



ساخت و تحلیل صفحات دوقطبی کامپوزیتی با گرافیت انبساط یافته جهت افزایش هدایت الکتریکی پیل‌های سوختی

پوریا پوستان¹، رسول عبدالله میرزایی²، فرامرز آشنای قاسمی^{3*}، القار عبداللهی⁴

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه شیمی، علوم پایه، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران

2- دانشیار، گروه شیمی، علوم پایه، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران

3- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران

4- کارشناس ارشد، مهندس مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران

* تهران، صندوق پستی 1678815811، f.a.ghasemi@sru.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

دریافت: 97/11/15

پذیرش: 97/12/18

کلیدواژگان:

صفحات دوقطبی

پیل سوختی

گرافیت انبساط یافته

کامپوزیت

هدایت الکتریکی

صفحات دوقطبی از پرکاربردترین و اجزای اصلی یک پیل سوختی پلیمری است. در این مقاله ابتدا صفحات دوقطبی کامپوزیتی طبق استاندارد دیپارتمان انرژی (DOE) ساخته شد و سپس میزان هدایت الکتریکی و رفتار مکانیکی آنها تعیین و بررسی شده است. صفحات دوقطبی کامپوزیتی به روش ریخته‌گری تحت فشار و حرارت ساخته شدند. برای ساخت این صفحات از رزین فنولیک به عنوان زمینه کامپوزیت، از گرافیت انبساط یافته جهت افزایش هدایت الکتریکی، از پارچه کربنی به عنوان پرکننده و از پارچه کربنی جهت افزایش استحکام خمشی و بهینه کردن هدایت الکتریکی استفاده شد. آزمون‌های تجربی نیز مطابق معیار DOE انجام پذیرفت. میزان هدایت الکتریکی در بهترین حالت، نسبت به معیار استاندارد به میزان بیش از 40 درصد افزایش یافت. میزان استحکام خمشی و استحکام ضربه نمونه‌های اندازه‌گیری شده نسبت به معیار استاندارد، در بهترین حالت، به ترتیب تا 11 و 170 درصد افزایش یافت. با توجه به تصاویر SEM و نتایج آزمون‌ها مشخص شد که هدایت الکتریکی با استفاده از گرافیت انبساط یافته افزایش می‌یابد.

Fabrication and analysis of composite bipolar plates with expanded graphite to increase electrical conductivity of fuel cells

Poorya Poostan¹, Rasool Abdullah Mirzaie¹, Faramarz Ashenai Ghasemi^{2*}, Elghar Abdullahi²

1- Department of Chemistry, Faculty of Science, Shahid Rajaei Teacher Training University, Tehran, Iran

2- Faculty of Mechanical Engineering, Shahid Rajaei Teacher Training University, Tehran, Iran

* P.O.B. 1678815811, Tehran, Iran, f.a.ghasemi@sru.ac.ir

keywords

Bipolar plate

Fuel cell

Expanded graphite

Composite

Electrical conductivity

Abstract

Bipolar plates are one of the most important components in a PEM fuel cell. In this study, a bipolar plate made of stamping method is developed to increase electrical conductivity and mechanical behavior and manufacturing productivity of the fuel cell and to decrease electrical resistance according to DOE. For fabrication these plates, phenolic resins were used as matrix and expanded graphite to increase electrical conductivity and graphite to filler and carbon fiber to increase flexural strength and optimize electrical conductivity. The electrical conductivity increased up to 40 percent respect to the DOE. The flexural strength and impact strength of the measured specimens were improved respect to the DOE about 11 and 170 percent, respectively. The experimental results are in accordance with DOE. According to SEM images and test curves, electric conductivity increases with expanded graphite fillers.

1-مقدمه

صفحات دوقطبی فلزی به دلیل وزن و هزینه کمتر در فرآیند ساخت، جایگزین مناسبی برای صفحات دو قطبی پلیمری است اما به دلیل خوردگی بالای صفحات فلزی، استفاده از این صفحات محدود شده است [3].
افشاری و همکاران به بررسی عملکرد پیل سوختی برای کاربرد در خودرو پرداخته، متغیرهای اثرگذار بر عملکرد پیل از قبیل درصد رطوبت، نخ جریان، دما و فشار گاز را مورد بررسی قرار دادند. نتیجه این تحقیق در تمام ولتاژهای خروجی پیل این بود که، با افزایش دمای ورودی، عملکرد پیل افزایش یافت.

پیل سوختی به دلیل ایجاد انقلاب گسترده در زمینه‌ی تولید انرژی در حال توسعه است و صفحات دوقطبی نیز بخش مهمی از پیل سوختی به شمار می‌آید. صفحات دوقطبی، دستگاهی الکتروشیمیایی هستند که حامل گاز بوده و انرژی حاصل از واکنش‌های شیمیایی را به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کنند. در یک پیل سوختی، ورودی، سوخت هیدروژن و اکسیژن و خروجی، برق و آب است [1]. در حال حاضر صفحات دوقطبی زیادی با ویژگی‌های متفاوت ساخته شده است که جنس آن‌ها فلز، گرافیت و مواد مرکب است [2,1].

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده نمایید:

Poostan, P., Abdullah Mirzaie, R., Ashenai Ghasemi, F., and Abdullahi, E. "Fabrication and analysis of composite bipolar plates with expanded graphite to increase electrical conductivity of fuel cells", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 6, No. 3, pp. 465-472, 2019.

کردند. آنها مشاهده کردند که نانوتیوب کربن در درصد وزنی 6٪ هدایت الکتریکی حدود 150 S/Cm دارد و استحکام خمشی آن نیز در حدود 30 MPa است، که هر دو طبق معیار DOE قابل قبول است [14].

بینگیان و همکاران با کمک رزین اپوکسی، نانو لوله کربنی، ولکان و پارچه کربنی صفحات دوقطبی کامپوزیتی طراحی کردند که میزان هدایت الکتریکی آن از استاندارد DOE کمتر و معادل 59 S/Cm بود. بیشینه میزان استحکام خمشی آن صفحات نیز 188.3 MPa بود که نسبت به استاندارد DOE قابل قبول است [15].

لی و همکاران با استفاده از گرافیت طبیعی، کربن سیاه و رزین اپوکسی صفحات دوقطبی کامپوزیتی ساختند که میزان استحکام مکانیکی آن به طور چشمگیری نسبت به معیار DOE بهتر بود [16].

ماهشوری و همکاران نیز با استفاده از گرافیت و کربن سیاه و الیاف کربن، صفحات دوقطبی کامپوزیتی طراحی کردند که استحکام مکانیکی خوبی نسبت به استاندارد DOE از خود نشان داد، اما از هدایت الکتریکی خوبی برخوردار نبود [17].

عبدالهی و همکاران از پودر گرافیت طبیعی به عنوان تقویت کننده هادی در ساخت نمونه استفاده کردند. گرافیت به تنهایی رسانای خوبی بود و هنگام ترکیب، قابلیت رسانایی بیشتری از خود نشان می داد. آنها از رزین فنولیک به عنوان زمینه برای آزمون مکانیکی نمونه ها استفاده کردند که نتایج قابل قبول طبق معیار DOE به دست داد [18].

هدف از این تحقیق، ارتقای هدایت الکتریکی و استحکام مکانیکی صفحات دوقطبی کامپوزیتی در پیل های سوختی پلیمری است. برای ساخت این صفحات از پودر گرافیت طبیعی به عنوان پرکننده هادی و گرافیت انبساط یافته که صفحات بزرگتری، جهت افزایش هدایت الکتریکی، دارد؛ استفاده شد. از رزین فنولیک به عنوان زمینه این صفحات استفاده شد تا خواص مکانیکی قابل قبولی داشته باشد. پس از ساخت صفحات دو قطبی پیل های سوختی از نوع کامپوزیت پایه پلیمری، نتایج حاصل با معیار استاندارد DOE مقایسه شد.

2- مواد و روش ها

2-1 مواد

پودر رزین فنولیک با کد تجاری IP502 تهیه شده از شرکت رزیتان به عنوان زمینه و پودر گرافیت از شرکت مرک⁴ با ابعاد کمتر از 50 μm به عنوان پرکننده در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفت. از پارچه کربنی شرکت پیشرو مبتکر برای افزایش استحکام خمشی و ضربه ای، استفاده شد. گرافیت انبساط یافته تهیه شده از شرکت آزمون دانا پلاستیک و همچنین اتانول 96% شرکت مرک به عنوان حلال استفاده شد. در جدول 1، مشخصات نمونه های ساخته شده و نحوه کدگذاری شان، نشان داده شده است.

2-2 طراحی صفحات دوقطبی

برای ساخت صفحات دوقطبی از رزین فنولیک به عنوان زمینه کامپوزیت و از الیاف خرد شده کربن به عنوان استحکام دهنده، از گرافیت انبساط یافته به عنوان عامل اصلی افزایش دهنده هدایت الکتریکی و از گرافیت به عنوان پرکننده استفاده شد. همچنین برای افزایش استحکام مکانیکی این صفحات، لایه ای از جنس پارچه کربن در بین این صفحات قرار داده شد [18].

این امر ناشی از افزایش چگالی جریان تبادل، نرخ واکنش های الکتروشیمیایی، هدایت یونی و کم شدن تاثیر شناوری بود [4].

چانهوی و همکاران بر روی تأثیر اندازه پرکننده گرافیت و آلومینات به همراه پلی وینیل فلئوراید بر روی خواص هدایت الکتریکی و مکانیکی صفحات دوقطبی کامپوزیتی تحقیق کردند. در نتیجه این تحقیق مشخص شد که هرچه اندازه پرکننده ها بزرگتر باشد، هدایت الکتریکی صفحات بالاتر می رود اما استحکام خمشی آنها پایین می آید [5].

کانگ و همکاران، کامپوزیتی گرافیتی به روش ریخته گری تحت پرس حرارتی ساختند که در هدایت الکتریکی آن به 80 S/Cm رسید که البته طبق معیار DOE به حداقل میزان استاندارد، یعنی به 100 S/Cm نرسید اما استحکام خمشی خوبی داشت و مقدار آن 55 MPa که از معیار DOE (25 MPa) بیشتر بود [6].

طاهریان سعی در افزایش خواص مکانیکی و الکتریکی به صورت هم زمان داشت. او صفحات کامپوزیتی با درصد وزنی های مختلفی ساخت و مورد بررسی قرار داد. او با استفاده از پارچه کربنی در ساخت صفحات، خواص مکانیکی آنها را بهبود داد که آن مقدار از معیار استاندارد DOE نیز بیشتر بود [7].

بورل و همکاران، صفحات دوقطبی از جنس گرافیت، الیاف کربن و رزین های اپوکسی و فنولیک را به روش سینترینگ¹ و توسط لیزر، که یک روش حرارتی شکل دهی است، ساختند. آنها توانستند استحکام خمشی را تا 50 MPa افزایش دهند اما هدایت الکتریکی صفحات کاهش پیدا کرد [8].

کانگ و همکاران با استفاده از رزین اپوکسی² و پری پرگ³ کربن، توانستند به روش پرس حرارتی، صفحات دوقطبی فوق سبکی با اندازه ذرات متفاوت و با حجم کم بسازند که نتایج آنها از نظر معیار DOE قابل قبول بود. هدایت الکتریکی آن صفحات 172 S/Cm بود که بالاتر از 100 S/Cm مربوط به مقدار استاندارد است [9]. هان و همکاران با استفاده از رزین فنولیک و پولکهای گرافیتی، کامپوزیتی ساختند که استحکام خمشی آن 50 MPa و هدایت الکتریکی آن 250 S/Cm بود که این میزان طبق معیار DOE قابل قبول است [10].

لی و همکاران به بررسی رفتار رزین فنولیک در صفحات دوقطبی پرداختند. آنها بعد از ساخت این صفحات به روش پرس حرارتی، خواص مکانیکی شان را مورد بررسی قرار دادند. استحکام ضربه آن صفحات 33.2 MPa و استحکام خمشی شان 64.9 MPa بود که طبق معیار DOE قابل قبول بود [11].

هاکات و همکاران به کمک گرافیت انبساط یافته، و رزین فنولیک یک کامپوزیت ساختند که استحکام خمشی آن از مقدار DOE کمتر بوده و نتایج قابل قبولی نداشت [2]. لی و همکاران بر روی رفتار نوعی کامپوزیت کربن اپوکسی مطالعه کردند. روش ساخت آن ها با استفاده از قالب و توسط پرس حرارتی بود. آنها توانستند طبق معیار DOE به هدایت الکتریکی مطلوب و آزمون های مکانیکی خوب و همین طور مقاومت دمایی بالا در حدود 160 C دست یابند [12].

صادقی و همکاران کامپوزیتی از گرافن، گرافیت، پلی پروپیلن و نانو کربن بلک استفاده کرد که توانست به هدایت الکتریکی 104 S/Cm و استحکام خمشی 28.44 MPa برسد که از نظر DOE قابل قبول است [13].

بایران و همکاران صفحات دوقطبی را با استفاده از پلی پروپیلن، گرافیت، کربن بلک و نانو تیوب کربن، با درصدهای وزنی مختلف و با استفاده از پرس حرارتی ساختند. آنها از نانو تیوب کربن با درصدهای 1 تا 10 درصد استفاده

³ Prepreg

⁴ Merck

¹ Sintering

² Epoxy

جدول 1 مشخصات نمونه‌های ساخته شده و نحوه کدگذاری‌شان

Table 1 Specifications of Samples and Their Coding Method

کد نمونه	کد کامپوزیت بر اساس درصد وزنی مواد	درصد وزنی رزین	درصد وزنی گرافیت	درصد وزنی انبساط یافته	درصد وزنی الیاف
S ₁	R22/EG3/G74/CF1	22	74	3	1
S ₂	R22/EG5/G72/CF1	22	72	5	1
S ₃	R22/EG10/G67/CF1	22	67	10	1
S ₄	R22/EG15/G62/CF1	22	62	15	1



Fig. 2 Charpie's Impact Test Device

شکل 2 دستگاه آزمون ضربه چارپی



Fig. 3 Four Probe Point Electrical Conductivity Test Device

شکل 3 دستگاه آزمون هدایت الکتریکی

3- نتایج و بحث

3-1- استحکام خمشی

آزمون خمش در هر درصد وزنی 4 بار تکرار و مقدار متوسط اعداد برای میزان استحکام خمشی گزارش شد. در شکل 4 میزان استحکام خمشی برای نمونه‌های S₁ تا S₄ نشان داده شده است. همان‌طور که مشهود است، نمونه S₁ در تنشی برابر با 26.4 MPa دچار شکستگی شده است. استحکام خمشی در این نمونه نیز به میزان 5.6 درصد از مقدار استاندارد DOE بالاتر است. وجود الیاف کربنی در این نمونه‌ها باعث افزایش مقاومت خمشی‌شان شده است.

2-3- ساخت نمونه‌ها

نمونه‌های آزمون طی سه مرحله زیر ساخته و مورد آزمایش قرار گرفتند: در مرحله اول، پس از مشخص شدن درصد گرافیت، گرافیت انبساط یافته، رزین فنولیک و الیاف کربن؛ این مواد به همراه اتانول، با استفاده از همزن مکانیکی به مدت 30 دقیقه مخلوط شدند. سپس خمیر حاصل، به مدت 15 دقیقه در آن در دمای 100 درجه سانتی‌گراد، قرار داده شد تا اتانول موجود در کامپوزیت تبخیر و پخت اولیه حاصل شود [18].

بعد از پخت اولیه خمیر به دست آمده، قالب‌گیری و برای پخت ثانویه در پرس حرارتی قرار داده شد. بعد از رسیدن دما به 100 درجه سانتی‌گراد در فشار 80 bar، به مدت 30 دقیقه این شرایط ثابت نگه‌داشته می‌شود. سپس فشار تا 140 bar و دما نیز تا 120 درجه سانتی‌گراد افزایش داده می‌شود. این شرایط به مدت 20 دقیقه ثابت نگه‌داشته می‌شود تا پخت نهایی حاصل شود [18]. در ساخت این نمونه‌ها مقدار 22 درصد وزنی رزین و 1 درصد وزنی الیاف کربن به صورت ثابت در نظر گرفته شد. میزان اتانول مصرفی در این نمونه 15 CC به ازای نمونه‌های 5gf است. در تمامی نمونه‌های ساخته شده درصد وزنی گرافیت و گرافیت انبساط یافته متغیر بوده و با افزایش درصد وزنی گرافیت انبساط یافته، درصد وزنی گرافیت کم می‌شود.

2-4- آزمون‌ها

آزمون خمش سه‌نقطه‌ای با استفاده از دستگاه زویک رئول¹ مدل 2100 مطابق با استاندارد ASTM D790_03 با سرعت فک 2 mm/min و با ابعاد 127×12.7×3.2 mm انجام شد. شکل 1 تصویر نمونه آزمون خمش را حین آزمایش نشان می‌دهد. آزمون ضربه از نوع چارپی در دمای اتاق و با استفاده از دستگاه سنتام² مدل SIT_20D مطابق با استاندارد ASTM D5045_99 و با ابعاد 55×10×5 mm انجام شد. دستگاه آزمون ضربه در شکل 2 نشان داده شده است. برای اندازه‌گیری میزان هدایت الکتریکی در راستای سطح نمونه‌ها، آزمون هدایت چهار نقطه‌ای با استفاده از دستگاه پراب چهار نقطه‌ای³ ساخت شرکت صنعت نما جوان انجام شد. در شکل 3 دستگاه آزمون هدایت الکتریکی مشاهده می‌شود.

برای بررسی سطح شکسته شده در نمونه‌های خمش، تصاویر SEM گرفته شد. این تصاویر توسط دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی ساخت شرکت VEGA3 TESCAN انجام شد.

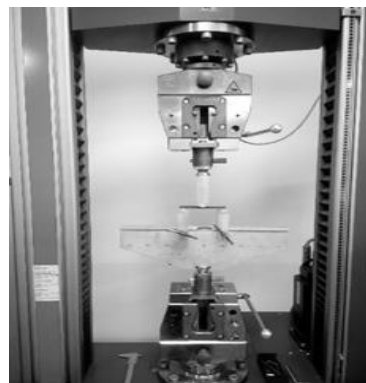


Fig. 1 Three-point bending test device.

شکل 1 دستگاه آزمون خمش سه‌نقطه‌ای

³ Four Point Probe¹ Zwick/Roell² Santam

3-2- استحکام ضربه

نتایج آزمون ضربه در شکل 6 آمده است. نتایج بیانگر آن است که با درصدهای وزنی رزین موجود در جدول 1 و وجود الیاف کربن، میزان انرژی جذب شده بالاتر از مقدار استاندارد DOE است. از آنجا که رزین استفاده شده بعد از حرارت دیدن ترموست می شود، پس مقابل ضربه مقاوم تر می شود. مقدار مقاومت نمونه در برابر ضربه وارده طبق گزارش استاندارد DOE باید بالاتر از 40.5 J/m^2 باشد که در این تحقیق به میزان 109.5 J/m^2 رسیده است که 170 درصد بالاتر از مقدار استاندارد DOE است.

در این آزمون نیز برای هر درصد وزنی 4 بار تکرار شد. مقدار استحکام ضربه در نمونه های S1، S2، S3 و S4، با درصد وزنی های ارائه شده در جدول 1، به ترتیب برابر با 109.6، 109.25، 107.5، 106.25، 107.5، 109.25، 107.5، 106.25 (J/m²) به دست آمد. شکل 6 نمودار جذب انرژی در نمونه های کامپوزیتی را پس از آزمون ضربه چارپی را نشان می دهد. مقادیر به دست آمده بیانگر آن است که صفحات آزمایش شده می توانند تحت بارگذاری بالاتری، تا پیش از تخریب شان قرار گیرند.

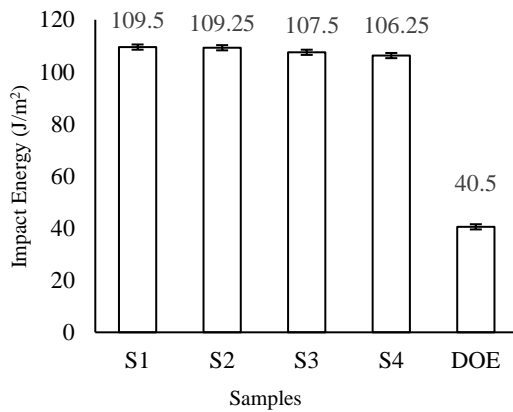


Fig.6 Impact Energy for Different Samples

شکل 6 استحکام ضربه برای نمونه های مختلف

3-3- آزمون رسانایی الکتریکی

در این آزمون نیز پس از ساخت نمونه ها با درصد وزنی های مشخص، نمونه ها هر کدام 4 بار مورد آزمایش قرار گرفتند. اندازه هدایت الکتریکی به میزان مواد موجود در کامپوزیت ها مانند گرافیت، گرافیت انبساط یافته، رزین، فیبر کربنی و همینطور روش ساخت بستگی دارد. در شکل 7، میزان هدایت الکتریکی نمونه های آزمون، در مقایسه با معیار استاندارد DOE ارائه شده اند. مطابق شکل 7، نمونه S4 بیشترین مقدار و S1 کمترین مقدار هدایت الکتریکی را دارا بوده اند. این میزان افزایش در بهترین حالت، برابر با 42.4 درصد است.

همان طور که مشخص است، با افزایش درصد گرافیت انبساط یافته، میزان هدایت الکتریکی افزایش می یابد. علت این امر آن است که، گرافیت انبساط یافته دارای صفحات بزرگتری نسبت به گرافیت است و همین امر سبب افزایش هدایت الکتریکی در کامپوزیت ساخته شده می شود [18]. زمانی که صفحات گرافیت انبساط یافته در کامپوزیت بزرگتر باشد، سرعت انتقال الکترون ها از صفحه ای به صفحه دیگر افزایش می یابد و این امر باعث می شود رسانایی الکتریکی افزایش یابد [18].

حداکثر استحکام خمشی در نمونه S2، یعنی بهترین حالت، برابر با 27.75 MPa بوده که از مقدار استاندارد DOE به میزان 11 درصد بالاتر است. قابل ذکر است که، در ساخت این نمونه ها نمی توان مقدار رزین را از 22٪ افزایش داد، زیرا این امر باعث افزایش مقاوم شدن نمونه برابر هدایت الکتریکی می شود.

استحکام خمشی در نمونه های S3 و S4 به ترتیب 25.25 MPa و 26.8 MPa به دست آمد که به ترتیب به مقدار 1 و 7.2 درصد بالاتر از مقدار استاندارد DOE است. در شکل 5 نمودار تنش-کرنش در آزمون خمش مشاهده می شود. همانطور که مشهود است به دلیل وجود الیاف و پارچه کربنی، گستره استحکام خمشی بیشتر شده و قطعه دیرتر به ناحیه پلاستیک میرسد. زمانی که نیروی خمشی به نمونه اعمال می شود، بخشی از انرژی توسط نمونه و بخش دیگر آن نیز توسط الیاف کربن و زمینه جذب می شود. پس از شکست نمونه، پدیده بیرون کشیدگی الیاف از زمینه اتفاق می افتد که باعث افت ناگهانی نمودار شده و آزمون به پایان می رسد.

با توجه به معیار DOE که استحکام خمشی در آن بالاتر از 25 MPa است، مشاهده می شود که در این تحقیق به این مهم دست یافته شد. البته برای افزایش هرچه بیشتر استحکام خمشی می توان میزان رزین را در ساختار نمونه ها افزایش داد، اما به دلیل اینکه این امر در میزان هدایت الکتریکی نمونه ها نتیجه معکوس دارد و منجر به کاهش آن می شود، از افزایش درصد وزنی بیش از حد رزین خودداری شد.

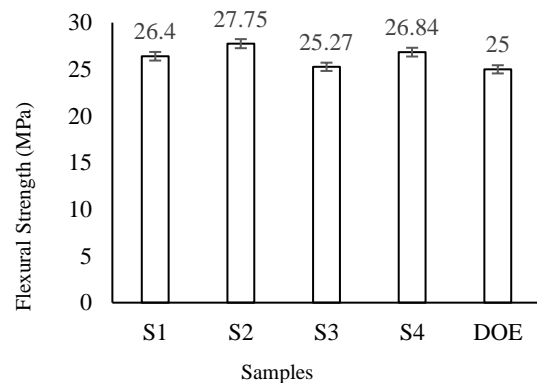


Fig. 4 Flexural Strength for Different Samples

شکل 4 استحکام خمشی برای نمونه های مختلف

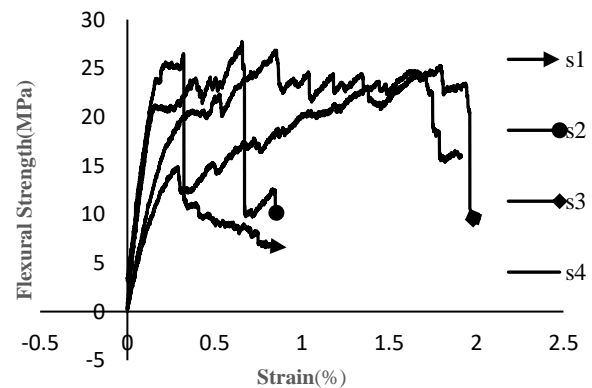


Fig. 5 Flexural Stress-Strain Diagram

شکل 5 نمودار تنش-کرنش استحکام خمشی

خمش می‌سازد [18]. در آزمون استحکام خمشی، ایجاد فشار، ابتدا باعث شکست زمینه و سپس باعث شکستگی الیاف و پارچه کربنی می‌شود و در نهایت باعث بیرون کشیده شدن الیاف از زمینه می‌شود (شکل 9).

در شکل 10 سطح مقطع شکسته شده نمونه S₃ مشاهده می‌شود. همانطور که مشاهده می‌شود، پارچه کربنی (b) در بین در فصل مشترک صفحات دوقطبی (a) قرار دارد. مشاهده می‌شود که الیاف پارچه کربنی بعد از اعمال فشار، از فصل مشترک صفحات دوقطبی بیرون زده است. این بدین معناست که الیاف پارچه کربنی با از دست دادن مقاومت خود، از داخل زمینه بیرون کشیده شده‌اند.

در شکل 11 سطح مقطع شکسته شده نمونه S₃ مشاهده می‌شود که الیاف کربنی از کامپوزیت به صورت ناهماهنگ بیرون زده شده، که این امر دارای مزایا و معایبی است. در صورت استفاده از الیاف کربن به صورت نامنظم، فرایند ساخت ماده پیچیده نشده و می‌توان آن را به صورت دستی و با استفاده از دستگاه‌های ارزانتر مخلوط کرد. البته از معایب این روش نیز می‌توان به عدم هدایت الکترون‌ها به طور منظم از یک نقطه به نقطه دیگر اشاره کرد. قابل ذکر است که، اگر بتوان الیاف کربن را به صورت جهت‌دار در کامپوزیت قرارداد، باعث افزایش هدایت الکتریکی و افزایش استحکام خمشی آن می‌شود [18].

در شکل 12 سطح مقطع نمونه S₄ مشاهده می‌شود که الیاف خرد شده کربن (a) داخل زمینه (c) صفحات دوقطبی قرار دارد و همین‌طور گرافیت انبساط یافته (b) مشاهده می‌شود که صفحات بزرگ‌تری نسبت به ذرات گرافیت دارد و به دلیل بزرگی صفحات گرافیت انبساط یافته، هدایت الکتریکی افزایش می‌یابد.

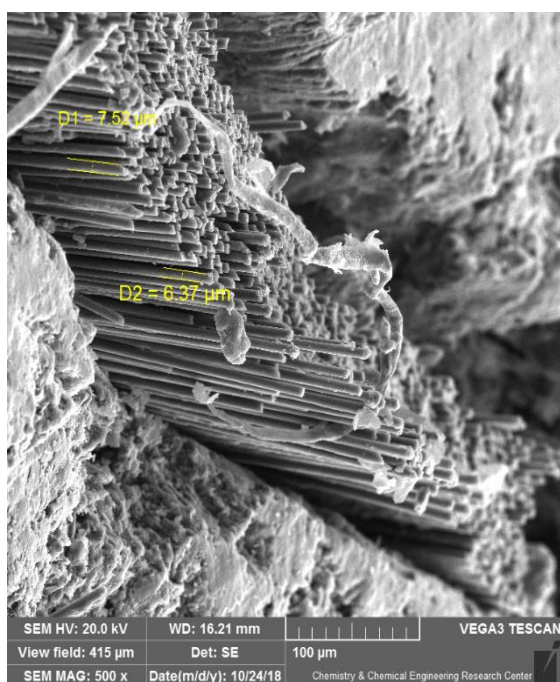


Fig.8 SEM image of broken cross-section of sample S₂ in bending test with a magnification of 500x

شکل 8 تصویر SEM از سطح مقطع شکسته شده نمونه S₂ در آزمون خمش با بزرگنمایی 500 برابر

از آنجایی که رزین فنولیک، در برابر رسانایی الکتریکی مقاومت دارد و زمینه اصلی نمونه‌های حاضر است، با اضافه کردن گرافیت انبساط یافته و الیاف کربن، انتقال الکترون‌ها سریع‌تر شده و هدایت الکتریکی افزایش می‌یابد. در ساخت این صفحات روش تولید کامپوزیت مهم است. به طوری که باید میزان حفره‌ها ایجاد شده در نمونه‌ها، که خود عامل مقاومت در برابر رسانایی الکتریکی است، کاهش یابد تا هدایت الکتریکی به بالاترین میزان خود برسد [18,11].

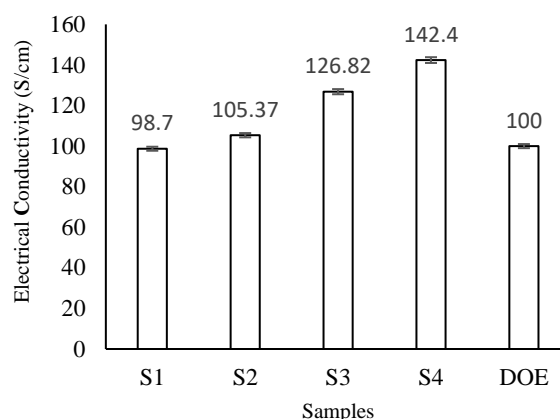


Fig.7 Electrical Conductivity for Different samples

شکل 7 هدایت الکتریکی برای نمونه‌های مختلف

4-3- مطالعات ریخت‌شناسی

در شکل 8 تصویر گرفته شده توسط میکروسکوپ الکترونی (SEM)¹ از نمونه S₂ پس از آزمون خمش مشاهده می‌شود که در آن در این تصویر الیاف پارچه کربن مشخص است. در اینجا گرافیت انبساط یافته موجب افزایش هدایت الکتریکی و الیاف کربن باعث ارتقای همزمان هدایت الکتریکی و مقاومت مکانیکی می‌شوند.

با افزایش گرافیت انبساط یافته هدایت الکتریکی بالا می‌رود، اما از طرفی، این افزایش، باعث افزایش هزینه و همچنین افزایش تخلخل می‌شود و نشت‌پذیری نیز افزایش می‌یابد [18]. بنابراین نمی‌توان بیش از حد از گرافیت انبساط یافته استفاده کرد. در این تصویر شکسته شدن پارچه کربنی مشاهده می‌شود. در اینجا مشخص است که یک لایه پارچه کربن بین صفحات دوقطبی قرار دارد. به دلیل اینکه پارچه کربن در بین صفحات دوقطبی قرار دارد، هیچ‌گونه پرکننده‌ای در لایه پارچه مشاهده نمی‌شود. البته، پارچه کربنی نیز بعد از شکسته شدن لایه‌های بالایی و پایینی صفحات دوقطبی، شکسته شده است. پارچه کربنی علاوه بر مقاومت در برابر بارگذاری خمشی و افزایش استحکام خمشی باعث بهبود یافتن میزان نشت‌پذیری ماده نیز می‌شود.

در شکل 9 تصویر SEM از سطح مقطع شکسته شده نمونه S₂ مشخص است که الیاف خرد شده کربن (a) با زمینه کامپوزیت (b) شامل رزین، گرافیت و گرافیت انبساط یافته به خوبی مخلوط شده‌اند. هرچقدر الیاف با زمینه بهتر اختلاط یابد استحکام خمشی افزایش می‌یابد. الیاف علاوه بر افزایش استحکام خمشی باعث بهینه‌تر شدن هدایت الکتریکی نیز می‌شود. در این تصویر مشاهده می‌شود که الیاف به خوبی در کامپوزیت با بقیه مواد مخلوط شده‌اند. زمانی که این الیاف به خوبی با زمینه مخلوط شود، باعث می‌شود که میزان استحکام

¹ Scanning Electron Microscope (SEM)

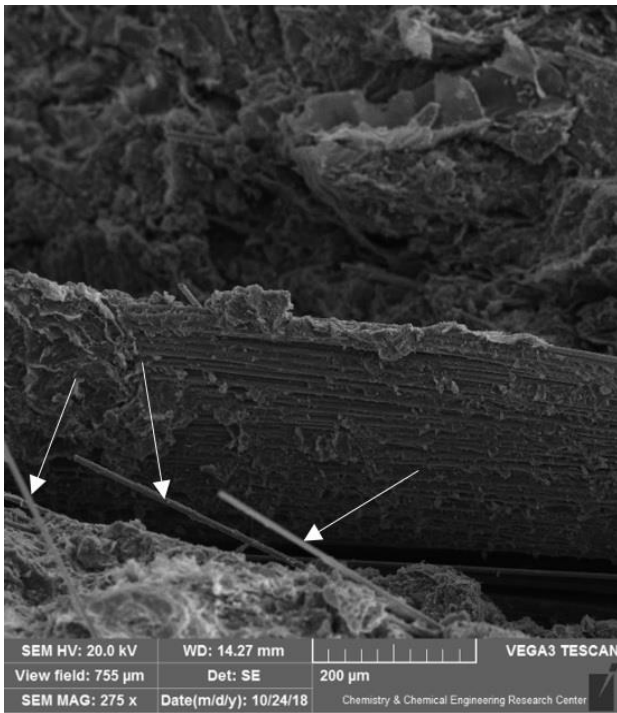


Fig.11 SEM image of broken cross-section of sample S_3 in bending test with a magnification of 275x

شکل 11 تصویر SEM از سطح مقطع شکسته شده نمونه S_3 در آزمون خمش با بزرگنمایی 275 برابر

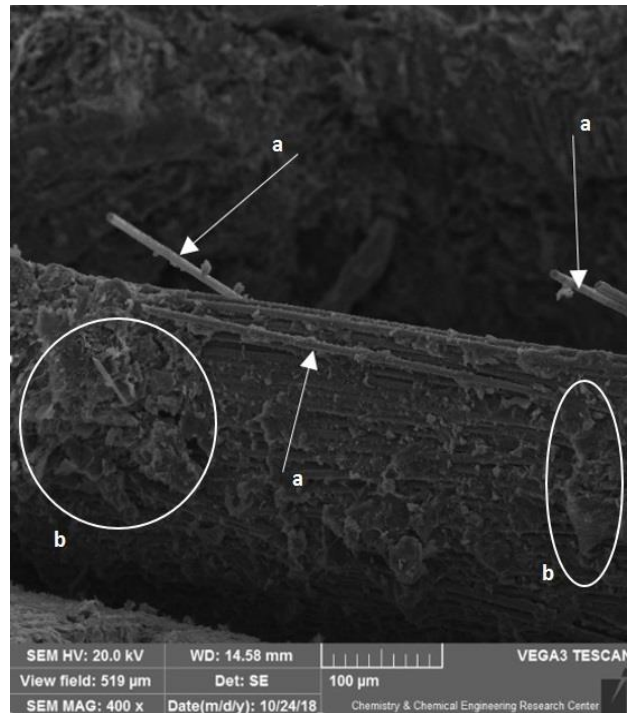


Fig.9 SEM image of broken cross-section of sample S_2 in bending test with a magnification of 400x (a) Crushed Carbon Fiber (b) Composite Field

شکل 9 تصویر SEM از سطح مقطع شکسته شده نمونه S_2 در آزمون خمش با بزرگنمایی 400 برابر (a) الیاف خرد شده کربن (b) زمینه کامپوزیت

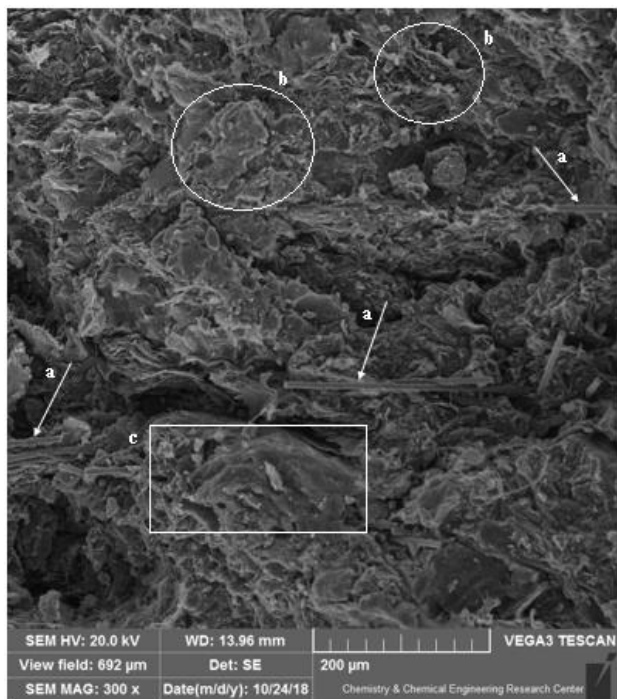


Fig.12 SEM image of broken cross-section of sample S_4 in bending test with a magnification of 300x (a) Crushed Carbon Fiber (b) Expanded Graphite (c) Composite Field

شکل 12 تصویر SEM از سطح مقطع شکسته شده نمونه S_4 در آزمون خمش با بزرگنمایی 300 برابر (a) الیاف خرد شده کربن (b) گرافیت انبساط یافته (c) زمینه کامپوزیت

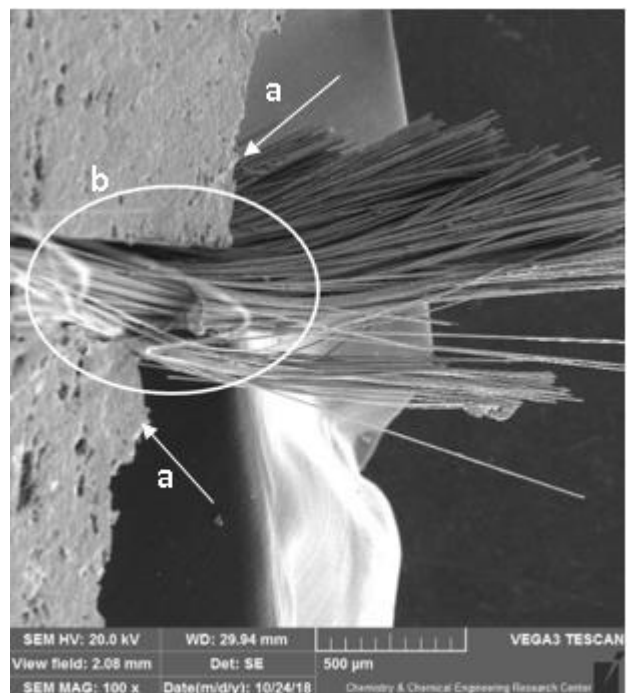


Fig.10 SEM image of broken cross-section of sample S_3 in bending test with a magnification of 400x (a) Bipolar Plate (b) Carbon Cloth

شکل 10 تصویر SEM از سطح مقطع شکسته شده نمونه S_3 در آزمون خمش با بزرگنمایی 100 برابر (a) صفحات دوقطبی (b) پارچه کربنی

4- نتیجه گیری

در این تحقیق صفحات دوقطبی پیل‌های سوختی، از جنس کامپوزیت زمینه پلیمری ساخته شد. برای ساخت این صفحات از رزین فنولیک به عنوان زمینه، از گرافیت انبساط یافته جهت افزایش هدایت الکتریکی، از گرافیت به عنوان پرکننده و از پارچه کربنی جهت افزایش دادن استحکام خمشی و بهینه کردن هدایت الکتریکی استفاده شد. در نهایت هدایت الکتریکی و خواص مکانیکی این صفحات بررسی شد و نتایج زیر به دست آمد:

- 1- میزان هدایت الکتریکی نمونه‌ها در بهترین حالت، نسبت به معیار استاندارد DOE به میزان بیش از 40 درصد افزایش یافت.
- 2- میزان استحکام خمشی نمونه‌ها در بهترین حالت، نسبت به معیار استاندارد DOE به میزان بیش از 11 درصد افزایش یافت.
- 3- میزان استحکام ضربه نمونه‌ها در بهترین حالت، نسبت به معیار استاندارد DOE به میزان بیش از 170 درصد افزایش یافت.
- 4- با توجه به این که میزان استحکام خمشی و ضربه‌ای نمونه‌های مطالعه شده در این تحقیق تقریباً با هم برابر اما میزان هدایت الکتریکی نمونه s4 از سایر نمونه‌ها، به مراتب بیشتر است، لذا می‌توان گفت که نمونه s4 در مجموع، بهترین نمونه آزمایش شده در این تحقیق می‌باشد.
- 5- استفاده از پارچه کربنی در بین دو لایه کامپوزیت باعث افزایش استحکام مکانیکی و بهبود هدایت الکتریکی شد.
- 6- وجود الیاف کربن باعث بهبود هدایت الکتریکی و خواص مکانیکی نمونه‌ها شد.

5- مراجع

- [9] Kang, K., et al., "Development of Ultralight and Thin Bipolar Plates Using Epoxy-Carbon Fiber Prepregs and Graphite Composites," *International Journal of Hydrogen Energy*, **42**(3): p. 1691-1697, 2017
- [10] Heo, S.I., et al., "Development of Preform Moulding Technique Using Expanded Graphite for Proton Exchange Membrane Fuel Cell Bipolar Plates," *Journal of Power Sources*, **171**(2): p. 396-403, 2007.
- [11] Lee, D. and D.G. Lee, "Carbon Composite Bipolar Plate for High-Temperature Proton Exchange Membrane Fuel Cells (HT-PEMFCs)," *Journal of Power Sources*, **327**: p. 119-126, 2016
- [12] Lee, D., et al., "Development of Non-Woven Carbon Felt Composite Bipolar Plates Using the Soft Layer Method," *Composite Structures*, **160**: p. 976-982, 2017
- [13] Adloo, A., et al., "High Performance Polymeric Bipolar Plate Based on Polypropylene/Graphite/Graphene/Nano-Carbon Black Composites for PEM Fuel Cells," *Renewable Energy*, **99**: p. 867-874, 2016
- [14] Bairan, A., et al., "Effect of Carbon Nanotubes Loading in Multifiller Polymer Composite as Bipolar Plate for PEM Fuel Cell," *Procedia Chemistry*, **19**: p. 91-97, 2016.
- [15] Jiang, B., et al., "Manufacturing and Characterization of Bipolar Fuel Cell Plate with Textile Reinforced Polymer Composites," *Materials & Design (1980-2015)*, **65**: p. 1011-1020, 2015.
- [16] Lim, J.W., M. Kim, and D.G. Lee, "Conductive Particles Embedded Carbon Composite Bipolar Plates for Proton Exchange Membrane Fuel Cells," *Composite Structures*, 2014. **108**: p. 757-766, 2014.
- [17] Maheshwari, P. H., Mathur R. B., Dhama T. L., "Fabrication of High Strength and a Low Weight Composite Bipolar Plate for Fuel Cell Applications," *Journal of Power Sources*, Vol. 173, No.1, pp. 394-403, 11/8/, 2007.
- [18] Abdolahi, E., "Experimental Analysis of Mechanical Behavior of the Composite Bipolar Plates in Proton Exchange Membrane Fuel Cell" In Persian, *journals of.tabriz*, No. 80, p149-458, 2017.
- [1] Hermann, A., T. Chaudhuri, and P. Spagnol, "Bipolar Plates for PEM Fuel Cells A Review," *International Journal of Hydrogen Energy*, **30**(12): p. 1297-1302, 2005.
- [2] Dhakate, S.R., et al., "Expanded Graphite-Based Electrically Conductive Composites as Bipolar Plate for PEM Fuel Cell," *International Journal of Hydrogen Energy*, **33**(23): p. 7146-7152, 2008.
- [3] Afshari, E, "Analysis of Function PEM Fuel Cell in Vehicle," In Persian, *Journal of Engine Research*, Vol. 5, No. 16, PP.3-15, 2008.
- [4] N. Mohammadtabar, M. Bakhshi-Jooybari, S.J. Hosseinipour, A.H. Gorji, "Study of Effective Parameters Inhydroforming of Fuel Cell Metallic Bipolar Plates with Parallelserpentine Flow Field," In Persian, *Journal of Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 8, pp. 1727, 2014
- [5] Chunhui, S., P. Mu, and Y. Runzhang, "The Effect of Particle Size Gradation of Conductive Fillers on the Conductivity and the Flexural Strength of Composite Bipolar Plate," *International Journal of Hydrogen Energy*, **33**(3): p. 1035-1039, 2008.
- [6] Kang, S.-J., et al., "Solvent-Assisted Graphite Loading for Highly Conductive Phenolic Resin Bipolar Plates for Proton Exchange Membrane Fuel Cells," *Journal of Power Sources*, **195**(12): p. 3794-3801, 2010
- [7] Taherian, R., "A Review of Composite and Metallic Bipolar Plates in Proton Exchange Membrane Fuel Cell: Materials, Fabrication, and Material Selection," *Journal of Power Sources*, **265**: p. 370-390, 2014
- [8] Bourell, D.L., et al., "Graphite-Based Indirect Laser Sintered Fuel Cell Bipolar Plates Containing Carbon Fiber Additions," *CIRP Annals*, **60**(1): p. 275-278, 2011

