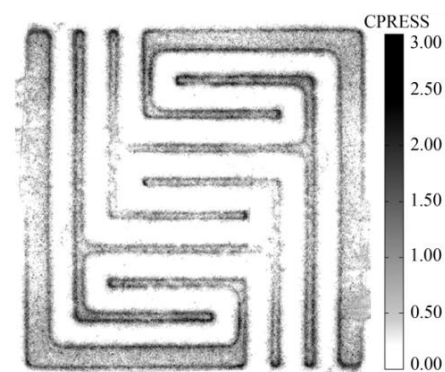


Fig. 7 Experimental result for GDL contact pressure evaluation in contact with the sample metallic bipolar plate (Fuji pressure sensitive film)

شکل 7 نتیجه آزمایشگاهی برای ارزیابی فشار تماسی لایه نفوذ گاز در تماس با صفحه دوقطبی فلزی نمونه (فیلم فشار شرکت فوجی)

¹ pressure sensitive film

² Fuji film

³ MATLAB

صفحه دوقطبی محاسبه شد.

به عنوان نمونه، برخی نتایج شبیه سازی برای تolerانس $\pm 0.075 \text{ mm}$ در جدول 3 ارائه شده است. در ارزیابی عملکرد پیل سوختی، مقادیر فشار تماسی (CPRESS) عمودی مورد استفاده قرار گرفته اند.

مشاهده می گردد که با اعمال خطای ابعادی روی دندانه های صفحه دوقطبی، توزیع فشار تماسی روی سطح لایه نفوذ گاز نسبت به حالت نامی کاملاً غیریکنواخت خواهد شد. منظور از غیریکنواختی فشار تماسی روی سطح لایه نفوذ گاز، افزایش مقادیر انحراف معیار فشار (P_{std}) نسبت به حالت نامی مدل (بدون وجود خطای ابعادی روی دندانه های صفحه دوقطبی) می باشد. در حالت ایده آل (آزمایش شماره 1) ارتفاع همه ی دندانه های صفحه دوقطبی برابر با 0.5 mm می باشد و در این حالت مقدار انحراف معیار فشار تماسی زیر سطح دندانه ها (P_{std}) برابر با 0.024 MPa محاسبه شده است. همچنین، میانگین فشار تماسی (P_{ave}) در حالت نامی برابر با 1.179 MPa به دست آمده است. در سایر آزمایشات ارائه شده در جدول 3، خطای ابعادی در محدوده ی تolerانس مورد بررسی ($\pm 0.075 \text{ mm}$) روی دندانه های صفحه دوقطبی اعمال شده و ترکیبات گوناگون خطا روی دندانه ها شکل گرفته است. به عنوان نمونه، در آزمایش شماره 2 دندانه اول دارای خطای منفی (-0.077 mm) و سایر دندانه ها بدون خطا (با ارتفاع نامی 0.5 mm) می باشند. در این حالت P_{ave} برابر با 1.169 MPa محاسبه شده است که نسبت به حالت نامی (1.179 MPa) حدود 0.8% افت را نشان می دهد. همچنین مقدار P_{std} برابر با 0.588 MPa به دست آمده که نسبت به حالت نامی (0.024 MPa)

جدول 3 نمونه نتایج شبیه سازی تماس صفحه دوقطبی و لایه نفوذ گاز به ازای تolerانس $\pm 0.075 \text{ mm}$

Table 3 sample results of the BPP/GDL contact simulation (dimensional tolerance: $\pm 0.075 \text{ mm}$)

ردیف	ارتفاع کانال های صفحه دوقطبی (mm)	توزیع فشار تماسی (MPa)				
		دندانه 1	دندانه 2	دندانه 3	دندانه 4	دندانه 5
1	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500
2	0.423	0.500	0.500	0.500	0.500	0.588
3	0.577	0.500	0.500	0.500	0.500	1.344
4	0.500	0.423	0.500	0.500	0.500	0.587
5	0.500	0.577	0.500	0.500	0.500	1.524
6	0.500	0.500	0.423	0.500	0.500	0.585
7	0.500	0.500	0.577	0.500	0.500	1.587
8	0.500	0.500	0.500	0.423	0.500	0.587
9	0.500	0.500	0.500	0.577	0.500	1.451
10	0.500	0.500	0.500	0.500	0.423	0.583
11	0.500	0.500	0.500	0.500	0.577	1.340
12	0.478	0.478	0.478	0.478	0.522	1.449
13	0.522	0.478	0.478	0.478	0.478	1.541
14	0.478	0.522	0.478	0.478	0.478	1.525
15	0.522	0.522	0.522	0.478	1.152	0.943
16	0.478	0.478	0.522	0.478	0.793	1.588
17	0.522	0.478	0.522	0.478	1.152	0.941
18	0.478	0.522	0.522	0.478	1.159	0.940
19	0.522	0.522	0.522	0.478	1.153	0.946
20	0.478	0.478	0.478	0.522	0.762	1.525
21	0.522	0.478	0.478	0.522	1.152	0.943
22	0.478	0.522	0.522	0.478	1.152	0.946
23	0.522	0.522	0.478	0.522	1.160	0.944
24	0.478	0.478	0.522	0.522	1.153	0.946
25	0.522	0.478	0.522	0.522	1.159	0.940
26	0.478	0.522	0.522	0.522	1.159	0.940
27	0.522	0.522	0.522	0.522	0.024	1.179

مقدار خطای ابعادی برای هر یک از دندانه های صفحه دوقطبی به طور مستقل و در محدوده ی تolerانس ابعادی مورد مطالعه اعمال می گردد تا امکان بررسی ترکیبات گوناگون خطا فراهم شود. همان طور که در "شکل 10" و معادله (3) مشاهده می شود، طبق تئوری خطا¹ و تئوری نمونه بزرگ²، خطای ابعادی (δh) از توزیع نرمال تبعیت می کند.

$$\delta h \in N(\mu, \sigma) \quad (3)$$

که μ مقدار میانگین خطا، و σ مقدار انحراف معیار خطای ابعادی را نشان می دهد. با احتساب حد وسط صفر برای خطای ابعادی ($\mu=0$) و تغییر مقدار انحراف معیار خطا (σ)، مقادیر تolerانس ابعادی به صورت $\pm 3\sigma$ تعیین می گردد. با توجه به این که خطای ابعادی یک متغیر تصادفی با توزیع نرمال است، بررسی تأثیر آن روی توزیع فشار لایه نفوذ گاز یک مسئله آمار احتمالاتی³ می باشد. شبیه سازی مونت کارلو (MCS)⁴ از جمله روش های سنتی و شناخته شده برای انجام یک تحلیل احتمالاتی است [23].

بنابراین، به منظور مطالعه نحوه تأثیر مقدار تolerانس ابعادی بر توزیع فشار لایه نفوذ گاز، یک فرایند شبیه سازی عددی براساس روش مونت کارلو توسعه می یابد. در ابتدا، خطاهای ابعادی ارتفاع هر کانال و هر دندانه به صورت تصادفی مطابق رابطه (3) تعریف می شود. برای ایجاد مقادیر تصادفی خطای دندانه ها از تکنیک LHS⁵ استفاده می گردد و تعداد حلقه های شبیه سازی برابر 1000 می باشد. یک رشته خطای ابعادی با انحراف معیار $5 \mu\text{m}$ ، $10 \mu\text{m}$ ، $15 \mu\text{m}$ ، $20 \mu\text{m}$ و $25 \mu\text{m}$ با شبیه سازی مونت کارلو مدل می شوند و مقادیر فشار تماسی به ازای خطای اعمال شده با استفاده از مدل پارامتری اجزا محدود محاسبه می گردد.

7- نتایج و بحث

به منظور بررسی تأثیر مقدار تolerانس ابعادی بر عملکرد پیل سوختی پلیمری، براساس بررسی تجربی نمونه های صفحه دوقطبی و تجربه مولفان، یک رشته خطای ابعادی با انحراف معیار $5 \mu\text{m}$ ، $10 \mu\text{m}$ ، $15 \mu\text{m}$ ، $20 \mu\text{m}$ و $25 \mu\text{m}$ (معادل تolerانس های ابعادی $\pm 0.015 \text{ mm}$ ، $\pm 0.030 \text{ mm}$ ، $\pm 0.045 \text{ mm}$ ، $\pm 0.060 \text{ mm}$ و $\pm 0.075 \text{ mm}$) براساس روش مونت کارلو و با استفاده از مدل پارامتری اجزا محدود شبیه سازی و مقادیر میانگین (P_{ave}) و انحراف معیار فشار تماسی (P_{std}) به ازای ترکیبات خطای اعمال شده روی دندانه های

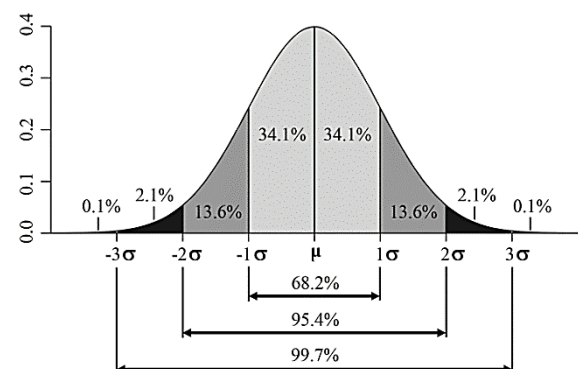


Fig. 10 normal distribution of error for dimensional tolerance analysis
شکل 10 توزیع نرمال خطا به منظور تحلیل تolerانس ابعادی

- 1 error theory
- 2 large sample theory
- 3 probabilistic statistic problem
- 4 Monte Carlo Simulation
- 5 Latin Hypercube Sampling

عملکرد بهتر پیل سوختی پلیمری را در پی خواهد داشت. بنابراین کنترل مقدار مناسب تolerانس ابعادی تأثیر بسیار مؤثری بر کیفیت عملکرد پیل سوختی پلیمری خواهد داشت.

چند حالت از نتایج شبیه‌سازی برای تolerانس ± 0.075 mm در "شکل 13" ارائه شده است. ملاحظه می‌گردد که اعمال خطای ابعادی روی دندانه‌های صفحه دوقطبی منجر به افزایش موضعی فشار روی سطح لایه نفوذ گاز (زیر سطح دندانه) شده، به‌طوری‌که مقدار فشار تماسی موضعی از حدود 1.2 MPa در "شکل 13-الف"، به حدود 2 MPa در "شکل 13-ب" افزایش یافته است. اهمیت این موضوع زمانی افزایش می‌یابد که مقدار فشار تماسی موضعی از حداکثر مقدار مجاز فشار روی سطح لایه نفوذ گاز (2.5 MPa) بیشتر گردد. افزایش موضعی خطای ابعادی روی برخی دندانه‌ها، موجب تمرکز تنش در محل تماس با لایه نفوذ گاز می‌گردد و کاملاً نامطلوب است. همان‌طور که در "شکل 13-ج" ملاحظه می‌شود، مقدار فشار تماسی موضعی زیر سطح دندانه (با بیشترین مقدار خطا) تا حدود 4 MPa افزایش یافته‌است که خرابی کامل لایه نفوذ گاز در آن ناحیه را در پی خواهد داشت. همچنین عدم تماس موضعی برخی کانال‌ها و لایه نفوذ گاز موجب نشستی داخلی (بین کانال‌ها) و افزایش قابل توجه مقاومت الکتریکی تماسی خواهد شد که در نهایت منجر به افت کارایی پیل سوختی پلیمری می‌گردد. در مجموع می‌توان دریافت که کنترل تolerانس‌های ابعادی حین ساخت صفحات دوقطبی فلزی، به منظور حفظ کارایی پیل سوختی پلیمری از اهمیت قابل ملاحظه‌ای برخوردار می‌باشد.

8- جمع بندی

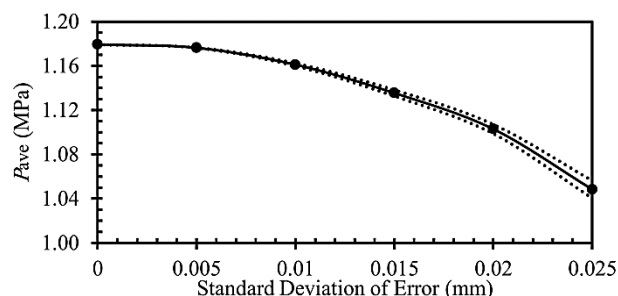


Fig. 11 average of BPP/GDL contact pressure for different values of dimensional tolerances

شکل 11 میانگین فشار تماسی صفحه دوقطبی و لایه نفوذ گاز به ازای مقادیر گوناگون تolerانس ابعادی

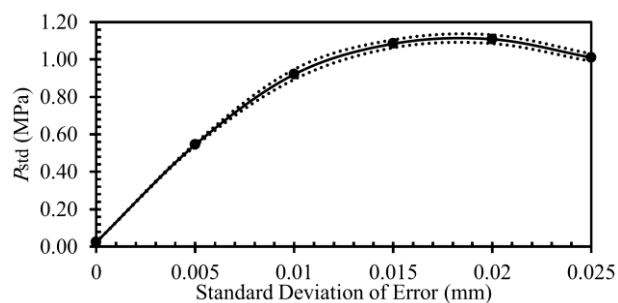


Fig. 12 standard deviation of BPP/GDL contact pressure for different values of dimensional tolerances

شکل 12 انحراف معیار فشار تماسی صفحه دوقطبی و لایه نفوذ گاز به ازای مقادیر گوناگون تolerانس ابعادی

حدود 95.9% افزایش یافته‌است. یادآوری می‌گردد که مقادیر بیشتر برای P_{ave} و مقادیر کمتر برای P_{std} به عنوان وضعیت مطلوب توزیع فشار تماسی روی سطح لایه نفوذ گاز مدنظر می‌باشد. در آزمایش شماره 3، دندانه اول دارای خطای مثبت ($+0.077$ mm) و سایر دندانه‌ها بدون خطا می‌باشند. مشاهده می‌گردد که مقدار P_{ave} برابر با 0.673 MPa و مقدار P_{std} برابر با 1.344 MPa به دست آمده که به ترتیب نسبت به حالت نامی حدود 42.9% کاهش و 98.2% افزایش یافته‌است. می‌توان دریافت که حتی با اعمال مقدار خطای یکسان (ولی با علامت متفاوت) روی دندانه‌ی یکسان از صفحه دوقطبی نتایج متفاوتی حاصل خواهد شد به‌طوری‌که در مثال مذکور، افزایش ارتفاع دندانه نسبت به حالت نامی تأثیر شدیدتری در افت کیفیت تماس صفحه دوقطبی و لایه نفوذ گاز از خود نشان داده است. در آزمایشات شماره 4، 6، 8 و 10 به ترتیب دندانه دوم، سوم، چهارم و پنجم صفحه دوقطبی دارای خطای mm -0.077 و سایر دندانه‌ها بدون خطا می‌باشند. مشاهده می‌گردد که P_{std} و P_{ave} در تمامی موارد مذکور دارای مقادیر نزدیک با آزمایش شماره 2 می‌باشند. همچنین، در آزمایشات شماره 5، 7، 9 و 11 به ترتیب دندانه دوم، سوم، چهارم و پنجم صفحه دوقطبی دارای خطای mm $+0.077$ و سایر دندانه‌ها بدون خطا می‌باشند. در این حالات نیز مقادیر P_{std} و P_{ave} نزدیک به آزمایش شماره 3 محاسبه شده‌اند. یعنی ترکیب یکسان خطای ابعادی در موقعیت‌های متفاوت دندانه‌های صفحه دوقطبی تأثیرات مشابهی روی وضعیت تماس BPP و GDL از خود نشان می‌دهد. جالب توجه است که در آزمایش شماره 27 که تمامی دندانه‌های صفحه دوقطبی دارای خطای یکسان mm $+0.077$ می‌باشند، مقادیر P_{std} و P_{ave} برابر با حالت نامی (آزمایش شماره 1) به دست آمده‌اند. یعنی تغییرات نسبی ارتفاع دندانه‌ها در میزان افت یکنواختی توزیع فشار تماسی مؤثر می‌باشد و تنها مقادیر مطلق خطای هر دندانه تعیین‌کننده نیست. در آزمایشات 12 الی 26 ترکیبات گوناگون خطای ابعادی روی دندانه‌های صفحه دوقطبی شبیه‌سازی شده‌اند. در مجموع تصمیم‌گیری مستقیم پیرامون نحوه تأثیر مقادیر تolerانس ابعادی بر کیفیت تماس صفحه دوقطبی و لایه نفوذ گاز عملاً دشوار خواهد بود، ولی بر مبنای روش‌های تصادفی آماری (مانند روش مونت کارلو) می‌توان در این مورد اظهار نظر نمود. در این راستا، ترکیبات گوناگون خطا برای مقادیر مختلف تolerانس ابعادی mm ± 0.015 الی mm ± 0.075 با استفاده از مدل اجزا محدود پارامتری شبیه‌سازی و مقادیر P_{std} و P_{ave} مشابه جدول 3 محاسبه شده‌اند.

"شکل 11" جمع‌بندی نتایج میانگین فشار تماسی صفحه دوقطبی و لایه نفوذ گاز به ازای مقادیر گوناگون تolerانس ابعادی را نشان می‌دهد. در "شکل 11" مقدار P_{ave} برحسب مقدار انحراف معیار خطا ارائه شده است. مشاهده می‌گردد که با افزایش مقدار تolerانس ابعادی از mm ± 0.015 (انحراف معیار mm 0.005) تا mm ± 0.075 (انحراف معیار mm 0.025)، مقدار میانگین فشار تماسی حدود 11% افت می‌کند.

همچنین انحراف معیار فشار تماسی صفحه دوقطبی و لایه نفوذ گاز به ازای مقادیر گوناگون انحراف معیار خطا در "شکل 12" ارائه شده است. مشاهده می‌گردد که با افزایش مقدار تolerانس ابعادی از mm ± 0.015 (انحراف معیار mm 0.005) تا mm ± 0.075 (انحراف معیار mm 0.025)، مقدار انحراف معیار فشار تماسی حتی تا بیش از 90% افزایش می‌یابد.

لازم به ذکر است که هر چه مقدار میانگین فشار تماسی (در محدوده مجاز 2.5 MPa) بیشتر و مقدار انحراف معیار فشار کمتر باشد، به معنی تماس بهتر صفحه دوقطبی و لایه نفوذ گاز و توزیع یکنواخت‌تر فشار تماسی روی سطح لایه نفوذ گاز خواهد بود که این امر مقاومت الکتریکی تماسی کمتر و

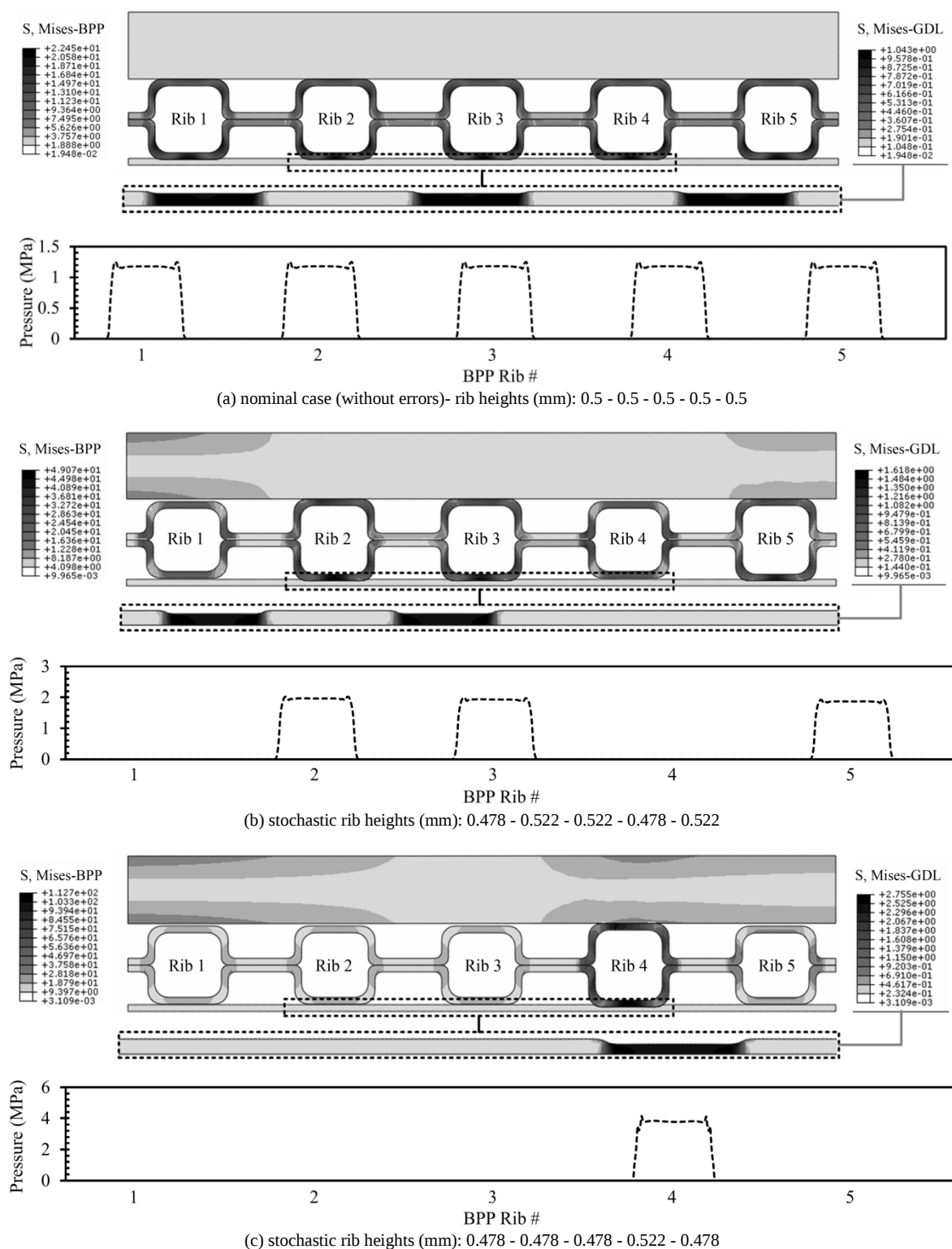


Fig. 13 stress contour in bipolar plate and gas diffusion layer for some study cases (dimensional tolerance: ± 0.075 mm).

شکل 13 توزیع تنش در صفحه دوقطبی و لایه نفوذ گاز در برخی حالات مورد بررسی (تولرانس ± 0.075 mm).

افت کارایی پیل سوختی می‌گردند. بنابراین، در تحقیق حاضر تحلیل تolerانس‌های ابعادی صفحات دوقطبی فلزی پیل سوختی پلیمری به منظور کاهش هزینه‌های غیرضروری، مدیریت فرایند طراحی و ساخت صفحات دوقطبی فلزی، بهبود کارایی و تدوین دانش فنی تولید محصول صورت گرفته‌است. دو معیار جهت ارزیابی توزیع فشار تماسی روی لایه نفوذ گاز

توزیع مناسب و یکنواخت فشار تماسی روی لایه نفوذ گاز یکی از معیارهای مهم در حفظ کارایی پیل سوختی پلیمری می‌باشد و پیش از این توسط سایر محققان به اثبات رسیده است. خطاهای ابعادی حین ساخت صفحات دوقطبی فلزی به روش شکل‌دهی ورق‌های نازک، اجتناب‌ناپذیر می‌باشند و منجر به توزیع نامناسب فشار تماسی بین صفحات دوقطبی و لایه نفوذ گاز و در نتیجه

r	مقدار حقیقی
	زیرنویس ها
ave	مقدار میانگین
i	شماره گره تماسی
n	تعداد کل گره های تماسی
std	مقدار انحراف معیار

10- تقدیر و تشکر

از همکاری صمیمانه جناب آقای مهرداد مختاری کمال قدردانی را داریم.

11- مراجع

- [1] R. E. Harikishan, S. Iain, B. Piotr, G. P. Bruno, P. Sivakumar, Current status of fuel cell based combined heat and power systems for residential sector, *Journal of Power Sources*, Vol. 293, pp. 312-328, 2015.
- [2] S. R. Dhakate, R. B. Mathur, B. K. Kakati, T. L. Dhami, Properties of graphite-composite bipolar plate prepared by compression molding technique for PEM fuel cell, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 32, pp. 4537-4543, 2007.
- [3] S. Shimpalee, V. Lilavivat, J. W. Van Zee, H. McCrabb, A. Lozano-Morales, Understanding the effect of channel tolerances on performance of PEMFCs, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 36, pp. 12512-12523, 2011.
- [4] D. Qiu, P. Yi, L. Peng, X. Lai, Study on shape error effect of metallic bipolar plate on the GDL contact pressure distribution in proton exchange membrane fuel cell, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 38, pp. 6762-6772, 2013.
- [5] N. Mohammadtabar, M. Bakhshi-Jooybari, J. Hosseini-pour, A. Gorji, Study of effective parameters in hydroforming of fuel cell metallic bipolar plates with parallel serpentine flow field, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 8, pp. 17-27, 2014. (in Persian فارسی)
- [6] M. Belali Owsia, J. Hosseini-pour, M. Bakhshi-Jooybari, A. Gorji, Forming of metallic bipolar plate with pin-type pattern by using hydroforming process in convex die, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 10, pp. 150-158, 2014. (in Persian فارسی)
- [7] M. Belali Owsia, J. Hosseini-pour, M. Bakhshi-Jooybari, A. Gorji, The experimental and simulation investigation of process and geometrical parameters for hydroforming of pin-type metallic bipolar plates, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 8, pp. 215-226, 2015. (in Persian فارسی)
- [8] M. Elyasi, F. Ahmadi Khatir, M. Hosseinzadeh, Experimental study of the die patterns in rubber pad forming process for production of metallic bipolar plates, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 9, pp. 179-186, 2015. (in Persian فارسی)
- [9] H. Kargar Pishbijari, J. Hosseini-pour, H. Jamshidi Aval, An investigation into the formability of AA8111 alloy in the grooved micro channels of bipolar plate using gas blow forming process, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 10, pp. 23-31, 2015. (in Persian فارسی)
- [10] M. Elyasi, H. Talebi Ghadikolaee, M. Hosseinzadeh, Investigation of dimensional accuracy of metallic bipolar plate's micro channel in rubber pad forming process, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 12, pp. 461-471, 2015. (in Persian فارسی)
- [11] S. J. Lee, C. D. Hsu, C. H. Huang, Analyses of the fuel cell stack assembly pressure, *Journal of Power Sources*, Vol. 145, pp. 353-361, 2005.
- [12] W. K. Lee, C. H. Ho, J. W. Van Zee, M. Murthy, The effects of compression and gas diffusion layers on the performance of a PEM fuel cell, *Journal of Power Sources*, Vol. 84, pp. 45-51, 1999.
- [13] C. Y. Wen, Y. S. Lin, C. H. Lu, Experimental study of clamping effects on the performances of a single proton exchange membrane fuel cell and a 10-cell stack, *Journal of Power Sources*, Vol. 192, pp. 475-485, 2009.
- [14] P. Zhou, C. W. Wu, G. J. Ma, Influence of clamping force on the performance of PEMFCs, *Journal of Power Sources*, Vol. 163, pp. 874-881, 2007.
- [15] 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 فارسی)
- [16] A. Vlahinos, K. Kelly, J. D'Aleo, J. Stathopoulos, Effect of material and manufacturing variations on membrane electrode assembly pressure distribution, *First International Conference on Fuel Cell Science Engineering and Technology*, Rochester, New York, USA, April 21-23, 2003.
- [17] L. Zhang, Y. Liu, H. Song, S. Wang, Y. Y. Zhou, S. J. Hu, Estimation of contact resistance in proton exchange membrane fuel cells, *Journal of Power Sources*, Vol. 162, pp. 1165-1171, 2006.
- [18] D. Liu, X. Lai, J. Ni, L. Peng, S. Lan, Z. Lin, Robust design of assembly parameters on membrane electrode assembly pressure distribution, *Journal of Power Sources*, Vol. 172, pp. 760-767, 2007.
- [19] S. Shimpalee, J. W. Van Zee, Numerical studies on rib & channel dimension

مطرح گردید. معیار اول میانگین فشار تماسی (P_{ave}) مطابق رابطه (1) و معیار دوم انحراف معیار فشار تماسی (P_{std}) مطابق رابطه (2) می باشد. با توجه به نتایج تحقیق مشاهده شد که تصمیم گیری مستقیم پیرامون نحوه ی تأثیر مقادیر تolerانس ابعادی بر کیفیت تماس صفحه دوقطبی و لایه نفوذ گاز عملاً دشوار خواهد بود ولی بر مبنای روش های تصادفی آماری (مانند روش مونت کارلو) می توان در این مورد اظهار نظر نمود. در این راستا، یک رشته خطای ابعادی با انحراف معیار 0.005 mm الی 0.025 mm (معادل تolerانس های ابعادی 0.015 mm $\pm$ الی 0.075 mm $\pm$) با استفاده از روش مونت کارلو و مدل پارامتری اجزا محدود شبیه سازی و مقادیر میانگین و انحراف معیار فشار تماسی به ازای خطای اعمال شده محاسبه گردید. مشاهده شد که با افزایش خطای ابعادی، مقدار میانگین فشار تماسی کاهش و غیریکنواختی آن به شدت افزایش می یابد. به خصوص وقتی تolerانس ابعادی در یک بازه ی بزرگ تغییر می کند. به عنوان نمونه، با افزایش مقدار تolerانس ابعادی از 0.015 mm تا 0.075 mm $\pm$ مقدار میانگین فشار تماسی (P_{ave}) حدود 11% افت می کند و مقدار انحراف معیار فشار تماسی (P_{std}) حتی تا بیش از 90% افزایش می یابد. این نشان می دهد که توزیع مطلوب فشار لایه نفوذ گاز با افزایش خطای ابعادی کاهش می یابد. اگرچه، بر اساس فرایند تفسیر کل تحلیل، قابل مشاهده است که می توان این دو مقدار را مطابق نیازهای مهندسی تغییر داد و کنترل نمود. در نهایت، روش تحقیق مطرح شده و نتایج حاصل از آن می تواند به دو صورت مورد استفاده قرار گیرد. حالت اول تعیین مقادیر مجاز تolerانس برحسب مورد نیاز در راستای توسعه و ارتقای کیفیت محصول صنعتی و راهنمایی سازندگان محصول پیش از تولید است. حالت دوم ایجاد یک بانک اطلاعات از وضعیت تأثیر تolerانس های موجود در قطعات پیش ساخته (متداول ترین طرح های مرسوم) بر عملکرد پیل سوختی پلیمری (برحسب معیارهای مورد مطالعه) و پیش بینی عملکرد قطعه در مجموعه می باشد. این نتایج می تواند به عنوان معیاری برای پذیرش یا عدم پذیرش قطعات ساخته شده حین فرایند کنترل کیفیت محصول مدنظر باشد. به علاوه، تحقیق حاضر فقط تأثیر خطاهای ابعادی صفحه دوقطبی فلزی را مدنظر قرار داده است. با این وجود، خطاهای هندسی هم ممکن است حین فرایند ساخت صفحات دوقطبی ایجاد شود که تحقیقات آینده مؤلفان روی این زمینه متمرکز خواهد بود.

9- فهرست علائم

BPP	صفحه دوقطبی
GDL	لایه نفوذ گاز
H	ضخامت/ارتفاع (mm)
δh	خطای ابعادی (mm)
MEA	مجموعه ی الکترود غشائی
N	توزیع نرمال
P	فشار (MPa)
PSF	فیلم حساس به فشار
علائم یونانی	
δ	تغییر ابعاد (mm)
μ	میانگین خطا (mm)
σ	انحراف معیار خطا (mm)
n	مقدار نامی

- International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 36, pp. 12512-12523, 2011.
- [22] D. Qiu, P. Yi, L. Peng, X. Lai, Study on shape error effect of metallic bipolar plate on the GDL contact pressure distribution in proton exchange membrane fuel cell, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 38, pp. 6762-6772, 2013.
- [23] E. Atanassov, I. Dimov, What Monte Carlo models can do and cannot do efficiently?, *Applied Mathematical Modelling*, Vol. 32, pp. 1477-1500, 2008.
- of flow-field on PEMFC performance, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 32, pp. 842-856, 2007.
- [20] D. Liu, L. Peng, X. Lai, Effect of dimensional error of metallic bipolar plate on the GDL pressure distribution in the PEM fuel cell, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 34, pp. 990-997, 2009.
- [21] S. Shimpalee, V. Lilavivat, J. W. Van Zee, H. McCrabb, A. Lozano-Morales, Understanding the effect of channel tolerances on performance of PEMFCs,