ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

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

پویا پاشایی[1]، محسن شاکری[2*]، سلمان نوروزی[3]

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

توسعه‌ی فناوری پیل‌های سوختی پلیمری جهت تولید برق و حرارت در سال‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته‌است. در میان اجزای اصلی پیل‌های سوختی پلیمری، صفحات دوقطبی تأثیر قابل توجهی بر هزینه و کارایی سامانه دارند. صفحات دوقطبی فلزی شکل‌دهی شده با ورق‌های نازک، به دلیل مزایایی همچون هزینه، استحکام مکانیکی و چگالی توان مناسب به عنوان جایگزین صفحات مرسوم گرافیتی گسترش یافته‌اند. انعطاف‌پذیری این قطعات و برگشت فنری حین شکل‌دهی، خطاهای ابعادی را اجتناب‌ناپذیر می‌نماید و منجر به توزیع نامناسب فشار تماسی صفحات دوقطبی با لایه نفوذ گاز و افت کارایی پیل سوختی می‌گردد. افزایش بیش از حد دقت تولید صفحات دوقطبی موجب افزایش هزینه و کاهش قابلیت گسترش عمومی فناوری می‌شود. بنابراین، به‌منظور کاهش هزینه‌های غیرضروری، مدیریت طراحی و ساخت، بهبود کارایی و تدوین دانش فنی، تحلیل خطاهای ابعادی صفحات دوقطبی فلزی توسط روش اجزا محدود و شبیه‌سازی مونت‌کارلو انجام می‌گردد. ابتدا مدل تماس صفحه‌ی دوقطبی و لایه نفوذ گاز توسعه می‌یابد و ارتفاع کانال‌ها و دندانه‌های صفحه‌ی دوقطبی به‌صورت پارامتری با تغییرات تصادفی و توزیع نرمال خطای ابعادی مطرح می‌گردد. سپس، توزیع فشار روی لایه نفوذ گاز (P_{ave} و P_{std}) به ازای خطاهای ابعادی مختلف توسط شبیه‌سازی مونت‌کارلو به دست می‌آید. با افزایش مقدار تلرانس 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 یافته‌است. یعنی توزیع مطلوب فشار لایه نفوذ گاز با افزایش خطای ابعادی کاهش می‌یابد و باید تلرانس‌های 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

استفاده از منابع تجدیدپذیر انرژی در جهت کاهش مصرف سوخت‌های فسیلی بسیار حائز اهمیت است. هیدروژن به عنوان فراوان‌ترین عنصر موجود در جهان، از جمله گزینه‌های مناسب برای جایگزینی سوخت‌های فسیلی و کاهش آلایندگی ناشی از مصرف‌گسترده‌ی حامل‌های انرژی هیدروکربنی می‌باشد. البته گسترش استفاده از هیدروژن به عنوان یک حامل انرژی، نیازمند توسعه‌ی زیرساخت‌های لازم جهت تبدیل انرژی نهفته در عنصر هیدروژن به انرژی‌های قابل استفاده برای مصارف بشر خواهد بود.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

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)

امروزه پیل‌های سوختی پلیمری دما-پایین[1] که از واکنش شیمیایی میان هیدروژن و اکسیژن، الکتریسیته، حرارت و آب تولید می‌کنند در راستای گسترش اقتصاد هیدروژنی[2] 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[3]) و مجموعه‌ی الکترود غشائی (MEA[4]) از جمله اجزای اصلی سامانه می باشند 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، به‌عنوان 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 موثر در هیدروفرمینگ صفحات دوقطبی فلزی پیل سوختی با شیار مارپیچ موازی را

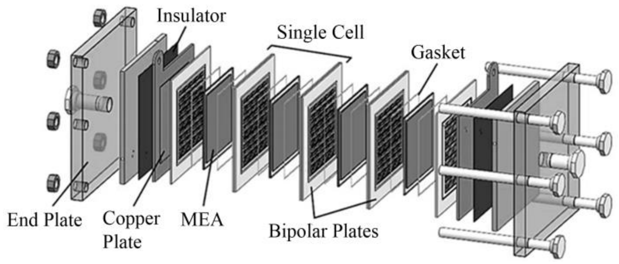
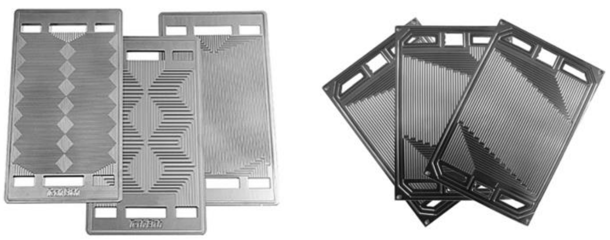


Fig. 1 various components of the low-temperature PEM fuel cell.

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



(الف) (a) (ب) (b)

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

شکل 2 (الف) 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

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 به‌صورت تجربی و شبیه‌سازی بررسی نمودند [7]. هم‌چنین، الیاسی و همکاران الگوهای قالب فرایند شکل‌دهی لاستیکی در تولید صفحات دوقطبی فلزی را به‌صورت تجربی مطالعه کردند [8]. کارگر و همکاران نیز شکل‌پذیری آلیاژ AA8111 در میکروکانال‌های شیاری صفحات دوقطبی به وسیله فرایند شکل‌دهی با دمش گاز را بررسی نمودند [9]. البته به‌علت 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[5]) 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 [12,11]. بنابراین، وارسی 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 توده[6] 10تایی پیل سوختی پلیمری را به‌صورت تجربی مطالعه کردند [13]. هم‌چنین، زو و همکارن 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 مونتاژ 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

[5] Gas Diffusion Layer
[6] stack

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 پایدار[1] 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 مونت‌کارلو[2] 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 تلرانس‌های 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 تلرانس 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 تلرانس‌های 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 تلرانس‌های ابعادی صفحات دوقطبی فلزی با استفاده از روش اجزا محدود و شبیه‌سازی مونت‌کارلو 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 مونت‌کارلو به‌دست می‌آید. در نهایت، تلرانس 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 پلیمری 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 تلرانس

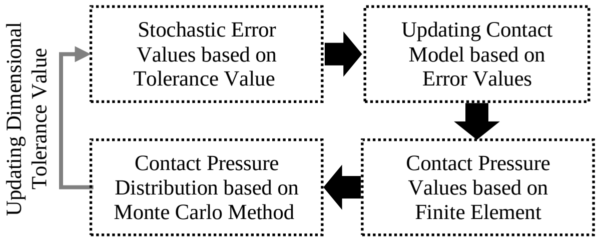


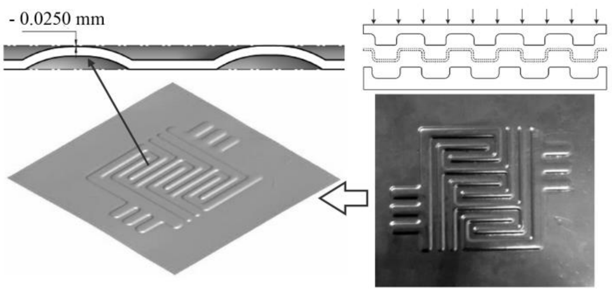
Fig. 3 methodology for analysis of the BPP ribs dimensional tolerance effect on the GDL contact pressure distribution

شکل 3 روش تحلیل تأثیر تلرانس 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 سرد[3] ساخته شده (شکل 4- الف) و مدل سه‌بعدی آن توسط اسکن نوری[4] 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 فنری حین شکل‌دهی قطعه باشد.

تحلیل تلرانس‌های ابعادی کانال‌ها و دندانه‌های صفحه دوقطبی یک فرایند تصادفی و آمار احتمالاتی است و به همین منظور از روش تحلیل مونت‌کارلو استفاده می‌گردد. ابتدا مقادیر تصادفی با توزیع نرمال در محدوده‌ی تلرانس 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 تلرانس مورد مطالعه براساس مدل اجزا محدود محاسبه و در بانک اطلاعات ذخیره می‌شود. درنهایت می‌توان براساس مقادیر محاسبه شده و به‌صورت آماری در مورد



(ب) (b) (الف) (a)

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.

[1] robust solution
[2] Monte Carlo simulation
[3] cold stamping
[4] optic Scan

مطلوب یا نامطلوب بودن تلرانس مورد بررسی، اظهارنظر نمود.

3- مدل پارامتری اجزا محدود

مدل‌سازی عددی تماس صفحه‌ی دوقطبی و لایه نفوذ گاز به روش اجزا محدود و با استفاده از نرم‌افزار اباکوس[1] انجام می‌گردد. "شکل 5" ابعاد نامی مدل مورد مطالعه را نشان می‌دهد. در این مدل، یک مقطع دوبعدی از مدل سه‌بعدی صفحه دوقطبی نمونه، در تماس با لایه‌ی نفوذ گاز در یک سمت مجموعه‌ی الکترود غشائی در نظر گرفته شده است.

حین ایجاد مدل اجزا محدود، ارتفاع کانال‌ها و دندانه‌های صفحه دوقطبی فلزی کاملاً پارامتری لحاظ می‌شوند. در ابتدا ابعاد دندانه‌های صفحه دوقطبی با توجه به مقادیر تصادفی خطا در محدوده‌ی تلرانس ابعادی مورد بررسی، به‌روزرسانی و مدل CAD[2] صفحه دوقطبی در وضعیت صحیح روی لایه نفوذ گاز مونتاژ می‌گردد. سپس، خواص مواد به قطعات اعمال می‌شود. خواص مواد به کار رفته برای شبیه‌سازی اجزا محدود در جدول 1 مشاهده می‌گردد.

هم‌چنین برای به‌دست آوردن یک جواب دقیق، المان‌بندی[3] حائز اهمیت است. به‌منظور حصول یک رفتار فیزیکی واقع‌گرایانه، می‌بایست نوع مناسب المان برای هر قطعه و سطوح تماس آن‌ها انتخاب گردد. درنهایت، بارگذاری و شرایط مرزی و نحوه تماس سطوح مشترک قطعات به‌طور مناسب تعریف و مدل عددی اجزا محدود حل می‌شود. مقادیر میانگین و انحراف معیار فشار تماسی صفحه دوقطبی و لایه نفوذ گاز به عنوان خروجی تحلیل محاسبه و ذخیره می‌گردد و فرایند حل با ایجاد مقادیر تصادفی جدید در محدوده تلرانس ابعادی ادامه می‌یابد. با بررسی توزیع مقادیر میانگین و انحراف معیار فشار تماسی مربوط به خطاهای ابعادی گوناگون، می‌توان 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 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. در تحقیق حاضر، مقدار میانگین و انحراف معیار فشار تماسی صفحه‌ی 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 می‌گردد.

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

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

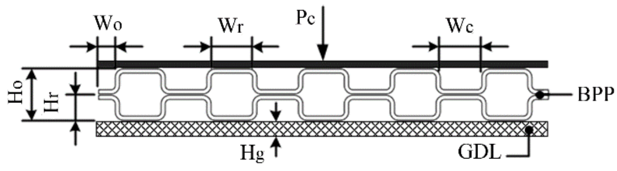
که P_{ave} مقدار میانگین فشار تماسی، P_{std} مقدار انحراف معیار فشار تماسی، P_i مقدار فشار در هر گره‌ی تماسی مدل اجزا محدود صفحه‌ی دوقطبی و لایه نفوذ گاز و n تعداد گره‌های تماسی است. به منظور جلوگیری از فشردگی بیش از حد لایه نفوذ گاز و مشکلات ناشی از آن، حداکثر مقدار فشار تماسی روی لایه نفوذ گاز برابر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

در مجموع، افزایش مقدار میانگین فشار تماسی (P_{ave}) نشان دهنده تماس بهتر صفحه دوقطبی و لایه نفوذ گاز می‌باشد. البته با توجه به توضیحات ارائه شده، مقدار فشار تماسی موضعی نباید از 2.5 MPa بیشتر شود. هم‌چنین، کاهش انحراف معیار فشار تماسی (P_{std}) نشان دهنده توزیع مناسب‌تر فشار تماسی روی سطح لایه نفوذ گاز خواهد بود. در وضعیت ایده‌آل (P_{std}=0)، تمامی دندانه‌های 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 می‌باشد.

5- مطالعه آزمایشگاهی

به‌منظور بررسی صحت نتایج حاصل از شبیه‌سازی، مجموعه تست آزمایشگاهی مطابق "شکل 6" طراحی و ساخته شده است.

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



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 شبیه‌سازی اجزا محدود

Table 1 properties of materials used in finite element simulation.

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

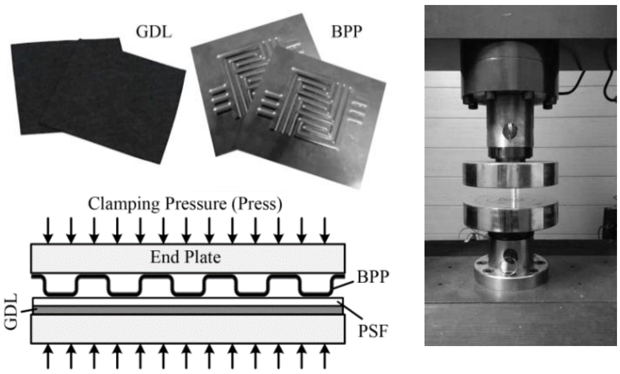


Fig. 6 experimental setup for GDL contact pressure evaluation in contact with the sample metallic bipolar plate using Fuji pressure sensitive film

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

---
[1] ABAQUS
[2] Computer Aided Design
[3] meshing

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، به‌صورت تجربی به‌دست آمده است (شکل 6).

برای ثبت مقادیر فشار تماسی، از فیلم حساس به فشار (PSF[1]) شرکت فوجی فیلم[2] 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 به‌صورت 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 متلب[3] و براساس مقادیر کیفی شدت رنگ ارائه شده توسط شرکت فوجی‌فیلم نوشته شده است. با استفاده از کد کالیبراسیون نوشته شده برای فیلم فشار، می‌توان مقادیر فشار در هر نقطه از فیلم را به‌صورت 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 ($P_{\rm ave}$) و انحراف معیار ($P_{\rm std}$) فشار برمبنای 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

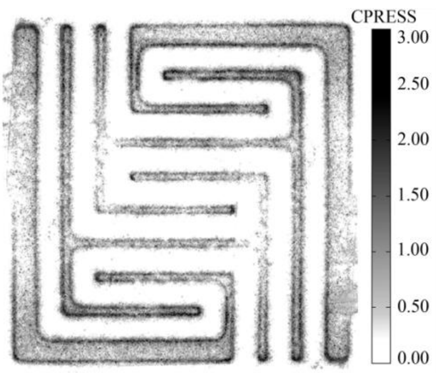


Fig. 7 Experimental result for GDL contact pressure evaluation in contact with the sample metallic bipolar plate (Fuji pressure sensitive film)

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

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

6- شبیه‌سازی مونت‌کارلو

در این مطالعه، تفاوت بین ارتفاع نامی دندانه‌های صفحه دوقطبی ($H_r^{\rm n}$) و ارتفاع حقیقی دندانه‌ها ($H_r^{\rm r}$) به عنوان خطای ابعادی (δh) تعریف می‌شود.

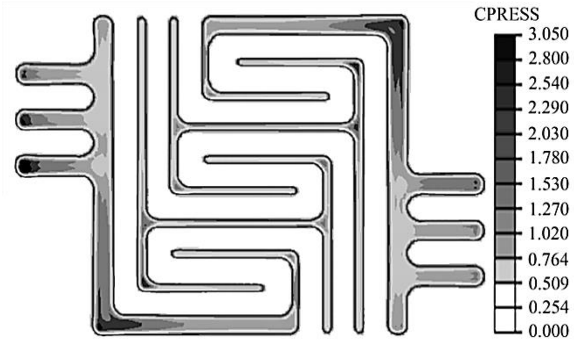
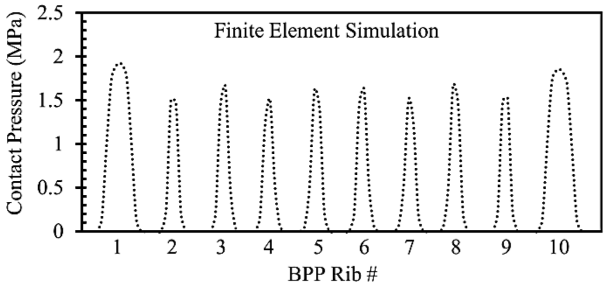
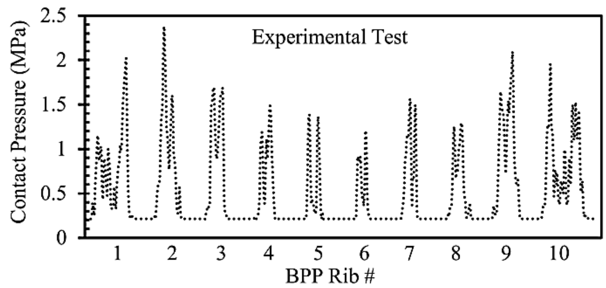


Fig. 8 Result of finite element simulation for GDL contact pressure evaluation in contact with the sample metallic bipolar plate

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



(الف) (a)



(ب) (b)

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

[1] pressure sensitive film
[2] Fuji film
[3] MATLAB

مقدار خطای ابعادی برای هریک از دندانه‌های صفحه دوقطبی به‌طور مستقل و در محدوده‌ی تلرانس ابعادی مورد مطالعه اعمال می‌گردد تا امکان بررسی ترکیبات گوناگون خطا فراهم شود. همان‌طور که در "شکل 10" و معادله (3) مشاهده می‌شود، طبق تئوری خطا[1] و تئوری نمونه بزرگ[2]، خطای ابعادی (δh) از توزیع نرمال تبعیت می‌کند.

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

که μ مقدار میانگین خطا، و σ مقدار انحراف معیار خطای ابعادی را نشان می‌دهد. با احتساب حد وسط صفر برای خطای ابعادی (μ=0) و تغییر مقدار انحراف معیار خطا (σ)، مقادیر تلرانس ابعادی به‌صورت $\pm3\sigma$ تعیین می‌گردد.

با توجه به این‌که خطای ابعادی یک متغیر تصادفی با توزیع نرمال است، بررسی تأثیر آن روی توزیع فشار لایه نفوذ گاز یک مسئله آمار احتمالاتی[3] می‌باشد. شبیه‌سازی مونت‌کارلو (MCS[4]) از جمله روش‌های سنتی و شناخته شده برای انجام یک تحلیل احتمالاتی است [23].

بنابراین، به منظورمطالعه نحوه تأثیر مقدار تلرانس ابعادی بر توزیع فشار لایه نفوذ گاز، یک فرایند شبیه‌سازی عددی براساس روش مونت‌کارلو توسعه می‌یابد. در ابتدا، خطاهای ابعادی ارتفاع هر کانال و هر دندانه به‌صورت تصادفی مطابق رابطه (3) تعریف می‌شود. برای ایجاد مقادیر تصادفی خطای دندانه‌ها از تکنیک LHS[5] استفاده می‌گردد و تعداد حلقه‌های شبیه‌سازی برابر 1000 می‌باشد. یک رشته خطای ابعادی با انحراف معیار 5 µm، 10 µm، 15 µm، 20 µm و 25 µm با شبیه‌سازی مونت‌کارلو مدل می‌شوند و مقادیر فشار تماسی به ازای خطای اعمال شده با استفاده از مدل پارامتری اجزا محدود محاسبه می‌گردد.

7- نتایج و بحث

به منظور بررسی تأثیر مقدار تلرانس ابعادی بر عملکرد پیل سوختی پلیمری، براساس بررسی تجربی نمونه‌های صفحه دوقطبی و تجربه مولفان، یک رشته خطای ابعادی با انحراف معیار 5 µm، 10 µm، 15 µm، 20 µm و 25 µm (معادل تلرانس‌های ابعادی ±0.015 mm، ±0.030 mm، ±0.045 mm، ±0.060 mm و ±0.075 mm) براساس روش مونت‌کارلو و با استفاده از مدل پارامتری اجزا محدود شبیه‌سازی و مقادیر میانگین (P_{ave}) و انحراف معیار فشار تماسی (P_{std}) به ازای ترکیبات خطای اعمال شده روی دندانه‌های

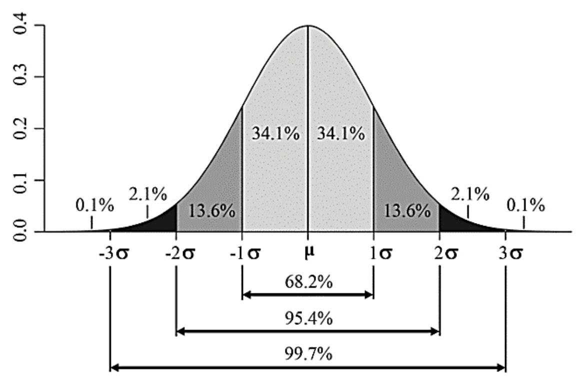


Fig. 10 normal distribution of error for dimensional tolerance analysis

شکل 10 توزیع نرمال خطا به منظور تحلیل تلرانس ابعادی

صفحه دوقطبی محاسبه شد.

به عنوان نمونه، برخی نتایج شبیه‌سازی برای تلرانس ±0.075 mm در جدول 3 ارائه شده است. در ارزیابی عملکرد پیل سوختی، مقادیر فشار تماسی (CPRESS) عمودی مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

مشاهده می‌گردد که با اعمال خطای ابعادی روی دندانه‌های 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 دندانه‌های صفحه دوقطبی) می‌باشد. در حالت ایده‌آل (آزمایش شماره 1) ارتفاع همه‌ی دندانه‌های صفحه دوقطبی برابر با 0.5 mm می‌باشد و در این حالت مقدار انحراف معیار فشار تماسی زیر سطح دندانه‌ها (P_{std}) برابر با 0.024 MPa محاسبه شده‌است. 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 محدوده‌ی تلرانس مورد بررسی (±0.075 mm) روی دندانه‌های صفحه دوقطبی اعمال شده و ترکیبات گوناگون خطا روی دندانه‌ها شکل گرفته است. به عنوان نمونه، در آزمایش شماره 2 دندانه اول دارای خطای منفی (0.077– mm) و سایر دندانه‌ها بدون خطا (با ارتفاع نامی 0.5 mm) می‌باشند. 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 می‌دهد. هم‌چنین مقدار P_{std} برابر با 0.588 MPa به دست آمده که نسبت به حالت نامی (0.024 MPa)

جدول 3 نمونه نتایج شبیه‌سازی تماس صفحه دوقطبی و لایه نفوذ گاز به ازای تلرانس ±0.075 mm

Table 3 sample results of the BPP/GDL contact simulation (dimensional tolerance: ± 0.075 mm)

توزیع فشار تماسی (MPa)		ارتفاع کانال های صفحه دوقطبی (mm)					شماره آزمایش
انحراف معیار فشار	میانگین فشار تماسی	دندانه 5	دندانه 4	دندانه 3	دندانه 2	دندانه 1	
0.024	1.179	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	1
0.588	1.169	0.500	0.500	0.500	0.500	0.423	2
1.344	0.673	0.500	0.500	0.500	0.500	0.577	3
0.587	1.169	0.500	0.500	0.500	0.423	0.500	4
1.524	0.762	0.500	0.500	0.500	0.577	0.500	5
0.585	1.169	0.500	0.500	0.423	0.500	0.500	6
1.587	0.792	0.500	0.500	0.577	0.500	0.500	7
0.587	1.169	0.500	0.423	0.500	0.500	0.500	8
1.451	0.727	0.500	0.577	0.500	0.500	0.500	9
0.583	1.176	0.423	0.500	0.500	0.500	0.500	10
1.340	0.668	0.577	0.500	0.500	0.500	0.500	11
1.449	0.724	0.522	0.478	0.478	0.478	0.478	12
1.541	0.770	0.478	0.478	0.478	0.478	0.522	13
1.525	0.762	0.478	0.478	0.478	0.522	0.478	14
0.943	1.152	0.522	0.478	0.478	0.522	0.522	15
1.588	0.793	0.478	0.478	0.522	0.478	0.478	16
0.941	1.152	0.522	0.478	0.522	0.478	0.522	17
0.940	1.159	0.522	0.478	0.522	0.522	0.478	18
0.946	1.153	0.478	0.478	0.522	0.522	0.522	19
1.525	0.762	0.478	0.522	0.478	0.478	0.478	20
0.943	1.152	0.522	0.522	0.478	0.478	0.522	21
0.946	1.152	0.522	0.522	0.478	0.522	0.478	22
0.944	1.160	0.478	0.522	0.478	0.522	0.522	23
0.946	1.153	0.522	0.522	0.522	0.478	0.478	24
0.940	1.159	0.478	0.522	0.522	0.478	0.522	25
0.940	1.159	0.478	0.522	0.522	0.522	0.478	26
0.024	1.179	0.522	0.522	0.522	0.522	0.522	27

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

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 یافته است. 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_{ave} و P_{std} 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 +0.077 mm و سایر دندانه‌ها بدون خطا می‌باشند. در این حالات نیز مقادیر P_{ave} و P_{std} 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 +0.077 mm می‌باشند، مقادیر P_{ave} و P_{std} 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 نحوه‌ی تأثیر مقادیر تلرانس 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 اظهارنظر نمود. در این راستا، ترکیبات گوناگون خطا برای مقادیر مختلف تلرانس ابعادی mm 0.015± الی 0.075 mm± با استفاده از مدل اجزا محدود پارامتری شبیه‌سازی و مقلادیر P_{ave} و P_{std} مشابه جدول 3 محاسبه شده‌اند.

"شکل 11" جمع‌بندی نتایج میانگین فشار تماسی صفحه دوقطبی و لایه نفوذ گاز به ازای مقادیر گوناگون تلرانس ابعادی را نشان می‌دهد. در "شکل 11" مقدار P_{ave} برحسب مقدار انحراف معیار خطا ارائه شده است. مشاهده می‌گردد که با افزایش مقدار تلرانس ابعادی از 0.015 mm± (انحراف معیار 0.005 mm) تا 0.075 mm± (انحراف معیار 0.025 mm)، 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 تلرانس ابعادی از 0.015 mm± (انحراف معیار 0.005 mm) تا 0.075 mm± (انحراف معیار 0.025 mm)، مقدار انحراف معیار فشار تماسی حتی تا بیش از 90% افزایش می‌یابد.

لازم به ذکر است که هر چه مقدار میانگین فشار تماسی (در محدوده‌ی 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 عملکرد بهتر پیل سوختی پلیمری را در پی خواهد داشت. بنابراین کنترل مقدار مناسب تلرانس ابعادی تأثیر بسیار مؤثری بر کیفیت عملکرد پیل سوختی پلیمری خواهد داشت.

چند حالت از نتایج شبیه‌سازی برای تلرانس 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 نشتی 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 تلرانس‌های ابعادی حین ساخت صفحات دوقطبی فلزی، به منظور حفظ کارایی پیل سوختی پلیمری از اهمیت قابل ملاحظه‌ای برخوارد می‌باشد.

8- جمع‌بندی

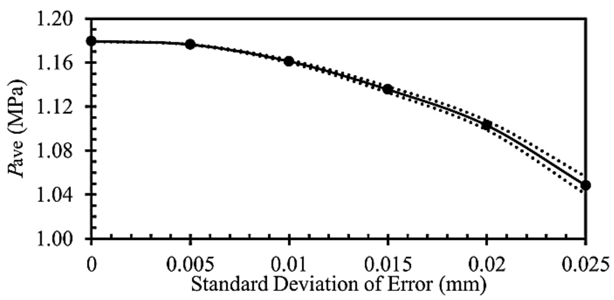


Fig. 11 average of BPP/GDL contact pressure for different values of dimensional tolerances

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

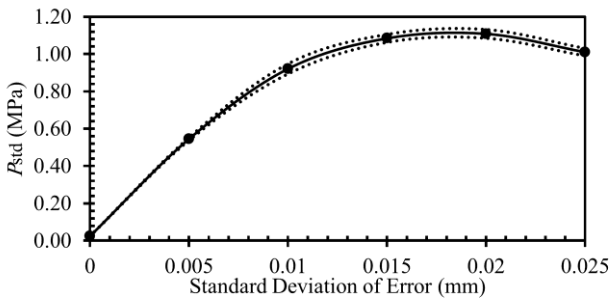
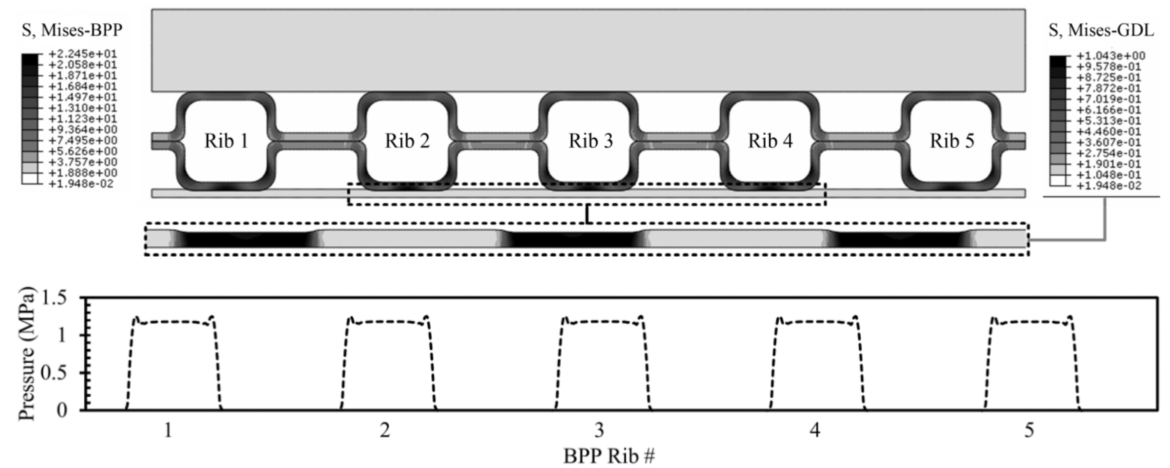
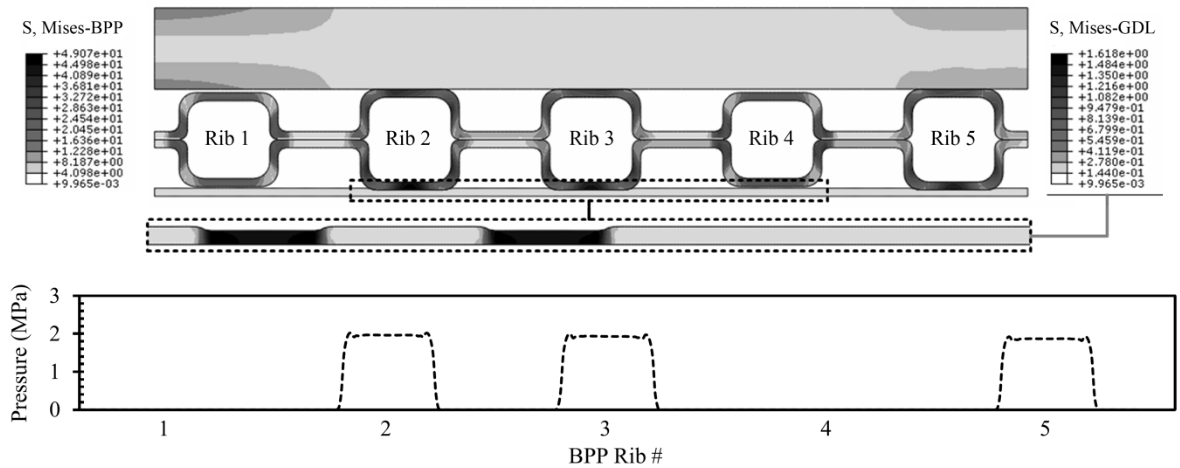


Fig. 12 standard deviation of BPP/GDL contact pressure for different values of dimensional tolerances

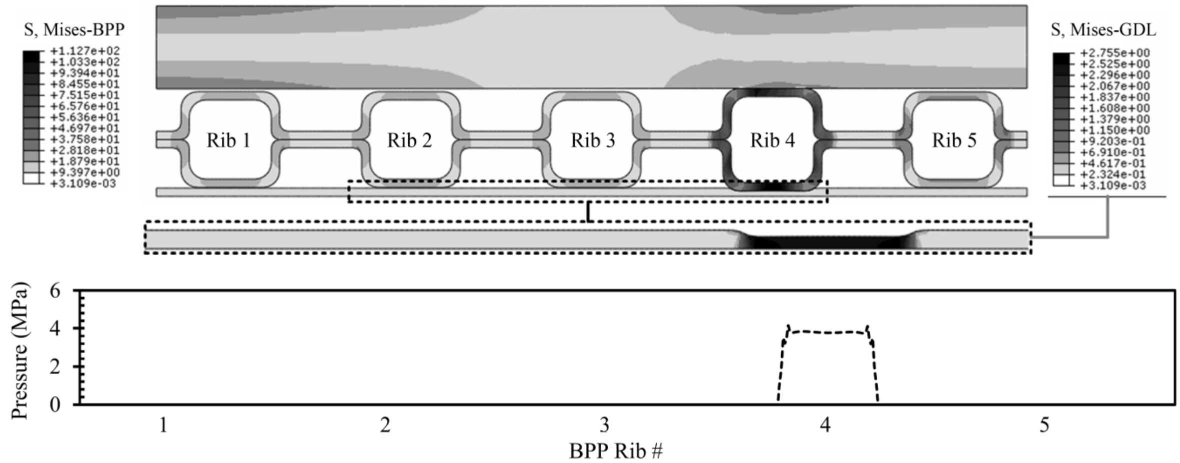
شکل 12 انحراف معیار فشار تماسی صفحه دوقطبی و لایه نفوذ گاز به ازای مقادیر گوناگون تلرانس ابعادی



(a) nominal case (without errors)- rib heights (mm): 0.5 - 0.5 - 0.5 - 0.5 - 0.5



(b) stochastic rib heights (mm): 0.478 - 0.522 - 0.522 - 0.478 - 0.522



(c) stochastic rib heights (mm): 0.478 - 0.478 - 0.478 - 0.522 - 0.478

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 (تلرانس 0.075 mm±).

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 افت کارایی پیل سوختی می‌گردند. بنابراین، در تحقیق حاضر تحلیل تلرانس‌های ابعادی صفحات دوقطبی فلزی پیل سوختی پلیمری به‌منظور 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

مطرح گردید. معیار اول میانگین فشار تماسی (P_{ave}) مطابق رابطه (1) و معیار دوم انحراف معیار فشار تماسی (P_{std}) مطابق رابطه (2) می‌باشد. با توجه به نتایج تحقیق مشاهده شد که تصمیم‌گیری مستقیم پیرامون نحوه‌ی تأثیر مقادیر تلرانس ابعادی بر کیفیت تماس صفحه دوقطبی و لایه نفوذ گاز عملاً دشوار خواهد بود ولی برمبنای روش‌های تصادفی آماری (مانند روش مونت کارلو) می‌توان در این مورد اظهارنظر نمود. در این راستا، یک رشته خطای ابعادی با انحراف معیار 0.005 mm الی 0.025 mm (معادل تلرانس‌های ابعادی ±0.015 mm الی ±0.075 mm) با استفاده از روش مونت‌کارلو و مدل پارامتری اجزا محدود شبیه‌سازی 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 می‌یابد. به خصوص وقتی تلرانس ابعادی در یک بازه‌ی بزرگ تغییر می‌کند. به عنوان نمونه، با افزایش مقدار تلرانس ابعادی از ±0.015 mm تا ±0.075 mm مقدار میانگین فشار تماسی (P_{ave}) حدود 11% افت می‌کند و مقدار انحراف معیار فشار تماسی (P_{std}) حتی تا بیش از 90% افزایش می‌یابد. این نشان می‌دهد که توزیع مطلوب فشار لایه نفوذ گاز با افزایش خطای ابعادی کاهش می‌یابد. اگرچه، براساس فرایند تفسیر کل تحلیل، قابل مشاهده است که می‌توان این دو مقدار را مطابق نیازهای مهندسی تغییر داد و کنترل نمود. درنهایت، روش تحقیق مطرح شده و نتایج حاصل از آن می‌تواند به دو صورت مورد استفاده قرار گیرد. حالت اول تعیین مقادیر مجاز تلرانس برحسب موردنیاز 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 تلرانس‌های موجود در قطعات پیش‌ساخته (متداول‌ترین طرح‌های مرسوم) بر عملکرد پیل سوختی پلیمری (برحسب معیارهای مورد مطالعه) و پیش‌بینی عملکرد قطعه در مجموعه می‌باشد. این نتایج می‌تواند 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 علایم

BPP	صفحه دوقطبی
GDL	لایه نفوذ گاز
H	ضخامت/ارتفاع (mm)
δh	خطای ابعادی (mm)
MEA	مجموعه‌ی الکترود غشائی
N	توزیع نرمال
P	فشار (MPa)
PSF	فیلم حساس به فشار

علایم یونانی

δ	تغییر ابعاد (mm)
μ	میانگین خطا (mm)
σ	انحراف معیار خطا (mm)

بالانویس‌ها

n	مقدار نامی
r	مقدار حقیقی

زیرنویس‌ها

ave	مقدار میانگین
i	شماره گره تماسی
n	تعداد کل گره‌های 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. Hosseinipour, A. Gorji, Study of effective parameters inhydroforming 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. Hosseinipour, 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. Hosseinipour, 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. Hosseinipour, 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

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, *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.