Amirkabir Journal of Mechanical Engineering

Amirkabir J. Mech. Eng., 55(8) (2023) 205-208
DOI: 10.22060/mej.2023.21720.7495

Numerical and Empirical Investigation on Bending Behavior of Composite Bipolar Plates for Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells

L. Emami[1], M. M. Barzegari[2*], M. R. Zamani[1]

[1] Faculty of Martial and Manufacturing Technologies, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran
[2] Northern Research center for science & Technology, Malek Ashtar University of Technology, Fereydunkenar, Iran

ABSTRACT: Polymer electrolyte membrane fuel cells, as an energy generator, convert the chemical energy of the fuel directly into electrical energy. An important component of polymer fuel cells is bipolar plates, which are responsible for the distribution of fuel and oxidants and facilitate the management of water inside the cell and the transmission of electric current. In this study, the fracture method of graphite-based composite bipolar plates of polymer fuel cells under bending loads was investigated experimentally and numerically. Simple and perforated composite bipolar plates were tested and simulated with the approach of determining flexural stability under static load. In numerical analysis, mechanical simulation using the finite element method and Abaqus software were used. Then, after making the laboratory samples, the experimental test of three-point bending was performed on them to validate the simulation results. Finally, the results of numerical and experimental analyses of the flexural behavior of composite bipolar plates were compared with each other. A comparison of the results of numerical and experimental analyses showed that the results of these two methods had an acceptable agreement with each other. In addition, the presence of a high percentage of graphite as well as high fragility weakens the body, and beams of this material increase the specimen of the sample, which occurs only due to the molecular bond of graphite, which causes the graphite to slip.

Review History:

Received: Aug . 24, 2022
Revised: Dec. 29, 2023
Accepted: Oct. 03, 2023
Available Online: Nov. 06, 2023

Keywords:

Polymer fuel cell
Composite bipolar plates
Three-point bending
Finite element simulation
Experimental analysis

1- Introduction

A fuel cell is an electrochemical generator that directly converts the chemical energy of fuel into energy. One of the important components of the electric energy production process in fuel cells is bipolar plates, which are responsible for collecting the output current from the anode and cathode of a fuel cell [1].

Afshari and Jazayeri [2], using numerical and two-phase simulations of polymer fuel cells, investigated different working conditions such as humidity percentage, flow rate, temperature, and pressure of inlet gases on fuel cell performance. Kakati et al. [3] conducted experiments to investigate the properties of graphite composite bipolar plates made by compression molding technology. They tried to find a way to achieve a lighter and more cost-effective bipolar plate and carried out their research based on this purpose. The results of their research showed that the cost of the polymer fuel cell is mainly dependent on the two components of the bipolar plate and the gas diffusion layer. Chen et al. [4] conducted research on the preparation of bipolar plates based on graphite/resin for polymer membrane fuel cells. Based on the results of numerical analysis, taking into account the strengthening of electrical, bending, and hydrophilic properties, three types of bipolar plates were obtained according to the properties of graphite and resin. They prepared plates with natural graphite and developed graphite as filler and epoxy resin and phenolic resin as substrate. In their research, it was found that composite plates containing epoxy resin have higher electrical conductivity.

2- Methodology

The main problem and goal of this research is to numerically and experimentally investigate the fracture behavior of composite bipolar plates of polymer fuel cells under the conditions and effects of tensile and bending loads by numerical and experimental methods. At first, numerical model design and finite element modeling were discussed, then the experimental model was tested, and finally, the results of numerical and experimental analyses were compared.

To predict the mechanical behavior and failure modes of studied sandwich structures, a 3D FEM was developed using commercial finite element software ABAQUS/Explicit, release 16.14.

In this experiment, samples with a rectangular cross-section were used as beams. The samples are placed on two supports with a specified distance. Then, with the help of a

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

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

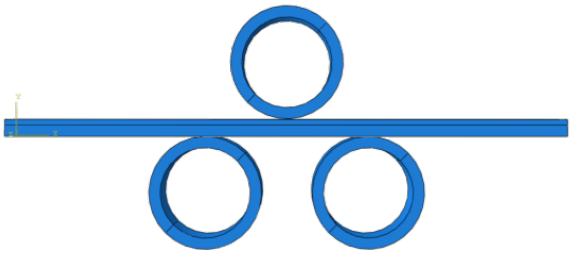


Fig. 1. Bending test simulation

Fig. 2. Bending test apparatus

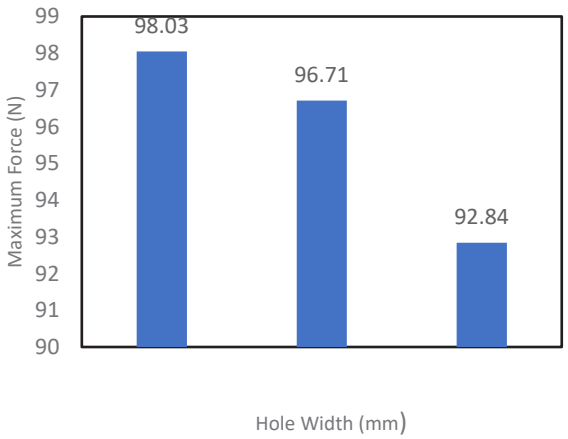


Fig.3. The diagram of the maximum force obtained from the numerical analysis of the hole with a width of 2 mm and different lengths.

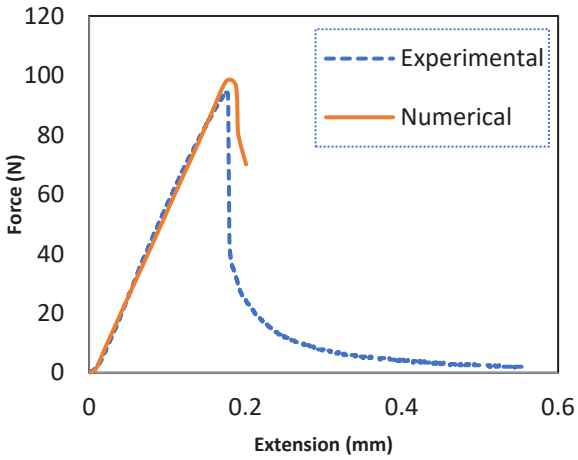


Fig. 4. Numerical and experimental comparison diagram of perforated beam

mandrel from above and in the middle of these two supports, the force was applied to the middle of the beam at a speed of 0.5 mm/min and the deflection of the beam was measured. The flexural strength and flexural modulus can be determined by simultaneously measuring the beam's elasticity and the force acting on it.

3- Results and discussion

Numerical investigations for the rectangular hole in the center of the beam have been carried out according to the test design. The results of numerical studies indicate that as the length of the hole increases, the piece becomes more weakened and the bending strength of the object decreases. Figure 3 shows the maximum force diagram for a beam with a width of 2 mm and lengths of 4, 12, and 20 mm resulting from the numerical analysis.

In this part of the research, the beam with dimensions of 100x3x10 mm was experimentally tested only by creating a hole in the middle of the beam with dimensions of 2x4 mm. The boundary conditions are the same as the previous examples and the speed of the upper jaw is 0.5 mm/min and the distance of the supports is 29 mm according to the D790 standard. Figure 4 shows the comparison of two numerical and experimental graphs of the perforated beam.

4- Conclusion

In this research, the analysis of composite bipolar plates was investigated and for the best possible bending analysis of these plates, they were investigated in the form of composite beams. In the case of holes, it was investigated with the approach of bending stability and determination of fracture strength. The presence of a high percentage of graphite as well as high brittleness causes the body to weaken, and therefore in the numerical and experimental analyses of beams of this type, it leads to an increase in the elasticity of the sample, which occurs only because of the molecular bonding of graphite, which causes graphite to slide.

References

[1] F. Barbir, S. Yazici, Status and development of PEM fuel cell technology, International Journal of Energy Research, 32(5) (2008) 369-378.

[2] E.Afshari, A.Khayam, Numerical investigation of polymer fuel cell performance with honeycomb flow field, Numerical methods in Engineering, 33(2) (2015) 69-86. (in Persian).

[3] S. Dhakate, R. Mathur, B. Kakati, T. Dhami, Properties of graphite-composite bipolar plate prepared by compression molding technique for PEM fuel cell, International Journal of Hydrogen Energy, 32(17) (2007) 4537-4543.

[4] H. Chen, X.-H. Xia, L. Yang, Y.-d. He, H.-b. Liu, Preparation and characterization of graphite/resin composite bipolar plates for polymer electrolyte membrane fuel cells, Science and Engineering of Composite Materials, 23(1) (2016) 21-28.

HOW TO CITE THIS ARTICLE

L. Emami, M. M. Barzegari, M. R. Zamani, Numerical and Empirical Investigation on Bending Behavior of Composite Bipolar Plates for Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells, Amirkabir J. Mech Eng., 55(8) (2023) 205-208.

DOI: 10.22060/mej.2023.21720.7495

This page intentionally left blank

نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر

نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر، دوره ۵۵، شماره ۸، سال ۱۴۰۲، صفحات ۹۹۵ تا ۱۰۰۸
DOI: 10.22060/mej.2023.21720.7495

مطالعه عددی و آزمایشگاهی رفتار خمشی صفحات دوقطبی کامپوزیتی پیل سوختی پلیمری

لیلا امامی[۱]، محمدمهدی برزگری[۲*]، محمدرضا زمانی[۱]

۱- دانشگاه صنعتی مالک اشتر، مجتمع دانشگاهی مواد و فناوری‌های ساخت، تهران، ایران
۲- دانشگاه صنعتی مالک اشتر، پژوهشکده علوم و فناوری شمال، فریدونکنار، ایران.

خلاصه: پیلهای سوختی پلیمری به‌عنوان مولد انرژی، انرژی شیمیایی سوخت را به صورت مستقیم به انرژی الکتریکی تبدیل می‌نماید. از اجزای مهم پیل‌های سوختی پلیمری، صفحات دوقطبی هستند که نقش توزیع سوخت و اکسیدان و تسهیل مدیریت آب در داخل سلول و انتقال جریان الکتریکی را بر عهده دارند. در این پژوهش، نحوه‌ی شکست صفحات دوقطبی کامپوزیتی پایه گرافیت پیل‌های سوختی پلیمری تحت اثر بارهای خمشی به روش تجربی و عددی مورد بررسی قرار گرفت. صفحات دوقطبی کامپوزیتی ساده و دارای سوراخ با رویکرد تعیین پایداری خمشی تحت بار استاتیکی آزمایش و شبیه‌سازی شد. در تحلیل عددی، شبیه‌سازی مکانیکی به کمک روش اجزای محدود و با استفاده از نرم‌افزار آباکوس بکار گرفته شد. در ادامه پس از ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی، آزمون تجربی خمش سه‌نقطه‌ای بر روی آن‌ها با هدف صحه‌گذاری نتایج شبیه‌سازی انجام شد. در پایان، نتایج تحلیل‌های عددی و تجربی رفتار خمشی صفحات دوقطبی کامپوزیتی با یکدیگر مقایسه شد. مقایسه نتایج تحلیل‌های عددی و تجربی نشان داد که نتایج این دو روش انطباق قابل قبولی با یکدیگر داشته‌اند. علاوه بر این، وجود درصد گرافیت بالا و همچنین شکنندگی بالا موجب تضعیف جسم شده و تیرهایی از این جنس افزایش خیز نمونه را در پی داشته که این مسئله تنها به علت پیوند مولکولی گرافیت رخ می‌دهد که باعث سُر خوردن گرافیت می‌شود.

تاریخچه داوری:
دریافت: ۱۴۰۱/۰۶/۰۲
بازنگری: ۱۴۰۱/۱۰/۰۸
پذیرش: ۱۴۰۲/۰۷/۱۱
ارائه آنلاین: ۱۴۰۲/۰۸/۱۵

کلمات کلیدی:
پیل سوختی پلیمری
صفحات دوقطبی کامپوزیتی
خمش سه نقطه‌ای
شبیه‌سازی اجزای محدود
تحلیل تجربی

۱- مقدمه

پیل سوختی یک مولد الکتروشیمیایی است که انرژی شیمیایی سوخت را مستقیماً به انـرژی الکتریکی تبدیل می‌کند. در آند پیل سوختی پلیمری واکنش اکسیداسیون انجام می‌گردد و الکترون آزادشده وارد مدار خارجی و سپس به کاتد وارد می‌شود. یون مثبت تولیدی در آند با عبور از غشا (الکترولیت) به قسمت کاتد رفته و در حضور کاتالیزور با اکسیژن هوا و الکترونی که از مدار خارجی به قسمت کاتد واردشده است به آب تبدیل می‌شود. پیل سوختی کاربردهای فراوانی در زمینه‌های مختلف ازجمله حمل‌ونقل، نیروگاه‌ها و پیشرانش شناورها دارند.

یکی از اجزای مهم پیل‌های سوختی پلیمری صفحات دوقطبی می‌باشند که وظیفه جمع‌آوری جریان خروجی از آند و کاتد یک سلول، اتصال و ایجاد تماس الکتریکی بین سلول‌های مختلف سری پیل سوختی، انتقال حرارت ایجاد شده از طریق سیال خنککاری و ... را بر عهده دارند. انتقال فشار تماسی از سیستم مهار پیل سوختی به مجموعه غشا–الکترود و لایه نفوذ گاز نیز توسط صفحات دوقطبی انجام می‌شود، لذا این صفحات باید از میزان استحکام مناسبی برخوردار باشند. صفحات دوقطبی عموماً از گرافیت، فلزات یا مواد کامپوزیتی ساخته می‌شوند. صفحات دوقطبی کامپوزیتی برای تولید با تیراژ پایین با تولید نیمه انبوه از لحاظ اقتصادی مناسب‌تر از صفحات دوقطبی فلزی می‌باشد. از دیگر مزایای این نوع از صفحات دوقطبی، هدایت الکتریکی بالا، مقاومت تماسی کم و نیز مقاومت به خوردگی بالای آن‌ها نسبت به صفحات دوقطبی فلزی بدون پوشش می‌باشد. صفحات دوقطبی کامپوزیتی نزدیک به ۸۰ درصد وزن و حجم پیل‌های سوختی را دارا می‌باشند. صفحات دوقطبی پیل سوختی دارای شیارهایی برای ایجاد میدان شارش گازهای واکنشگر و سیال خنک‌کاری و همچنین دارای سوراخ‌هایی به عنوان راهگاه‌های عبور سیال‌های مختلف می‌باشند. تحلیل مکانیکی چنین صفحاتی که فاقد رفتار ایزوتروپیک هستند، با وجود شیار و سوراخ‌های مختلف از پیچیدگی‌های زیادی برخوردار می‌باشد. در سال‌های اخیر مطالعات گسترده‌ای توسط پژوهشگران به‌منظور بررسی رفتار و بهبود کارایی پیل‌های سوختی صورت گرفته است [۱].

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

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

افشاری و جزایری [۲]، با استفاده از شبیه‌سازی عددی و دو فازی پیل سوختی پلیمری، شرایط کاری مختلف از قبیل درصد رطوبت، نرخ جریان، دما و فشار گازهای ورودی را بر عملکرد پیل سوختی بررسی کردند. کاکاتی و همکاران [۳]، با انجام آزمایش‌هایی به بررسی خواص صفحات دوقطبی کامپوزیتی گرافیتی ساخته‌شده توسط تکنولوژی قالب‌گیری فشاری پرداختند. آن‌ها تلاش کردند که راهی جهت دستیابی به صفحه دوقطبی سبک‌تر و مقرون به‌صرفه پیدا کنند و تحقیقات خود را بر مبنای این هدف پیش بردند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد که هزینه پیل سوختی پلیمری عمدتاً وابسته به دو جز صفحه دوقطبی و لایه انتشار گاز می‌باشد. چن و همکاران [۴]، تحقیقی را در راستای آماده‌سازی صفحات دوقطبی بر اساس گرافیت/رزین برای پیل سوختی غشا پلیمری انجام دادند. بر اساس نتایج تحلیل‌های عددی با در نظر گرفتن تقویت خواص الکتریکی، خواص خمشی و خواص آب‌دوستی، سه نوع صفحه دوقطبی مطابق با خواص گرافیت و رزین به دست آمد. آن‌ها صفحاتی با گرافیت طبیعی، گرافیت توسعه‌یافته به‌عنوان پرکننده و رزین اپوکسی و رزین فنولی به‌عنوان زمینه تهیه کردند. در پژوهش آن‌ها مشخص شد صفحات کامپوزیتی حاوی رزین اپوکسی دارای هدایت الکتریکی بالاتری می‌باشد. پنگدام و همکاران [۵]، به بررسی تئوری اثر گرافیت و گرافن بر صفحه دوقطبی پرشده از پلی‌بازوکسازین در پیل سوختی پرداختند. آن‌ها سعی کردند که با بیان ضعف‌ها و مزایا این نوع صفحات روش‌های بهبود خصوصیات آن را پیدا کنند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که با توجه به خواص مکانیکی ضعیف و هزینه تولید بالا، استفاده از صفحات دوقطبی گرافیت خالص محدود است. کارودینی و همکاران [۶]، تحقیقی را در مورد استفاده از گرافیت به منظور تولید ماده‌ای برای ساخت صفحات دوقطبی کار کردند. این تحقیق درواقع استفاده از پوسته نورد به‌منظور ساخت صفحات‌دوقطبی در پیل‌سوختی غشاء تبادل پروتون بود. از سوی دیگر، پوسته نورد بسیار غنی از منابع آهن است که دارای مشخصه مورد نیاز مانند جمع‌کننده جریان در صفحات دوقطبی است و به‌طور قابل‌توجهی باعث کاهش هزینه کلی سیستم‌های پیل‌سوختی غشاء تبادل پروتون می‌شود. عبداللهی و همکاران [۷]، با انجام آزمایش‌هایی به بررسی استحکام خمشی و استحکام ضربه‌ای صفحات دوقطبی کامپوزیتی در پیل‌های سوختی پلیمری پرداختند. آن‌ها از نمونه‌هایی با درصد وزنی مختلف رزین فنولیک استفاده کردند. لی و همکاران [۸]، با طراحی و ساخت صفحه دوقطبی از جنس کامپوزیت با الیاف کربن که با روش ریخته‌گری تحت فشار تولید شده است به استحکام خمشی قابل قبولی دست یافتند. شریعتی و همکاران [۹]، ترکیب و خصوصی‌سازی نانوکامپوزیت اپوکسی گرافیت را برای صفحات دوقطبی مورد بررسی قرار داده‌اند. آن‌ها در این تحقیق، ترکیب یک نانوکامپوزیت مناسب از نظر خواص و هزینه برای استفاده در صفحات دوقطبی در سلول‌های سوختی غشاء پروتون با موفقیت انجام دادند. سولونگو همکاران [۱۰]، به بررسی اثر جهت‌گیری الیاف بر روی کامپوزیت‌های پلی پروپیلن/ الیاف کربن خرد شده در روی نانولوله‌های کربن یا گرافن به‌عنوان یک فیلر ثانویه در صفحات دوقطبی پرداختند. آن‌ها بررسی‌ها را توسط روش‌های تجزیه اشعه ایکس، اثر هدایت فیلر بر هدایت الکتریکی و اثر جهت‌گیری فیلر بر خواص مکانیکی انجام دادند. نتایج نشان داد که نسبت بالاتر ابعاد نانولوله‌های کربن قادر است فیلر را تا ۹۰ درصد به جهت‌گیری انفصال نزدیک کند به‌طوری‌که باعث بهبود و ارتقا هدایت الکتریکی در سطح و در راستای ضخامت شود.

لیانگ و همکاران [۱۱]، بررسی‌هایی را در زمینه بهینه‌سازی ساختاری گرافیت برای کامپوزیت اتیلن/ پروپیلن فلورینیته شده با کارایی بالا به‌عنوان صفحه دوقطبی انجام دادند. در این مقاله روش جدیدی برای بهینه‌سازی ساختاری با استفاده از ذرات گرافیت در اندازه‌های ۳۵ تا ۵۰۰ میلی‌متر ارائه شد تا کامپوزیت‌های اتیلن پروپیلن فلورینیته رسانا برای صفحات دوقطبی با درجه حرارت بالا بسازد. تهیه ورق‌های دوقطبی کامپوزیت اتیلن پروپیلن/ گرافیت به‌صورت ساختاری بهینه‌شده با ذرات گرافیت به‌خوبی پراکنده شده با اندازه‌های مختلف، یک استراتژی قوی برای تحقق صفحات دوقطبی با کارایی بالا و بزرگ را فراهم می‌کند. روش پیشنهادی آن‌ها برای تولید صفحات دوقطبی کامپوزیتی گرافیتی می‌تواند برای تهیه صفحات دوقطبی با دمای بالا برای استفاده در پیل‌های سوختی و اجزای خنک‌کننده در وسایل الکترونیکی و وسایل مربوط به خودرو به‌خوبی مورد استفاده قرار بگیرد.

با توجه به اینکه مقاومت در برابر خوردگی، هدایت الکتریکی و استحکام بالا از ملزومات ماده مورد استفاده در صفحات دوقطبی می‌باشد، استفاده از مواد کامپوزیتی پایه گرافیتی در ساخت صفحات دوقطبی مورد توجه قرار گرفته است. صفحات دوقطبی کامپوزیتی صنعتی که دارای ماهیت ترد و شکننده می‌باشند، تحت بارگذاری فشاری و خمشی به واسطه سیستم مهار پیل سوختی قرار می‌گیرند. رفتار این صفحات تحت بارگذاری فشاری (با توجه به میزان تنش وارده از طرف سیستم مهار پیل سوختی) بسیار مناسب می‌باشد، اما تحت بار خمشی و با توجه به وجود میدان‌های شارش گازهای واکنشگر و سیال خنک‌کاری و راهگاه‌های ورود و خروج سیالات، ایجاد ترک و شکست این صفحات تحت اثر تمرکز تنش ایجاد شده یکی از عوامل مهم محسوب می‌شود که باعث افت عملکرد و یا از کار افتادن پیل سوختی

جدول ۱. نام و درصد مواد BMC940-8649 [۱۲].

Table 1. Name and percentage of BMC940-8649 [12].

نام ماده	درصد	نام ماده	درصد
گرافیت	۲۰-۲۵	متیل دی‌فنیل‌دی‌ایزوسیانات[1]	۱-۵
استایرن[2]	۵-۱۰	دیوینیل بنزن[3]	۰/۱-۱
کربن	۱-۵	بنزن[4]	۰/۱-۱

[1] Methylene Diphenyl Diisocyate
[2] Styrene
[3] Divinylbenzene
[4] Benzene:

خواهد شد. این امر باعث شده است که پژوهش در زمینه پیش‌بینی شکست این صفحات در بارگذاری‌های خمشی ضرورت یابد.

با مرور مطالعات انجام‌شده و مشاهده تاثیر خواص مکانیکی و هندسه صفحات دوقطبی کامپوزیتی روی شکست این صفحات و همچنین فقدان پژوهش در زمینه تحلیل مکانیکی صفحات کامپوزیتی دارای سوراخ، در این پژوهش، صفحات دوقطبی‌کامپوزیتی پایه گرافیت با و بدون سوراخ جهت تعیین پایداری خمشی و کششی به دو روش عددی اجزای محدود و آزمون تجربی مورد تحلیل قرار گرفت. در این مقاله، با توجه به تیاز به بررسی رفتار صفحات کامپوزیتی تحت بارگذاری خمشی، مدل استاندارد آزمون خمش سه نقطه‌ای به همراه سوراخ‌هایی که از لحاظ شکل هندسی مشابه راهگاه‌های پیل‌های سوختی تجاری می‌باشند، به عنوان نمونه مقیاس مورد پژوهش قرار گرفت. در روش عددی ابتدا مدل هندسی و اجزای محدود ساختار مورد نظر با استفاده از نرم افزار آباکوس ایجاد و تحلیل های استحکامی و رفتار خمشی برای تعیین بارهای آستانه شکست استخراج شد. سپس آزمون تجربی نیز بر روی نمونه ساخته شده انجام گرفت. در مرحله آزمون تجربی، نمونه مورد نظر، طراحی و آماده سازی و در ادامه آزمایش خمش سه نقطه‌ای و تحلیل نتایج آن انجام شد. در نهایت نیز مقایسه نتایج عددی و آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار گرفت.

۲- روش تحلیل

مسئله اصلی و هدف این پژوهش، بررسی عددی و تجربی رفتار شکست صفحات دوقطبی کامپوزیتی پیل‌های سوختی پلیمری تحت شرایط و اثر بارهای کششی و خمشی به روش عددی و تجربی می‌باشد. در ابتدا به طراحی مدل عددی و مدل‌سازی اجزای محدود پرداخته شد و سپس مدل تجربی مورد آزمایش قرار گرفت و در انتها نتایج تحلیل‌های عددی و تجربی باهم مقایسه شد.

در این پژوهش بررسی استحکام خمشی صفحات دوقطبی بر مبنای استاندارد ASTM ۷۹۰D انجام پذیرفت. ساختار هندسی مطابق استاندارد ذکر شده به‌صورت تیری با هندسه مستطیلی با ابعاد ۳×۱۰×۱۰۰ میلی‌متر مکعب به همراه سوراخ‌های مستطیلی شکل در مرکز صفحه در نظر گرفته شد. قطر سنبه‌های خمش مورد استفاده در این آزمون ۲۰ میلی‌متر و فاصله بین تکیه‌گاه‌ها ۲۹ میلی‌متر می‌باشد. ماده کامپوزیتی مورد استفاده در این پژوهش به‌صورت پودر ترکیبی از الیاف و رزین است که طی عملیات قالب‌گیری تجمیعی جسم[1] به‌صورت بلوک یکپارچه ساخته شد، خواص فیزیکی و مکانیکی ماده کامپوزیتی به ترتیب در جدول ۱ و جدول ۲ ارائه شده است.

۲- ۱- مدل‌سازی اجزای محدود

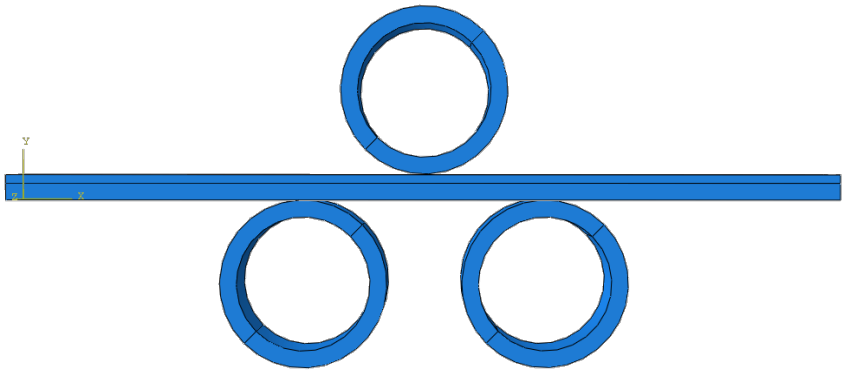
ب برای تحلیل مسئله از تحلیل استاتیکی در نرم افزار المان محدود آباکوس استفاده شد. از آنجا که مدل آزمایش متقارن نمی‌باشد، لذا برای شبیه‌سازی المان محدود از مدل سه‌بعدی کامل استفاده شده است. هدف از شبیه‌سازی تحلیل حداکثر نیروی خمشی قابل تحمل تیر می‌باشد که ابعاد نمونه بر اساس استاندارد آزمون خمش سه نقطه‌ای لحاظ گردیده است.

1 Bulk moulding compound

جدول ۲. خواص مکانیکی BMC940-8649 [۱۲].

Table 2. Mechanical properties of BMC940-8649 [12].

خواص مکانیکی	مقادیر	واحد	خواص مکانیکی	مقادیر	واحد
ضریب پوآسون	۰/۳۲	--	استحکام خمشی	۴۰	MPa
مدول کششی	۱۱	GPa	استحکام فشاری	۷۵	MPa
استحکام کششی	۳۰	MPa	چگالی	۱/۸۴	g/cm^3
مدول خمشی	۱۰/۳۵	GPa			



شکل ۱.شبیه‌سازی آزمون خمش

Fig. 1. Bending test simulation

آزمون خمش سه‌نقطه‌ای با بارگذاری استاتیکی انجام می‌شود. شکل ۱ مدل مورد نظر برای شبیه‌سازی عددی آزمون خمش سه نقطه‌ای در نرم افزار آباکوس را نمایش می‌دهد. در شبیه سازی برای اعمال اصطکاک بین اجزای مدل از اصطکاک پنالتی استفاده و مقدار اصطکاک بین تیر و غلطک‌ها برابر ۰/۳ در نظر گرفته شد.

المان به‌کاررفته، مکعبی از نوع المان هشت گره‌ای مکعبی ، سه بعدی، دارای فرمول‌بندی کاهش یافته[1] است، که معرف المان مکعبی سه‌بعدی هشت گره‌ای می‌باشد. شکل ۲ نحوه مش‌بندی تیر را نشان می‌دهد.

در نرم افزار آباکوس برای تعریف رفتار شکست نمونه، از معیار انرژی شکست داکتیل استفاده شده است. این معیار به ازای ورود مقادیر پلاستیک دقیق برای مواد ترد نیز قابل استفاده می‌باشد [۱۳]. معادله (۱) رابطه بین تنش، جابجایی پلاستیک، انرژی بر واحد سطح و شکست را نشان می‌دهد.

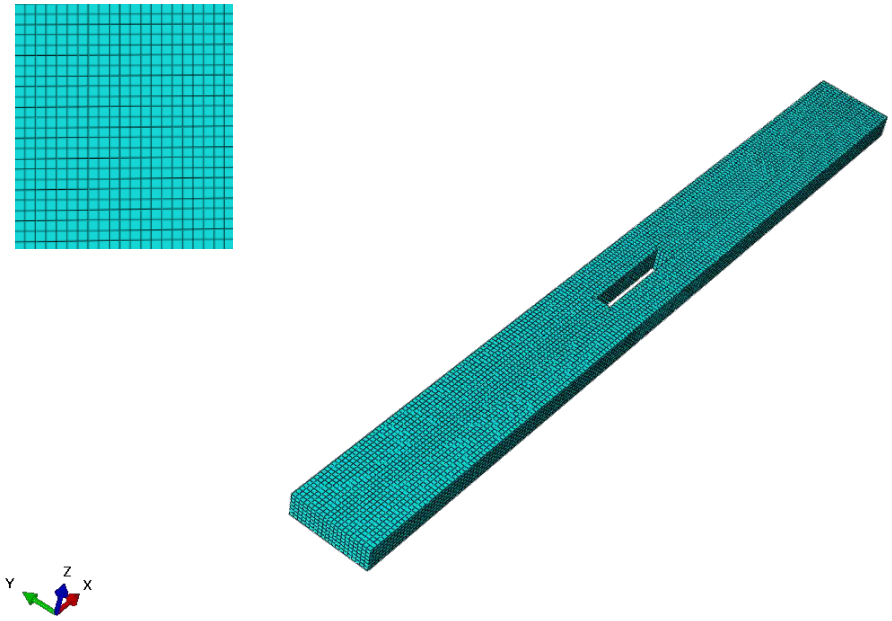
$$d = 1 - \exp\left(-\int_0^{\bar{u}^{pl}} \frac{\bar{\sigma}_y d\bar{u}^{pl}}{G_f}\right) \qquad (۱)$$

در رابطه فوق σ_f تنش، $\bar{u}^{pl}$ جابجایی پلاستیک و G_f انرژی بر واحد سطح می‌باشد. زمانی که d به سمت ۱ میل کند شکست قطعه اتفاق می‌افتد.

۲- ۲- ساخت نمونه‌های تجربی

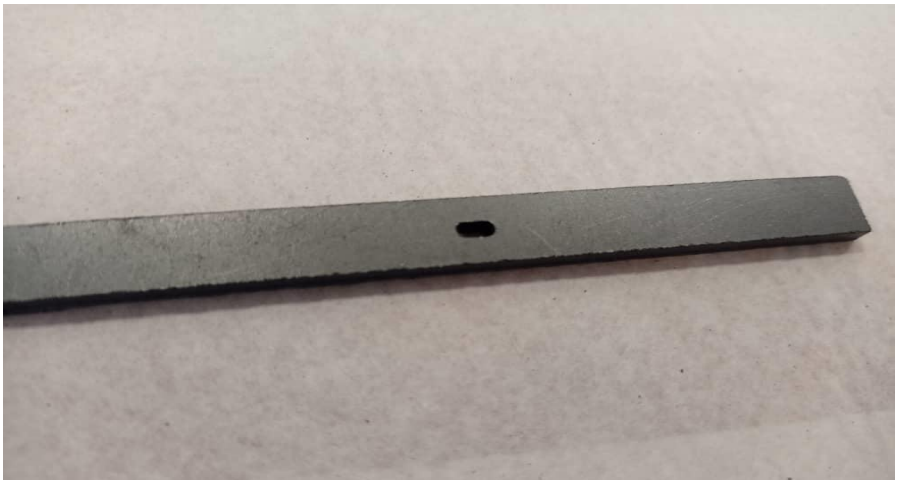
مواد به‌صورت پودر آماده می‌باشند، که مخلوطی از رزین و دیگر ترکیبات قیدشده در جدول (۱) تحت عملیات قالب‌گیری تجمیعی جسم

1 C3D8R



شکل ۲. مشبندی تیر.

Fig. 2. Beam meshing



شکل ۳. نمونه های تست خمش تیر سوراخدار

Fig. 3. Bending test samples of perforated beam

تهیه می‌شوند. مخلوط الیاف پلیمر به شکل گندله، از قیف به شکل ناودانی به ماشین قالب‌گیری تغذیه می‌شود. سپس مواد توسط تغذیه‌کننده پیچی به جلو رانده‌شده و وارد یک قالب دوتکه می‌شوند و حفره‌های قالب را پر می‌کنند [۱۴].

۲- ۳- آماده‌سازی نمونه

در این قسمت نمونه‌های مورد آزمایش با توجه به ابعادی که در استاندارد ذکرشده تهیه می‌شوند و عملیات مربوطه از قبیل ایجاد برش نمونه‌ها و سوراخ توسط دستگاه فرز سی ان سی[1] ایجاد. شکل ۳ قطعات ساخته‌شده را

1 CNC

شکل ۴. دستگاه تست خمش.

Fig. 4. Bending test apparatus

نمایش می‌دهد.

۲- ۴- مراحل آزمون خمش

پس از اتمام انجام شبیه‌سازی عددی توسط نرم‌افزارهای اجزای محدود برای مقایسه و صحه‌گذاری روش عددی از روش آزمون تجربی با استفاده از دستگاه کشش و فشار تک محوره با ظرفیت ۲۰ کیلونیوتن شرکت سنتام انجام شده است.

در این آزمایش از نمونه‌هایی با سطح مقطع مستطیلی به‌عنوان تیر استفاده شده است. نمونه‌ها روی دو تکیه‌گاه با فاصله مشخص قرار داده شده است. سپس، به کمک یک سنبه از بالا و در وسط این دو تکیه‌گاه، نیرو با سرعت ۰/۵ میلی‌متر بر دقیقه به وسط تیر وارد و خیز تیر اندازه‌گیری شده است. با اندازه‌گیری هم‌زمان خیز تیر و نیروی وارد بر آن می‌توان مقدار استحکام خمشی و مدول خمشی را تعیین نمود.

مطابق با استانداردASTM D۷۹۰ جهت تعیین مدول‌خمشی و استحکام خمشی می‌توان از روابط (۲ و ۳) استفاده نمود.

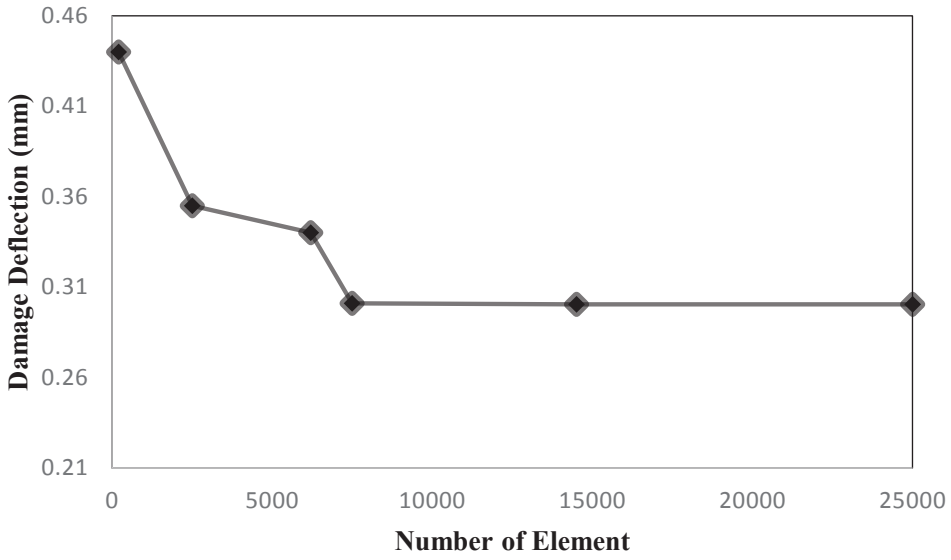
$$\sigma_f = 3pl / 2bd^2 \qquad (۲)$$

$$E_B = L^3 m / 4bd^3 \qquad (۳)$$

که در آن σ استحکام خمشی، E مدول خمشی، P ماکزیمم نیروی به‌دست‌آمده از روی نمودار نیرو- جابه‌جایی، L فاصله بین دو تکیه‌گاه، b عرض نمونه مورد آزمایش، d ضخامت نمونه، m شیب خط مماس بر قسمت خطی نمودار نیرو- جابجایی است. در شکل ۵ می‌توان مشخصات ابعادی مورد استفاده در روابط ذکر شده را مشاهده نمود.

۳- نتایج و تفسیر

برای اطمینان حاصل کردن از صحت تحلیل المان محدود توجه به حساسیت پاسخ‌ها به شبکه‌بندی حائز اهمیت است. بر این اساس، می بایست تحلیل به حساسیت شبکه در هر مدل المان محدود صورت گیرد. طبق این



شکل ۶. نمودار همگرایی مش.

Fig. 6. Mesh convergence diagram

تحلیل عموما یکی از خروجی‌های کد المان محدود مثلا جابه‌جایی شکست در نظر گرفته می‌شود. ابتدا مدل با المان‌های درشت شبکه‌بندی می شود و پس از تحلیل بیشینه میزان جابه‌جایی شکست ثبت می گردد. مشاهده می شود به مرور میزان تغییرات بیشینه جابه‌جایی شکست با اندازه شبکه، کمتر می شود و می‌توان گفت که دیگر اندازه شبکه اثر قابل ملاحظه‌ای بر روی جابه‌جایی شکست ندارد. این اندازه به عنوان اندازه بهینه شبکه در نظر گرفته می‌شود. بنابراین به‌منظور دست‌یابی به بهترین نتایج حل عددی مسئله، این تحلیل با تعداد المان‌های متفاوت انجام شد. در انتها، با افزایش تعداد المان‌های در نظر گرفته‌شده تعداد مناسب المان برای همگرایی شبیه‌سازی تعیین می‌گردد. تعداد المان ۱۵۰۰۰ برای رسیدن به جواب با دقت مورد نظر مناسب و کافی می‌باشد. شکل ۶ نمودار استقلال از شبکه را نشان می‌دهد.

۳- ۱- نتایج حاصل از تحلیل عددی

بررسی‌های عددی برای سوراخ مستطیلی در مرکز تیر با توجه به طراحی آزمون انجام پذیرفته است. نتایج حاصل از بررسی‌های عددی حاکی از آن است که هرچه طول سوراخ بیشتر می‌شود، قطعه تضعیف بیشتری پیدا می‌کند و استحکام خمشی جسم کاهش پیدا می‌کند. در شکل ۷ نمودار بیشینه نیرو برای تیر به عرض ۲ میلی‌متر و طول‌های ۴، ۱۲ و ۲۰ میلی‌متر حاصل از تحلیل عددی نمایش داده شده است. شکل ۷ مقایسه بیشینه نیرو برای تیر با سوراخ با ابعاد مختلف را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که افزایش ۵ برابری طول سوراخ سبب کاهش ۵ درصدی نیروی قابل تحمل در تیر می‌شود.

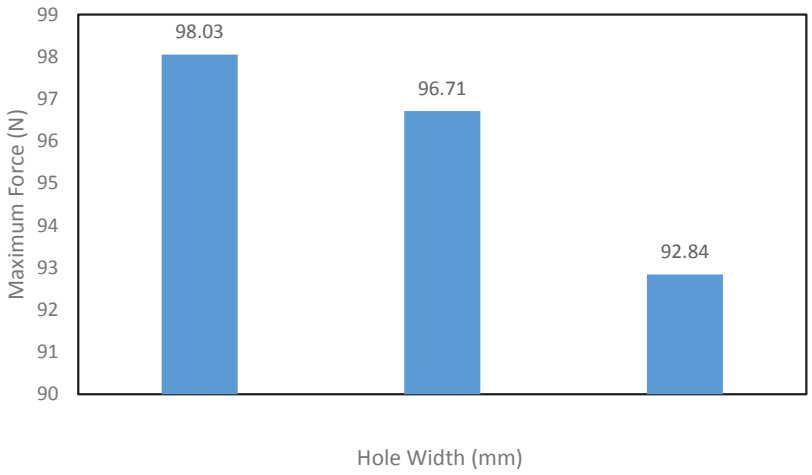
شکل ۸ نمایش‌دهنده کانتورهای تنش و کرنش تیر به عرض ۲ میلی‌متر و طول‌های ۴، ۱۲ و ۲۰ میلی‌متر می‌باشد. همان‌طور که در شکل ۸ مشخص است، افزایش طول سوراخ از ۴ به ۲۰ میلی‌متر باعث کاهش استحکام تیر شده و میزان تنش شکست را تقریبا نصف می‌نماید

در شکل ۹ نمودارهای بیشینه نیرو برای تیر با سوراخ به عرض ۴ و طول‌های ۴، ۱۲ و ۲۰ نمایش داده شده است. همان‌طور که در این شکل نمایش داده شده است، عرض سوراخ نسبت به طول آن از تاثیر بیشتری در استحکام تیر برخوردار می‌باشد.

جدول ۴ خیز بیشینه، مدول خمشی و استحکام خمشی را برای تیر با سوراخ به عرض ۴ و طول‌های مختلف نشان می‌دهد.

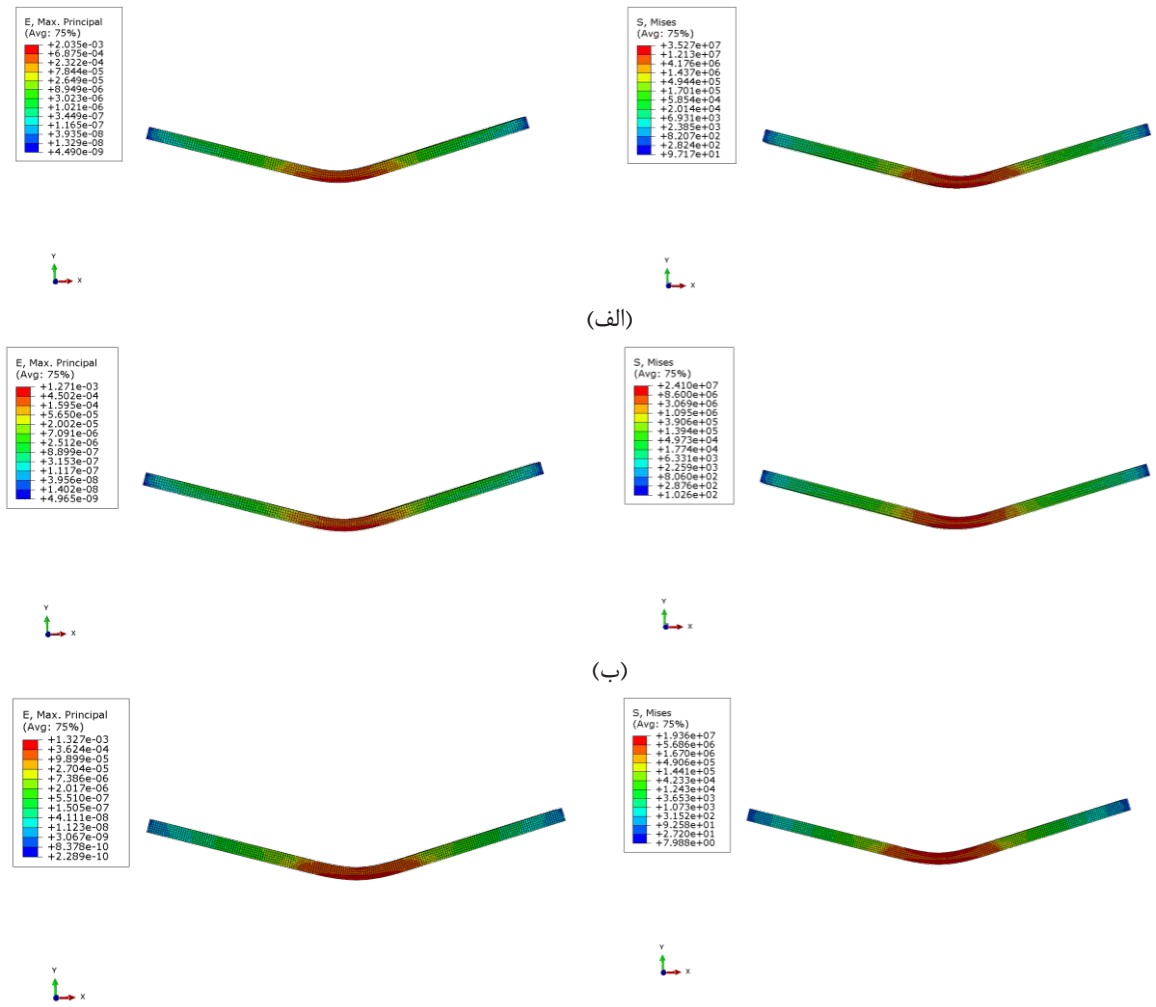
در شکل ۱۰ نمودارهای بیشینه نیرو برای تیر با سوراخ به عرض ۶ و طول‌های ۴، ۱۲ و ۲۰ نمایش داده شده است.

جدول ۵ خیز بیشینه، مدول خمشی و استحکام خمشی را برای تیر با سوراخ به عرض ۶ و طول‌های مختلف نشان می‌دهد.



شکل ۷. نمودار بیشینه نیرو حاصل از تحلیل عددی سوراخ با عرض ۲میلی‌متر و طول‌های مختلف.

Fig. 7. The diagram of the maximum force obtained from the numerical analysis of the hole with a width of 2 mm and different lengths.



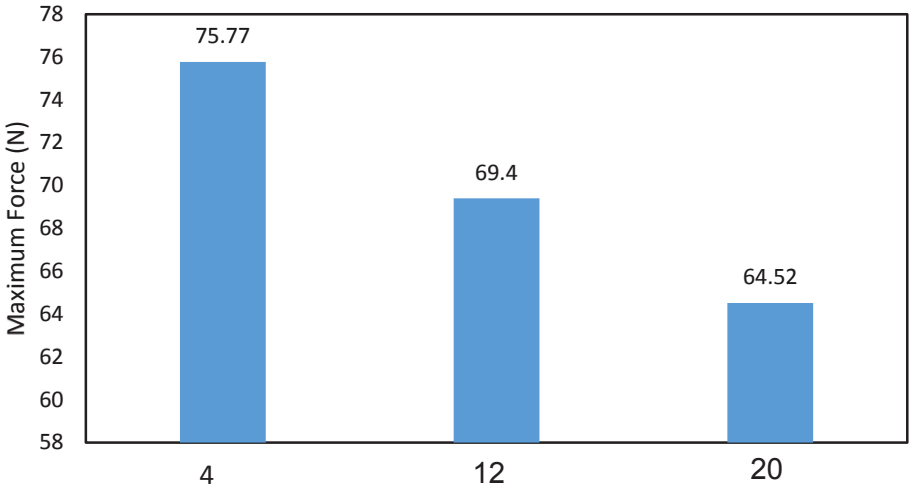
شکل ۸. کانتورهای تنش و کرنش تیر سوراخ دار به عرض ۲ و به ترتیب، (الف) ٤، (ب) ۱۲ و (ج) ۲۰ میلی‌متر.

Fig. 8. Stress and strain contours of the perforated beam with a width of 2 and length, respectively, (a) 4, (b) 12 and (c) 20 mm.

جدول ۳. خصوصیات خمشی تیر سوراخ‌دار با عرض۲ میلی‌متر.

Table 3. Bending properties of 2 mm wide perforated beam.

هندسه	خیز بیشینه (mm)	مدول خمشی (GPa)	استحکام خمشی (MPa)
تیر با سوراخ به عرض ۲ و طول ۴ میلی‌متر	۰/۱۷۵	۱۲/۱۷۱	۴۷/۳۶۷
تیر با سوراخ به عرض ۲ و طول ۱۲ میلی‌متر	۰/۱۹۸	۱۱/۸۵۵	۴۷/۲۹۱
تیر با سوراخ به عرض ۲ و طول ۲۰ میلی‌متر	۰/۲۱۳	۱۱/۶۷۵	۴۵/۴۹۵



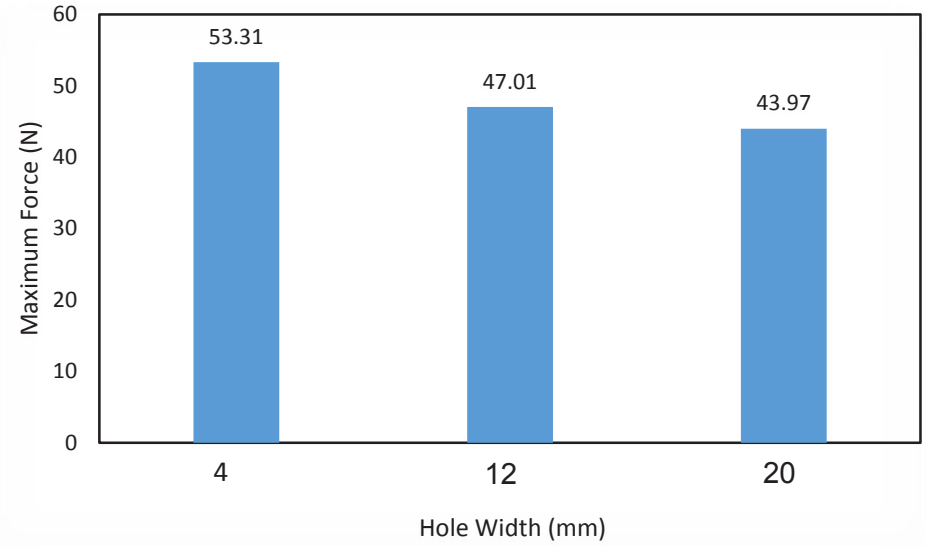
شکل ۹. نمودار بیشینه نیرو حاصل از تحلیل عددی سوراخ با عرض٤ میلی‌متر و طول‌های مختلف.

Fig. 9. The diagram of the maximum force obtained from the numerical analysis of the hole with a width of 4 mm and different lengths

جدول ۴. خصوصیات تیر سوراخ‌دار.

Table 4. Features of perforated beam.

هندسه	خیز بیشینه (mm)	مدول خمشی (GPa)	استحکام خمشی (MPa)
تیر با سوراخ به عرض ۴ و طول ۴ میلی‌متر	۰/۱۸۵	۹/۰۱۰	۳۶/۷۳۳
تیر با سوراخ به عرض ۴ و طول ۱۲ میلی‌متر	۰/۱۸۶	۸/۷۱۶	۳۴/۱۵۴
تیر با سوراخ به عرض ۴ و طول ۲۰ میلی‌متر	۰/۱۹۱	۸/۴۲۲	۳۱/۸۵۵



شکل ۱۰. نمودار بیشینه نیرو حاصل از تحلیل عددی سوراخ با عرض ٦ میلی‌متر و طول های مختلف.

Fig. 10. The diagram of the maximum force obtained from the numerical analysis of the hole with a width of 6 mm and different lengths

جدول ۵. خصوصیات خمشی تیر سوراخ‌دار با عرض٦ میلی‌متر.

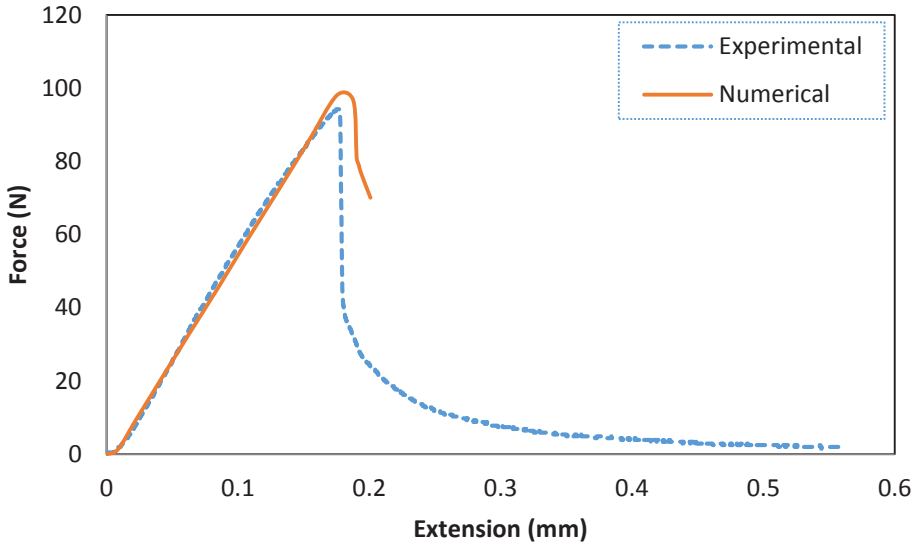
Table 5. Bending characteristics of a 6 mm wide perforated beam.

هندسه	خیز بیشینه (mm)	مدول خمشی (GPa)	استحکام خمشی (MPa)
تیر با سوراخ به عرض ۶ و طول ۴ میلی‌متر	۰/۱۷۰	۵/۷۳۶	۲۵/۷۷۱
تیر با سوراخ به عرض ۶ و طول ۱۲ میلی‌متر	۰/۱۷۵	۵/۵۵۵	۲۲/۹۷۱
تیر با سوراخ به عرض ۶ و طول ۲۰ میلی‌متر	۰/۱۸۳	۵/۲۸۴	۲۱/۶۹۳

نمودارهای بیشینه نیرو و جدول‌های خصوصیات خمشی برای تیر عرض‌های سوراخ ۲، ۴ و ۶ نشان می‌دهد که با افزایش طول سوراخ، تیر میزان جابجایی بیشتری را تحمل می‌کند اما در نیرو کمتری دچار شکست می‌شود. همچنین مشاهده شد که با افزایش مساحت سوراخ در تیر، میزان تردی تیر کاهش می‌یابد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که افزایش طول و عرض سوراخ سبب کاهش غیرخطی در استحکام تیر می‌شود. همچنین مشاهده می‌شود با توجه به نحوه بارگذاری، افزایش عرض سوراخ، تاثیر بیشتری نسبت به طول سوراخ در استحکام تیر دارد.

۳- ۲- نتایج حاصل از تحلیل تجربی

در این قسمت پژوهش تیر با ابعاد ۳×۱۰×۱۰۰ میلی‌متر تنها با ایجاد سوراخ در وسط تیر به ابعاد ۲×۴ میلی‌متر مورد آزمون تجربی قرار گرفت. شرایط مرزی مانند نمونه‌های قبل و سرعت فک بالا که ۰/۵میلی‌متر بر دقیقه و فاصله تکیه‌گاه‌ها ۲۹ میلی‌متر مطابق استاندارد D۷۹۰ نظر گرفته شده است. در شکل ۱۱ مقایسه دو نمودار عددی و تجربی تیر سوراخ‌دار آورده شده است، که نشان می‌دهد در آزمون تجربی در نیروی ۹۴/۲ نیوتن و خیز



شکل ۱۱. نمودار مقایسه عددی و تجربی تیر سوراخ‌دار.

Fig. 11. Numerical and experimental comparison diagram of perforated beam

جدول ۶. مقایسه نتایج عددی و تجربی تیر سوراخ‌دار.

Table 6. Comparison of numerical and experimental results of perforated beam.

هندسه		خیز بیشینه (mm)	مدول خمشی (GPa)	استحکام خمشی (MPa)	درصد اختلاف
تیر با سوراخ به عرض ۲ و طول ۴ میلی‌متر	عددی	۰/۱۷۵	۱۲/۱۷۱	۴۷/۳۶۷	۶/۱۸ درصد
	تجربی	۰/۱۷۹	۱۲/۰۱۲	۴۵/۲۷۰	

۰/۱۷۹تیر گسیخته می‌شود، ولی در مدل عددی تیر در نیروی ۹۸/۰۳ نیوتن و خیز ۰/۱۷۵ میلی‌متر شکسته می‌شود. اختلاف بین نمودارهای عددی و تجربی ۶/۱۸ درصد است، که درصد نسبتاً خوبی را نشان می‌دهد، همچنین می‌توان عنوان کرد افزایش نیرو شکست رابطه مستقیم با زیادشدن مدول خمشی و استحکام خمشی دارد ولی خیز تیر کاهش می‌یابد.

در جدول ۶ مقایسه تجربی و عددی خیز بیشینه، مدول خمشی و استحکام خمشی برای تیر به عرض ۲ و طول ۴ میلی‌متر آورده شده است.

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، تحلیل صفحات دوقطبی کامپوزیتی مورد بررسی قرار گرفت و برای تحلیل خمشی هر چه بهتر این صفحات به بررسی آن‌ها در قالب تیرهای کامپوزیتی پرداخته شد، در حالت دارای حفره با رویکرد پایداری خمشی و تعیین استحکام شکست مورد بررسی قرار گرفت. در روش عددی ابتدا مدل هندسی و مدل المان محدود تیر مورد نظر ایجاد و تحلیل‌های استحکامی و رفتار خمشی برای بارهای آستانه و نیز استخراج خیز تیر، مدول

خمشی، استحکام خمشی انجام شد، و سپس در مرحله‌ی پژوهش تجربی نمونه‌ها موردنظر ساخته‌شده و در ادامه آزمون‌های تجربی از طریق ساخت نمونه‌های استاندارد و انجام آزمون‌های خواص مواد استخراج گردید. در پایان، نتایج به‌دست‌آمده عددی و تجربی به‌صورت رفتار خمشی با یکدیگر مقایسه و نتایج حاصله به‌صورت مختصر ارائه شد. مقادیر ۹۸/۰۳ و۹۴/۲ نیوتن در بارهای بحرانی خمشی تیر سوراخ‌دار در حالت عددی و تجربی نشان می‌دهد که تحلیل عددی و تجربی۶/۱۸ درصد اختلاف دارند. طبق تحلیل‌های انجام‌شده در آزمون خمش، تیرها در قسمت تحتانی تحمل کمتری دارند زیرا تحت کشش قرار می‌گیرد. تمامی تیرهای مورد آزمون از سطح زیرین شروع به شکست می‌کنند، ولی به علت نوع ماده که بسیار ترد می‌باشد، به‌سرعت شکست رخ می‌دهد. وجود درصد گرافیت بالا و همچنین شکنندگی بالا موجب تضعیف جسم شده و ازاین‌رو در تحلیل‌های عددی و تجربی تیرهایی از این جنس افزایش خیز نمونه را در پی داشته که این مسئله تنها به علت پیوند مولکولی گرافیت رخ می‌دهد که باعث سُر خوردن گرافیت می‌شود. در بررسی‌ها نشان داده شد که این مواد به علت درصد بالای گرافیت شکنندگی و رسانایی بسیار زیاد و به علت وجود مقادیر زیاد پلیمر از استقامت بالا در مقابل خوردگی برخوردار هستند.

منابع

[1] F. Barbir, S. Yazici, Status and development of PEM fuel cell technology, International Journal of Energy Research, 32(5) (2008) 369-378.

[2] E.Afshari, A.Khayam, Numerical investigation of polymer fuel cell performance with honeycomb flow field, Numerical methods in Engineering, 33(2) (2015) 69-86. (in Persian).

[3] S. Dhakate, R. Mathur, B. Kakati, T. Dhami, Properties of graphite-composite bipolar plate prepared by compression molding technique for PEM fuel cell, International Journal of Hydrogen Energy, 32(17) (2007) 4537-4543.

[4] H. Chen, X.-H. Xia, L. Yang, Y.-d. He, H.-b. Liu, Preparation and characterization of graphite/resin composite bipolar plates for polymer electrolyte membrane fuel cells, Science and Engineering of Composite Materials, 23(1) (2016) 21-28.

[5] M. Okhawilai, A. Pengdam, R. Plengudomkit, S. Rimdusit, Effects of Graphene and Graphite on Properties of Highly Filled Polybenzoxazine Bipolar Plate for Proton Exchange Membrane Fuel Cell: A Comparative Study, Carbon-related Materials in Recognition of Nobel Lectures by Prof. Akira Suzuki in ICCE, (2017) 211-259.

[6] D. Khaerudini, G. Prakoso, D. Insiyanda, H. Widodo, F. Destyorini, N. Indayaningsih, Effect of graphite addition into mill scale waste as a potential bipolar plates material of proton exchange membrane fuel cells, in: Journal of Physics: Conference Series, IOP Publishing, 2018, pp. 012050.

[7] E.Abdollahi, F.Ghasemi, R.Abdollahmirzaei., Experimental analysis of the mechanical behavior of composite bipolar plates in a polymer fuel cell, Journal of Tabriz University Mechanical Engineering, 47(3) (2017) 149-158. (in Persian).

[8] S.-J. Kang, D.O. Kim, J.-H. Lee, P.-C. Lee, M.-H. Lee, Y. Lee, J.Y. Lee, H.R. Choi, J.-H. Lee, Y.-S. Oh, Solvent-assisted graphite loading for highly conductive phenolic resin bipolar plates for proton exchange membrane fuel cells, Journal of Power Sources, 195(12) (2010) 3794-3801.

[9] M. Soleimani Alavijeh, H. Kefayati, A. Nozad Golikand, S. Shariati, Synthesis and characterization of epoxy/graphite/nano-copper nanocomposite for the fabrication of bipolar plate for PEMFCs, Journal of Nanostructure in Chemistry, 9 (2019) 11-18.

[10] N.A.M. Radzuan, A.B. Sulong, M.R. Somalu, A.T. Abdullah, T. Husaini, R.E. Rosli, E.H. Majlan, M.I. Rosli, Fibre orientation effect on polypropylene/milled carbon fiber composites in the presence of carbon nanotubes or graphene as a secondary filler: Application on PEM fuel cell bipolar plate, International journal of hydrogen energy, 44(58) (2019) 30618-30626.

[11] P. Liang, D. Qiu, L. Peng, P. Yi, X. Lai, J. Ni, Contact resistance prediction of proton exchange membrane fuel cell considering fabrication characteristics of metallic bipolar plates, Energy conversion and management, 169 (2018) 334-344.

[12] M.B. Burkholder, N.S. Siefert, S. Litster, Nonlinear analysis of voltage dynamics in a polymer electrolyte fuel cell due to two-phase channel flow, Journal of Power Sources, 267 (2014) 243-254.

[13] A. Hillerborg, M. Modéer, P.-E. Petersson, Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements, Cement and concrete research, 6(6) (1976) 773-781.

[14] R. Yeetsorn, W.P. Ouajai, K. Onyu, Studies on surface modification of polypropylene composite bipolar plates using an electroless deposition technique, RSC advances, 10(41) (2020) 24330-24342.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

L. Emami, M. M. Barzegari, M. R. Zamani, Numerical and Empirical Investigation on Bending Behavior of Composite Bipolar Plates for Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells, Amirkabir J. Mech Eng., 55(8) (2023) 995-1008.

DOI: 10.22060/mej.2023.21720.7495

این صفحه عمداً خالی است