

تحلیل تجربی رفتار مکانیکی صفحات دوقطبی کامپوزیتی در پیل‌های سوختی پلیمری

القار عبداللہی

فرامرزی آشنای قاسمی*

رسول عبدالله میرزایی

دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجائی، تهران، ایران

دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجائی، تهران، ایران

دانشیار، گروه شیمی، علوم پایه، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجائی، تهران، ایران

چکیده

صفحات دوقطبی یکی از اجزای اصلی پیل سوختی پلیمری است. در این مقاله رفتار مکانیکی صفحات دوقطبی کامپوزیتی بررسی و با معیار دپارتمان انرژی مقایسه شده است. تمام نمونه‌ها با روش ریخته‌گری تحت فشار و تحت پرس گرم تهیه شدند. برای ساخت صفحات دوقطبی کامپوزیتی از پودر رزین فنولیک به-عنوان زمینه کامپوزیت استفاده شد. به منظور افزایش استحکام خمشی و استحکام ضربه، از الیاف کربن و پارچه کربنی به‌عنوان تقویت‌کننده استفاده شد. با بکارگیری پودر گرافیت در ساختار کامپوزیت میزان رسانایی الکتریکی نمونه‌ها نیز بررسی شد. به منظور بررسی رفتار مکانیکی صفحات دوقطبی، نمونه‌ها با درصدهای وزنی مختلف رزین فنولیک تولید و مورد آزمایش قرار گرفت. استحکام خمشی نمونه با ۲۰٪ وزنی رزین، برابر ۲۳/۰۵ MPa اندازه‌گیری شد که ۷٪ از معیار Department of Energy (دپارتمان انرژی) کمتر است. با افزودن ۲٪ وزنی رزین، استحکام خمشی ۱۱٪ از معیار DOE بیشتر شد. در کامپوزیت با ۲۰٪ وزنی رزین استحکام ضربه‌ای نمونه‌ها به طور چشم‌گیری نسبت به معیار DOE افزایش یافت. برای افزایش رسانایی الکتریکی نمونه‌ها، پودر گرافیت فرآوری شد. ریخت‌شناسی نمونه‌ها با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) انجام شد. تصاویر SEM نشان می‌دهند که فرآوری پودر گرافیت باعث بزرگتر شدن صفحات مولکولی گرافیت شده و رسانایی الکتریکی سطحی نمونه‌ها را افزایش می‌دهد. در نهایت، نتایج نشان داد که افزایش درصد وزنی رزین، باعث افزایش استحکام خمشی و استحکام ضربه‌ای صفحات دوقطبی کامپوزیتی شده و میزان هدایت الکتریکی سطحی آنها را نسبت به معیار DOE کاهش می‌دهد. **واژه‌های کلیدی:** پیل سوختی، صفحات دوقطبی، کامپوزیت، رفتار مکانیکی.

Experimental Analysis of Mechanical Behavior of the Composite Bipolar Plates in Proton Exchange Membrane Fuel Cells

E. Abdollahi

F. Ashenai Ghasemi

R. Abdullah Mirzaie

Faculty of Mechanical Engineering, Shahid Rajaee Teacher Training University, Tehran, Iran

Faculty of Mechanical Engineering, Shahid Rajaee Teacher Training University, Tehran, Iran

Department of Chemistry, Faculty of Science, Shahid Rajaee Teacher Training University, Tehran, Iran

Abstract

The bipolar plate is one of the most important components in a PEM (Proton Exchange Membrane) fuel cell. In this paper the mechanical behavior of the composite bipolar plates are studied and compared with Department of Energy (DOE) criteria. All specimens were prepared by casting under pressure and under the hot press. Phenolic resin powder was used as matrix of composite in manufacturing of bipolar plates. To increase the flexural strength and impact strength, the carbon fibers and carbon fabrics were used as filler. electrical conductivity of the samples was analyzed by adding natural graphite powder in the composite. In for the mechanical behavior of bipolar plates, samples with different weights of phenolic resin were produced and tested. The morphology of samples was conducted using a Scanning Electron Microscope (SEM). Finally, the results showed that increasing the percentage of resin, increases the flexural strength and impact strength of composite bipolar plates however the electrically conductivity reduces compare with DOE criteria.

Keywords: Fuel cell, bipolar plate, composite, mechanical behavior.

۱- مقدمه

سلول به سلول کناری و تفکیک کردن گازهای واکنش‌دار را انجام می‌دهد [۲]. ۸۰٪ وزن یک توده پیل سوختی PEM و ۳۸٪ هزینه آن، به صفحه دوقطبی مربوط می‌شود [۳-۵].

برای افزایش کارایی پیل‌های سوختی، باید از اجزا مناسب و بهینه استفاده کرد. صفحات دوقطبی یکی از اصلی‌ترین اجزا پیل‌های سوختی هستند. طراحی و ساخت بهینه‌ی این صفحات، نقش مهمی در راندمان پیل‌های سوختی دارد. صفحات دوقطبی باید دارای خواص مکانیکی، رسانایی الکتریکی و خواص شیمیایی مناسبی باشند [۶]. بر اساس معیار DOE صفحات دوقطبی کامپوزیتی، باید برخی ویژگی‌ها مانند:

صفحات حامل گاز در پیل‌های سوختی، صفحات دوقطبی نام دارند. این صفحات با توجه به کارایی پیل‌های سوختی، از مواد متفاوتی طراحی و ساخته می‌شوند. عمده‌ترین مواد مورد استفاده در طراحی و ساخت صفحات دوقطبی؛ استیل، آلومینیوم، گرافیت و مواد مرکب است [۱]. صفحه دوقطبی، یک عضو چندکاره پیل‌های سوختی نوع PEM^۱ (پیل سوختی پلیمری) است. صفحه دوقطبی اتصال الکتریکی از یک

¹ Proton exchange membrane

* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: f.a.ghasemi@srttu.edu

تاریخ دریافت: ۹۴/۱۰/۱۶

تاریخ پذیرش: ۹۴/۱۱/۲۰

استحکام خمشی (بیشتر از ۲۵ MPa) [۲، ۷]، استحکام ضربه (بیشتر از ۴۰/۵ J/m) [۸]، رسانایی الکتریکی (بیشتر از ۱۰۰ S/cm) [۸]، را داشته باشند. مطالعات بسیار زیادی مربوط به صفحات دوقطبی کامپوزیتی وجود دارد، که البته بیشتر آن‌ها به ویژگی‌های کامپوزیت بر اساس معیار DOE دست نیافته‌اند.

تا کنون صفحات دوقطبی با مواد و آلیاژهای گوناگون طراحی و ساخته شده است [۹]. در مطالعات و پژوهش‌های اخیر، صفحات دوقطبی کامپوزیتی پلیمری به‌عنوان یکی از مناسب‌ترین صفحات حامل گاز در پیل‌های سوختی شناخته شده است [۱۰]. صفحات دوقطبی کامپوزیتی، معمولاً با ترکیب کردن مواد رسانا در یک زمینه پلیمری تولید می‌شوند. به طور کلی دو نوع رزین متفاوت در ساخت صفحات کامپوزیتی استفاده می‌شود که عبارتند از: رزین‌های ترموست و رزین‌های ترموپلاست. در بین رزین‌های ترموست؛ مانند رزین‌های فنولیک، اپوکسی، پلی‌استر و ... رزین فنولیک رایج‌ترین رزینی است که در ساخت صفحات دوقطبی کامپوزیتی پایه پلیمری استفاده می‌شود.

رزین‌های ترموست دارای لزجت پایینی هستند، از همین رو سهم بیشتری را در بین تقویت‌کننده‌های هادی به خود اختصاص می‌دهند [۲]. برای افزایش استحکام مکانیکی کامپوزیت، از تقویت‌کننده‌هایی مانند الیاف کربن و پارچه کربنی در ساختار کامپوزیت استفاده می‌شود. پودر گرافیت و مشتقات آن میزان رسانایی الکتریکی صفحات دوقطبی را تا حد زیادی افزایش می‌دهند [۱۱]. بهبود خواص مکانیکی صفحات دوقطبی کامپوزیتی یکی از اصلی‌ترین بخش‌های تحقیقات امروزی در ساخت پیل‌های سوختی است. ماهشوری [۱۲] و همکاران از گرافیت طبیعی و دوده کربن به‌عنوان پرکننده در ساخت صفحات دوقطبی کامپوزیتی زمینه پلیمری تقویت شده با الیاف کربن استفاده نمودند. اگرچه صفحات دوقطبی ساخته شده دارای رسانایی الکتریکی مناسبی نیستند، اما از استحکام مکانیکی قابل قبولی برخوردار هستند.

هاکات [۱۱] و همکاران یک کامپوزیت با استفاده از پلیمر و گرافیت فرآوری شده (EG^۱) ساختند، اما میزان استحکام خمشی آن کمتر از معیار DOE بود. کانگ [۱۳] و همکاران کامپوزیت P/G با روش ریخته‌گری تحت فشار داغ ساختند که رسانایی الکتریکی سطح آن ۸۰ S/cm که کمتر از معیار DOE و استحکام خمشی ۵۵ MPa بود که بیشتر از معیار DOE است (در این کامپوزیت P نمایانگر پلیمر (رزین) و G نمایانگر گرافیت است). در کار طاهریان [۱۴] تلاش شده است تا ویژگی‌های مکانیکی و الکتریکی کامپوزیت به طور همزمان ارتقا یابد. کامپوزیت‌هایی با تقویت‌کننده‌های متفاوت تولید شدند و ویژگی‌های آنها مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که کامپوزیت‌ها با یک تقویت‌کننده و دو تقویت‌کننده نمی‌توانند ویژگی‌های ضروری مورد نیاز در معیار DOE را محقق کنند. در نهایت نمونه کامپوزیتی تقویت شده با پارچه کربنی به‌عنوان صفحه دوقطبی کامپوزیتی انتخاب شد که شامل ویژگی‌هایی فراتر از معیار DOE است.

لی [۱۵] و همکاران با طراحی و ساخت صفحه دوقطبی از جنس کامپوزیت با الیاف کربن که با روش ریخته‌گری تحت فشار تولید شده است به استحکام خمشی در حدود ۱۹۵ MPa دست یافتند. هان

[۱۶] و همکاران با استفاده از پولک گرافیت و رزین فنولیک صفحات دوقطبی کامپوزیتی ساختند که رسانایی الکتریکی و استحکام خمشی بهینه شده به ترتیب برابر ۲۵۰ S/cm و ۵۰ MPa بود که همین مقادیر برای کارکرد پیل سوختی پلیمری رضایت بخش است. بینگیان [۱۷] و همکاران با استفاده از رزین و پارچه کربنی تقویت کننده، صفحات دوقطبی کامپوزیتی ساختند که استحکام خمشی این صفحات در محدوده ۱۸۸/۳-۱۶۶/۶ MPa است. همچنین میزان رسانایی الکتریکی نمونه‌های ساخته شده را با روش پراب چهار نقطه‌ای (FPP^۲) آزمایش کردند که در حدود ۵۹ S/cm بدست آمد که نسبت به معیار DOE مقدار کمتری است.

هدف از تحقیق حاضر، بررسی تجربی خواص مکانیکی (استحکام خمشی و استحکام ضربه‌ای) صفحات دوقطبی کامپوزیتی در پیل‌های سوختی پلیمری است. با توجه به گران بودن پرکننده‌های هادی مانند گرافن، کربن نانو تیوب و در دسترس نبودن پولک گرافیتی، از پودر گرافیت طبیعی به‌عنوان تقویت‌کننده هادی در ساخت نمونه‌ها استفاده شد. پودر گرافیت تقویت‌کننده‌ی مناسبی برای بهبود رسانایی الکتریکی نیست. برای بهبود میزان رسانایی الکتریکی نمونه‌ها، پودر گرافیت فرآوری شده و گرافیت با صفحات مولکولی بزرگتر تولید شد. از آنجایی که هدف اصلی این تحقیق بررسی خواص مکانیکی صفحات دوقطبی است، از پودر گرافیت صرفاً برای رسانا ساختن صفحات کامپوزیتی استفاده شد. در این تحقیق با استفاده از رزین فنولیک به‌عنوان زمینه، نمونه‌های کامپوزیتی برای آزمون‌های خمش، ضربه و رسانایی الکتریکی ساخته شد. با بررسی نتایج آزمون‌های تجربی و مقایسه‌ی نتایج با معیار DOE نمونه‌ی بهینه مشخص شد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- مواد

پودر رزین فنولیک با کد تجاری IP502 تهیه شده از شرکت رزیتان دارای دامنه‌ی ذوب ۸۰-۱۱۰ °C و چگالی ۰/۴ g/cm^۳ به عنوان زمینه (ماتریس) انتخاب شد. از پودر گرافیت تهیه شده از شرکت مرک^۳ با ابعاد کمتر از ۵۰ μm به‌عنوان پرکننده هادی استفاده شد. پارچه کربنی بافت پلین^۴ تهیه شده از شرکت پیشرو مبتکر، برای افزایش استحکام خمشی و استحکام ضربه‌ای و بهبود رسانایی الکتریکی به‌عنوان تقویت کننده در ساخت کامپوزیت استفاده شد. الیاف کربن خورده شده به طول ۳ mm با پیش‌زمینه‌ی الیاف اکریلیک تهیه شده از شرکت پیشرو مبتکر، به‌عنوان تقویت‌کننده کامپوزیت برای بهبود خواص مکانیکی کامپوزیت به صورت پاششی در ساخت کامپوزیت استفاده شد. همچنین از اتانول ۹۶ درصد، ساخت شرکت ارنیکو به عنوان حلال کامپوزیت استفاده شد. برای بهبود خاصیت رسانایی الکتریکی از پودر گرافیت فرآوری شده (EG) استفاده شد.

^۲ Four Point Probe

^۳ Merck

^۴ Plain carbon cloth

^۱ Expanded Graphite

۲-۲- طراحی کامپوزیت

کامپوزیت پایه پلیمری با پرکننده‌های گرافیتی و الیاف کربنی، برای نمونه‌های آزمایش طراحی شد. در کامپوزیت طراحی شده، رزین فنولیک به‌عنوان زمینه‌ی کامپوزیت در نظر گرفته شد. از گرافیت و EG به‌عنوان پرکننده و عامل اصلی رسانایی الکتریکی استفاده شد. با توجه به این‌که استحکام مکانیکی صفحات دوقطبی حائز اهمیت است، از پارچه کربنی بافت پلین برای افزایش استحکام مکانیکی در ساختار کامپوزیت استفاده شد. پارچه کربنی بافت پلین، پارچه‌هایی هستند که از درصد مشخصی الیاف کربن به‌عنوان تار و پود ساخته می‌شوند. در این پارچه‌ها الیاف تار و پود با هم برابر بوده و به صورت یکی زیر و یکی رو بافته می‌شود. همچنین از الیاف کربن، در زمینه کامپوزیت به صورت پاششی و با زوایای اتفاقی استفاده شده است. کامپوزیت طراحی شده از سه قسمت اصلی تشکیل شده است. لایه بالایی و پایینی که شامل رزین به‌عنوان زمینه، پودر گرافیت، EG و الیاف کربن به‌عنوان تقویت‌کننده و لایه میانی که پارچه کربنی تقویت‌کننده است. در شکل ۱ مدل کامپوزیت طراحی شده مشاهده می‌شود.

۲-۳- ساخت نمونه‌ها

تمامی نمونه‌ها در سه مرحله ساخته شدند. در مرحله اول با استفاده از روش اختلاط سرد و با سرعت پیچ‌های ۱۵۰ rpm در دمای محیط خمیر کامپوزیت تهیه شد [۱۶]. در مرحله دوم خمیر کامپوزیت در دمای ۹۰ °C در گرم‌کن معمولی قرار داده شد تا پخت اولیه انجام شود. در مرحله سوم جهت آزمون‌های مربوطه، با استفاده از قالب‌گیری فشاری در دو مرحله، در دو دما و فشار متفاوت تهیه شدند. برای ساخت نمونه‌های آزمایش، پودر رزین فنولیک، پودر گرافیت و گرافیت فرآوری شده (EG) به همراه اتانول، با استفاده از همزن مکانیکی مخلوط شد. زمان اختلاط اولیه برای تمامی نمونه‌ها ۳۰ min در نظر گرفته شد. سپس الیاف کربن به صورت تصادفی در محلول تهیه شده پاشیده شد و به مدت ۱۰ min با استفاده از همزن مکانیکی مخلوط شد. سپس خمیر کامپوزیت به مدت ۶۰ min در گرم‌کن معمولی در دمای ۹۰ °C قرار داده شد تا پخت اولیه صورت پذیرد. در این مرحله اتانول موجود در خمیر، تبخیر شده و ماده برای قالب‌گیری آماده می‌شود.

در مرحله بعد خمیر کامپوزیت قالب‌گیری شد. پس از قالب‌گیری، نمونه‌ها در دو مرحله پخت و آماده شدند. در مرحله اول قالب تا دمای ۱۰۰ °C داغ شد و در حین داغ شدن، فشار اندکی جهت تماس داشتن قالب و صفحات فشاری اعمال گردید. بعد از رسیدن دمای قالب به ۱۰۰ °C، فشار به آرامی تا ۶۰ bar افزایش یافته و به مدت ۳۰ دقیقه در این فشار نگه داشته شد. برای پخت نهایی، دمای قالب تا ۱۲۰ °C افزایش داده شد. سپس فشار پرس تا ۱۵۰ bar افزایش داده شد و به مدت ۳۰ دقیقه به قالب فشار ثابت اعمال شد. سپس قالب در دمای محیط قرار داده شد و بعد از رسیدن دمای قالب به دمای محیط، نمونه‌ها از قالب جدا شدند.

در کامپوزیت‌های ساخته شده، مقدار ۱۰ درصد وزنی EG و ۱ درصد وزنی الیاف کربن به صورت ثابت در نظر گرفته شد. در مرحله‌ی اول ساخت خمیر کامپوزیت، به‌ازای هر ۲۰ گرم ماده، CC ۵ اتانول به

ماده اضافه شد. به طور کلی ۵ نمونه با درصدهای وزنی متفاوت ساخته شد که در جدول ۱ ارائه شده است. در جدول ۱؛ P^۱ نمایانگر پلیمر (رزین فنولیک)، EG نمایانگر گرافیت فرآوری شده، G^۲ نمایانگر گرافیت، CF^۳ نمایانگر الیاف کربن و CC^۴ نمایانگر پارچه کربنی است. در تمام نمونه‌ها، درصد وزنی رزین متغیر بوده و به ازای افزایش درصد وزنی رزین، درصد وزنی پودر گرافیت کاهش پیدا کرد.

۲-۴- فرآوری پودر گرافیت (EG)

برای بهبود رسانایی الکتریکی صفحات دوقطبی، از مواد با رسانایی الکتریکی بالا استفاده می‌شود. EG از جمله مواد پرکاربرد در ساخت صفحات کامپوزیتی دوقطبی است که به دلیل داشتن صفحات مولکولی بزرگتر، باعث بهبود خاصیت رسانایی الکتریکی صفحات می‌شود.

برای تولید EG ابتدا مقدار مشخصی پودر گرافیت، به مدت ۱۰ ساعت در گرم‌کن خلاء در دمای ۷۰ °C قرار داده شد. مخلوطی از اسید سولفوریک غلیظ و اسید نیتریک غلیظ به نسبت ۳:۱ تهیه شد و پودر گرافیت خشک شده در آن حل گردید. برای این‌که ترکیب اسیدی به وجود آمده به طور کامل در ساختار مولکولی پودر گرافیت نفوذ کند، محلول آماده شده، به مدت ۱۲ ساعت توسط دستگاه همزن مغناطیسی مخلوط شد. پس از این‌که محلول تهیه شده به طور کامل مخلوط شد، با استفاده از آب دوبار تقطیر، مورد شست‌وشو قرار گرفت. شستن محلول تا زمانی که pH آب حاصل از شستن محلول به ۷ برسد، ادامه پیدا کرد. سپس پودر گرافیت شسته شده، به مدت ۵ ساعت در گرم‌کن خلاء در دمای ۶۰ °C قرار گرفت تا کاملاً خشک شود. در نهایت پودر گرافیت خشک شده، به مدت ۲۰ ثانیه در دمای ۸۵۰ °C در کوره قرار داده شد تا EG (گرافیت فرآوری شده) به‌دست آید [۱۱].

همان‌طور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، صفحات و لایه‌های گرافیت در ابعاد کوچکی در کنار هم قرار گرفته‌اند که باعث کاهش رسانایی الکتریکی می‌شود. در صورتی که فرآوری پودر گرافیت و تولید EG باعث بزرگتر شدن صفحات گرافیت شده که در انتقال الکترون تاثیر بسزایی دارد و باعث افزایش رسانایی الکتریکی ماده می‌شود. شکل ۳ بزرگتر شدن صفحات EG نسبت به پودر گرافیت طبیعی را نشان می‌دهد.

۲-۵- آزمون‌ها

آزمون خمش سه نقطه‌ای با استفاده از دستگاه زویک روئل^۱ مدل z100 مطابق با استاندارد ASTM D790 - 03 با سرعت فک ۲ mm/min و با ابعاد ۱۲۷ x ۱۲/۷ x ۳/۲ mm انجام شد. شکل ۴ تصویر نمونه آزمون خمش را در حین آزمایش نشان می‌دهد. آزمون ضربه از نوع چارپی در دمای اتاق و با استفاده از دستگاه سانتام^۶ مدل SIT-20D مطابق با استاندارد ASTM D5045-99 و با ابعاد ۵۵ x ۱۰ x ۵ mm انجام شد. دستگاه آزمون ضربه در شکل ۵ نشان داده

¹ Polymer

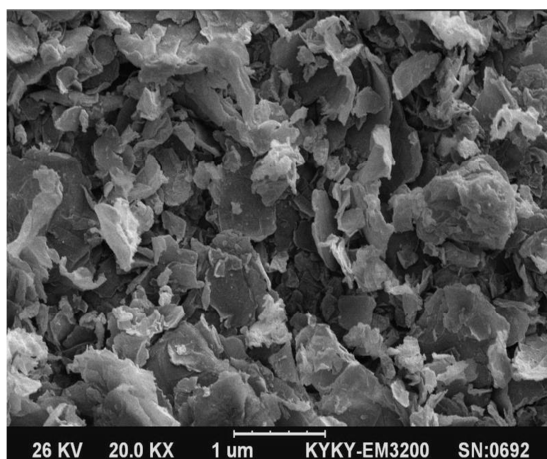
² Graphite

³ Carbon fiber

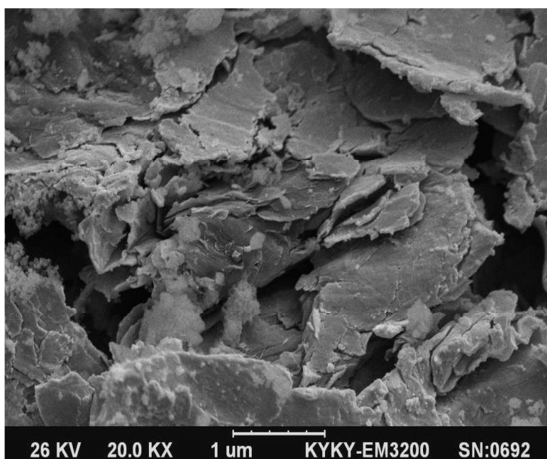
⁴ Carbon clothing

⁵ Zwick/Roell

⁶ Santam



شکل ۲- تصویر SEM از پودر گرافیت Merck با بزرگ نمایی ۲۰۰۰ برابر



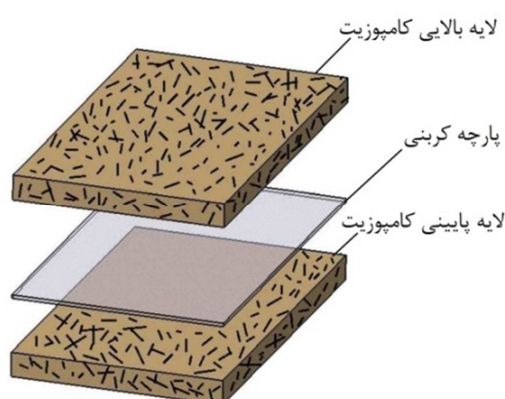
شکل ۳- تصویر SEM از پودر گرافیت فراوری شده (EG) با بزرگ نمایی ۲۰۰۰ برابر

۳- نتایج و بحث

۳-۱- خواص خمشی

آزمون خمش برای هر یک از درصدهای وزنی، ۴ بار تکرار شد و میانگین ۴ عدد بدست آمده به عنوان میزان استحکام خمشی کامپوزیت ارائه شد. در جدول ۲ نتایج بدست آمده از آزمایشهای خمش سه نقطه‌ای برای تمام نمونه‌های کامپوزیتی مشاهده می‌شود.

شده است. برای بررسی سطح شکست نمونه‌های خمش و بررسی نتایج حاصل از تولید EG، به ترتیب از سطح شکست نمونه‌ها و پودر گرافیت فراوری شده، عکس‌برداری SEM انجام شد. تصاویر SEM توسط دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی ساخت شرکت KYKY مدل EM3200 انجام شد. سپس آزمایش‌ها با ولتاژ کار ۲۶ kV انجام شد. برای اندازه‌گیری میزان هدایت الکتریکی در راستای سطح نمونه‌ها آزمون هدایت چهار نقطه‌ای با استفاده از دستگاه پراب چهار نقطه‌ای ساخت شرکت صنعت‌ماجوان انجام شد. شکل ۶ تصویر دستگاه آزمون هدایت الکتریکی را نشان می‌دهد. نمونه‌های آزمون رسانایی الکتریکی به شکل قرص دایره، به قطر ۲۵mm و ضخامت ۵mm بود. آزمایش‌های خمش سه نقطه‌ای، ضربه‌ی چارپی و رسانایی الکتریکی برای هر یک از نمونه‌ها چهار بار تکرار شد.



شکل ۱- طرحواره کامپوزیت طراحی شده

جدول ۱- ترکیب کدبندی نمونه‌ها

کد نمونه	کد کامپوزیت بر اساس درصد وزنی مواد	درصد وزنی رزین	درصد وزنی گرافیت	درصد وزنی EG	درصد وزنی الیاف
S ₁	P20/EG10/G69/CF1/CC	۲۰	۶۹	۱۰	۱
S ₂	P22/EG10/G67/CF1/CC	۲۲	۶۷	۱۰	۱
S ₃	P24/EG10/G65/CF1/CC	۲۴	۶۵	۱۰	۱
S ₄	P26/EG10/G63/CF1/CC	۲۶	۶۳	۱۰	۱
S ₅	P30/EG10/G59/CF1/CC	۳۰	۵۹	۱۰	۱
S ₆	P20/G79/CF/CC	۲۰	۷۹	۰	۱

برای تمام نمونه‌های آزمایش بررسی شد. شکل ۷ نمودار تنش - کرنش برای نمونه‌های S_1 , S_2 , S_3 , S_4 و S_5 را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، نمونه S_1 در نقطه‌ای $23/06 \text{ MPa}$ دچار شکست شده است. وجود الیاف کربن و پارچه تقویت کننده کربنی در کامپوزیت، تا حد زیادی باعث افزایش استحکام خمشی می‌شود. استحکام خمشی نمونه S_1 ، 7% از معیار DOE کمتر است. این درحالی است که 20% وزنی رزین در نمونه S_1 استفاده شده است. با افزایش درصد وزنی رزین در کامپوزیت انتظار می‌رود که استحکام خمشی افزایش یابد. حداکثر استحکام نهایی قابل تحمل توسط نمونه S_2 ، $27/75 \text{ MPa}$ است که 11% از معیار DOE بیشتر است.

به وضوح قابل مشاهده است که با افزایش درصد وزنی رزین میزان استحکام خمشی نمونه افزایش پیدا کرده است. شکل ۸ نمونه کامپوزیتی را پس از آزمون خمش نشان می‌دهد. از جمله مزایای کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف کربن، جذب انرژی توسط الیاف کربن، در اثر بارگذاری‌های مختلف است. به همین دلیل با بکارگیری 1% وزنی الیاف کربن به‌عنوان تقویت کننده در نمونه‌ها، استحکام خمشی نسبت به معیار DOE افزایش یافت. حداکثر تنش نهایی نمونه S_3 ، $30/38 \text{ MPa}$ است. همان‌طور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، وجود الیاف کربن از شکست ناگهانی نمونه جلوگیری کرده و دامنه تحمل بار خمشی نمونه را تا حد قابل توجهی افزایش داده است. حداکثر استحکام نهایی نمونه S_4 ، $32/38 \text{ MPa}$ و برای نمونه S_5 ، $39/44 \text{ MPa}$ است. شکل ۷ نشان می‌دهد که رفتار ناحیه پلاستیک برای نمونه‌های کامپوزیتی متفاوت است. به‌ازای افزایش درصد وزنی رزین در نمونه‌ها، میزان استحکام نهایی ماده افزایش پیدا کرده است. از طرفی با افزایش درصد وزنی رزین در کامپوزیت‌ها، میزان استحکام تسلیم ماده کاهش پیدا کرده است.

همان‌طور که در نمودارهای شکل ۷ مشاهده می‌شود، رفتار مکانیکی نمونه‌ها در آزمون خمش به گونه‌ای است که نمودار تنش - کرنش دارای اعوجاج است. این اعوجاج ناشی از وجود الیاف کربن و پارچه کربنی در ساختار کامپوزیت است. زمانی که بار خمشی به نمونه کامپوزیتی اعمال می‌شود، بخش اولیه انرژی اعمال شده به کامپوزیت، توسط زمینه‌ی کامپوزیت جذب می‌شود. سپس سطح مشترک الیاف و زمینه میزان انرژی قابل توجهی را جذب می‌کنند و پس از آن پدیده بیرون کشیده شدن الیاف کربن از زمینه رخ داده و باعث جذب مقدار زیادی انرژی می‌شود. در نهایت با شکسته شدن پارچه کربنی میانی، کامپوزیت، دچار شکست نهایی شده و واماندگی رخ می‌دهد. از آنجایی که انرژی اعمال شده به کامپوزیت در اثر اعمال بار خمشی، به صورت یکجا جذب نشده و به صورت پیوسته توسط اجزا مختلف کامپوزیت جذب می‌شود، نمودارهای تنش - کرنش حاصل از آزمون خمش دارای اعوجاج است.

همچنین به دلیل پراکندگی ناهمگون الیاف کربن در کامپوزیت، واماندگی‌های اندکی به صورت مقطعی در نمودارها مشاهده می‌شود که در نهایت پس از اعمال بار نهایی، کامپوزیت در نقطه‌ی تنش نهایی دچار شکست شده و به صورت کامل وامانده می‌شود. معیار DOE برای سنجش استحکام خمشی صفحات دوقطبی کامپوزیتی، تنش نهایی است. به همین دلیل در بررسی نتایج حاصل از آزمون‌های خمش، تنش نهایی به‌عنوان استحکام خمشی کامپوزیت‌ها بررسی شد.



شکل ۴- دستگاه آزمون خمش سه نقطه‌ای



شکل ۵- دستگاه آزمون ضربه چارپی



شکل ۶- دستگاه آزمون رسانایی الکتریکی

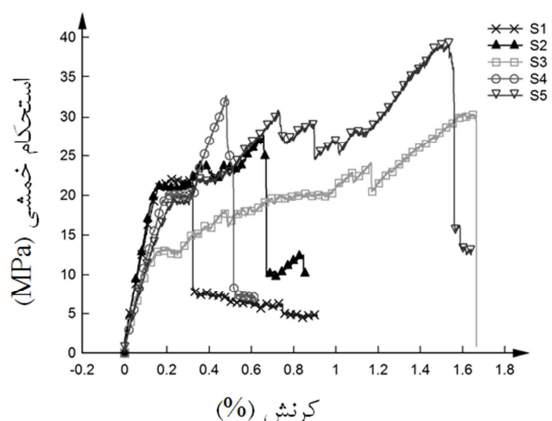
با توجه به اینکه حداکثر تنش نهایی به‌عنوان معیار DOE (دپارتمان انرژی) برای استحکام خمشی می‌باشد، نمودار تنش - کرنش

با توجه به معیار DOE، میزان استحکام خمشی کامپوزیت ها برای صفحات دوقطبی باید بیشتر از ۲۵ MPa باشد [۲، ۷]. از آنجایی که در تحقیق حاضر از پودر گرافیت طبیعی (معمولی) به عنوان پرکننده استفاده شد و گرافیت فرآوری شده (EG) نیز محصولی از پودر گرافیت طبیعی است، امکان افزایش درصد رزین وجود نداشت زیرا باعث کاهش رسانایی الکتریکی صفحات دوقطبی می شود. از همین رو بیشترین درصد وزنی رزین که در ساخت نمونه ها استفاده شد، ۳۰٪ وزنی بود که در این حالت رسانایی الکتریکی به شدت کاهش یافت. در صورتی که در تحقیقات امروزی حداقل ۴۵٪ وزنی رزین در کامپوزیت ها استفاده می شود که عامل اصلی افزایش استحکام خمشی کامپوزیت است. همچنین در تحقیقات گذشته، استفاده از نانو ذرات گرافن و کربن نانو تیوب به عنوان پرکننده باعث بهبود رسانایی الکتریکی شده است، اما هزینه نهایی صفحات دوقطبی افزایش می یابد و مقرون به صرفه نیست.

بررسی نتایج آزمون های خمشی، مشاهده شد که به ازای افزایش درصد وزنی رزین، استحکام نهایی ماده افزایش می یابد، اما رسانایی الکتریکی کامپوزیت کاهش پیدا می کند. در نمونه S₁ با ۲۰٪ وزنی رزین استحکام خمشی تنها ۷٪ از معیار DOE (دپارتمان انرژی) کمتر است و میزان رسانایی الکتریکی آن ۴۰ S/cm است که رضایت بخش نیست. با افزودن تنها ۲٪ وزنی رزین، استحکام نهایی نمونه به ۲۷/۷۵ MPa رسید که ۱۱٪ از معیار DOE بیشتر می باشد و رسانایی الکتریکی این نمونه ۳۰/۸۲ S/cm است که ۲۳٪ نسبت به نمونه S₁ کاهش پیدا کرده است. شکل ۹ نمودار مقایسه استحکام خمشی نمونه های آزمایش با DOE را نشان می دهد. برای کاهش هزینه تولید و تجاری سازی صفحات دوقطبی از مواد اولیه ارزان قیمت و در دسترس برای ساخت کامپوزیت استفاده شد و نتایج استحکام خمشی رضایت بخش بود. در صورتی که امکان تهیه پرکننده های رسانا با قیمت مناسب تر باشد، می توان صفحات دوقطبی با رسانایی الکتریکی مطلوب تولید کرد.

جدول ۲- استحکام نهایی نمونه های مختلف، بر اساس نتایج آزمون های خمشی سه نقطه ای

نام نمونه	واحد	نمونه ۱	نمونه ۲	نمونه ۳	نمونه ۴	میانگین
S ₁	MPa	۲۳/۳۱	۲۴/۰۴	۲۲/۱۱	۲۲/۸	۲۳/۰۶۵
S ₂	MPa	۲۸/۸۰	۲۶/۴۵	۲۷/۸۲	۲۸	۲۷/۷۶
S ₃	MPa	۲۹/۱۴	۳۱/۲۱	۳۰/۱۳	۳۱/۰۷	۳۰/۳۸
S ₄	MPa	۳۱/۸۴	۳۳/۱۶	۳۲/۴۹	۳۲/۰۳	۳۲/۳۸
S ₅	MPa	۳۹/۳۸	۳۸/۱۵	۳۹/۱۷	۴۱/۰۶	۳۹/۴۴



شکل ۷- نمودار تنش - کرنش نمونه ها

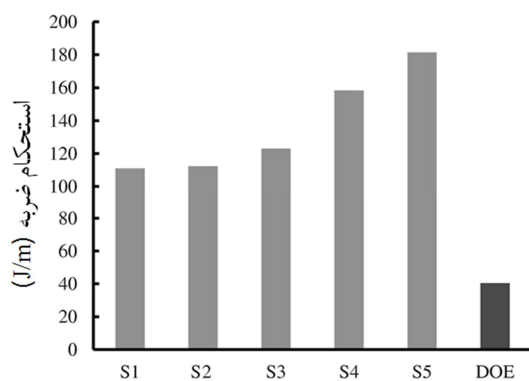


شکل ۸- نمونه آزمون خمشی پس از آزمایش خمشی سه نقطه ای

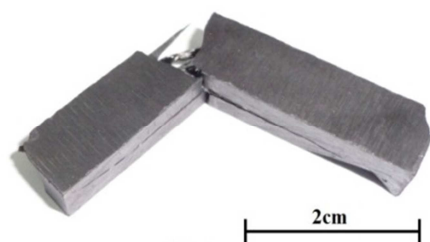
۳-۲- استحکام ضربه

نتایج حاصل از آزمون های ضربه بر روی نمونه های کامپوزیتی در جدول ۳ ارائه شده است. این نتایج حاکی از آن است که به ازای افزایش درصد وزنی رزین، میزان جذب انرژی ضربه در کامپوزیت افزایش می یابد. رزین فنولیک پس از پخت، ترموست می شود و به طور ذاتی در مقابل ضربه بسیار مقاوم است. همچنین بدلیل وجود الیاف کربن و پارچه کربنی در کامپوزیت، میزان جذب انرژی ضربه رضایت بخش است. به طوری که از میزان تعیین شده توسط DOE به مراتب بیشتر است. استحکام ضربه در نمونه S₁ با ۲۰٪ وزنی رزین و برابر ۱۱۱ J/m است که به طور چشم گیری از معیار DOE که ۴۰/۵ J/m می باشد، بیشتر است. همان طور که در شکل ۱۰ مشاهده می شود، نتایج حاصل از آزمون ضربه با معیار DOE مقایسه شده است.

زمانی که چسبندگی تقویت کننده و ماتریس ضعیف است ترک به راحتی در ناحیه ضعیف بین فازی رشد خواهد کرد. به همین دلیل تا ۳۰٪ وزنی رزین در ساخت نمونه ها استفاده شد و نتایج مطلوب بود. ذرات رزین فنول با حل شدن در اتانول چسبندگی قابل توجهی را



شکل ۱۰- استحکام ضربه‌ی نمونه‌های آزمایش و معیار DOE



شکل ۱۱- نمونه آزمون ضربه، پس از آزمون ضربه‌ی چارپی

جدول ۳- نتایج حاصل از آزمون‌های ضربه چارپی بر روی نمونه‌های مختلف

نام نمونه	واحد	نمونه ۱	نمونه ۲	نمونه ۳	نمونه ۴	میانگین
S ₁	J/m	۱۰۹	۱۱۳	۱۱۲	۱۱۰	۱۱۱
S ₂	J/m	۱۱۲	۱۱۳	۱۱۳	۱۱۱	۱۱۲/۲۵
S ₃	J/m	۱۱۹	۱۲۳	۱۲۶	۱۲۴	۱۲۳
S ₄	J/m	۱۵۶	۱۶۱	۱۵۴	۱۶۲	۱۵۸/۲۵
S ₅	J/m	۱۷۵	۱۸۴	۱۷۸	۱۸۹	۱۸۱/۵

جدول ۴- نتایج حاصل از آزمون‌های رسانایی الکتریکی بر روی نمونه‌های مختلف

نام نمونه	واحد	نمونه ۱	نمونه ۲	نمونه ۳	نمونه ۴	میانگین
S ₁	S/cm	۴۰	۴۱/۸۳	۴۱	۴۰/۵	۴۰/۸۳۲
S ₂	S/cm	۳۰	۳۱/۲۸	۳۰/۳۳	۳۱/۷	۳۰/۸۲۷
S ₃	S/cm	۲۶	۲۵/۲	۲۶/۳	۲۶/۱	۲۵/۹
S ₄	S/cm	۱۶/۴	۱۷	۱۶/۸۵	۱۷/۱۳	۱۶/۸۴۵
S ₅	S/cm	۱۰/۱۷	۱۱/۲	۱۰/۴۲	۱۰/۵۸	۱۰/۵۹

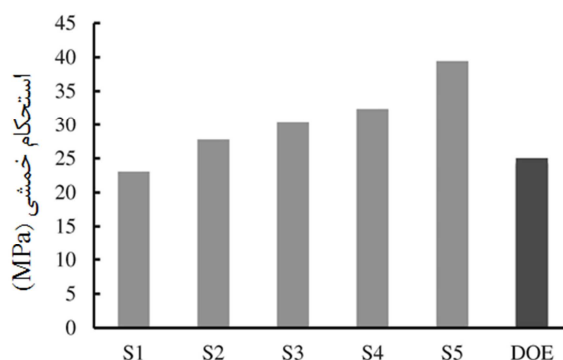
رزین فنولیک در مقابل رسانایی الکتریکی مقاوم است، اما وجود الیاف کربن باعث تقویت رسانایی الکتریکی می‌شود. رزین فنولیک با احاطه کردن الیاف کربن، میزان رسانایی الکتریکی را کاهش می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۱۴ مشاهده می‌شود، رزین فنولیک الیاف کربن را احاطه کرده است. از طرفی وجود الیاف کربن در زمینه باعث ایجاد حفره‌هایی در کامپوزیت می‌شود که این حفره‌ها باعث افت رسانایی الکتریکی کامپوزیت می‌شود.

ایجاد می‌کند و به‌عنوان عامل موثر در تقویت سطح مشترک زمینه و تقویت کننده در کامپوزیت بکار رفت. با توجه به نتایج آزمون ضربه و آزمون استحکام خمشی، برای ساخت صفحات دوقطبی رزین فنولیک به‌عنوان زمینه از لحاظ استحکام مکانیکی مناسب است. شکل ۱۱ نمونه کامپوزیتی پس از آزمون ضربه چارپی را نشان می‌دهد.

۳-۳- آزمون رسانایی الکتریکی

همان‌طور که در جدول ۴ مشاهده می‌شود، آزمون رسانایی الکتریکی چهار نقطه‌ای، برای هر نمونه چهار بار تکرار شد. میزان رسانایی الکتریکی در صفحات دوقطبی به مواد پرکننده، عمل‌آوری و ساخت کامپوزیت وابسته است. مطابق با جدول ۴، میزان رسانایی الکتریکی سطحی نمونه S₁ ۴۰/۸۳ S/cm بدست آمد که ۴۰٪ معیار DOE (دپارتمان انرژی) بوده و رضایت‌بخش نیست.

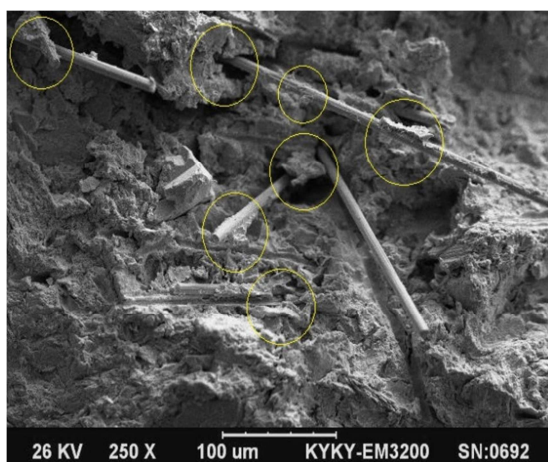
شکل ۱۲ مقایسه‌ی نتایج حاصل از آزمون رسانایی الکتریکی نمونه‌ها با معیار DOE را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود، با افزایش درصد وزنی رزین و کاهش درصد وزنی پودر گرافیت، میزان رسانایی الکتریکی کاهش یافته است. به طوری که با ۳۰٪ وزنی رزین میزان رسانایی الکتریکی نمونه S/cm ۱۰/۵۹ است. گرافیت عامل خوبی برای رسانایی الکتریکی است، اما باید دارای صفحات هدایت بزرگتری باشد. همان‌طور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود پودر گرافیت طبیعی دارای صفحات هدایت کوچکتری هستند. کوچک بودن صفحات مولکولی گرافیت، سرعت انتقال الکترون از یک نقطه به نقطه دیگر را کاهش می‌دهد و باعث رسانایی الکتریکی ضعیف در ماده می‌شود. برای بهبود رسانایی الکتریکی گرافیت، پودر گرافیت فرآوری شد. با بکارگیری ۱۰٪ وزنی EG در تمام نمونه‌ها، میزان رسانایی الکتریکی به طور چشم‌گیری بهینه شد. میزان رسانایی الکتریکی نمونه کامپوزیتی S₆ (بدون استفاده از EG) با ۲۰٪ وزنی رزین و ۷۹٪ وزنی گرافیت با نمونه S₁ در شکل ۱۳ مقایسه شده است. مشاهده می‌شود که فرآوری EG و بکارگیری ۱۰٪ وزنی در کامپوزیت، به طور چشم‌گیری میزان رسانایی الکتریکی را بهبود بخشیده است.



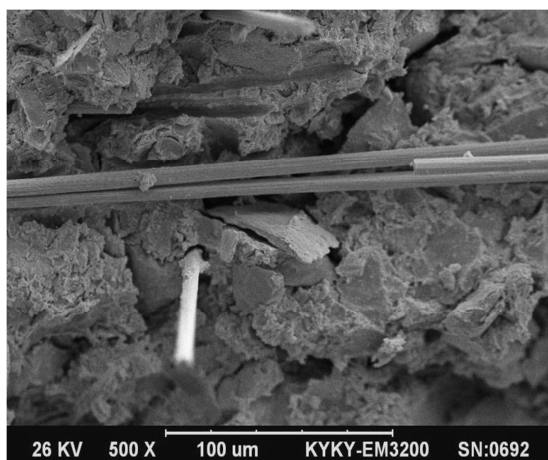
شکل ۹- استحکام خمشی نمونه‌های آزمایش و معیار DOE

غلبه کرده و باعث جدایش الیاف از زمینه می‌شود. با افزایش بار اعمال شده، الیاف از زمینه جدا شده و در نهایت کامپوزیت دچار شکست نهایی می‌شود.

شکل ۱۶ سطح شکست نمونه S₃ با ۲۴٪ وزنی رزین را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش درصد وزنی رزین، میزان حفره‌ها در سطح شکست نسبت به نمونه S₁ کمتر شده است. در صورتی که سطح مشترک زمینه و الیاف دارای استحکام بالایی باشد، میزان جذب انرژی در کامپوزیت را افزایش می‌دهد. از طرفی به هنگام بیرون کشیده شدن الیاف از زمینه، بخشی از انرژی اعمال شده به کامپوزیت در اثر بار خمشی جذب می‌شود. بیرون کشیده شدن الیاف کربن از زمینه کامپوزیت، چقرمگی کامپوزیت را افزایش می‌دهد و باعث افزایش استحکام نهایی کامپوزیت می‌شود. به همین دلیل وجود الیاف کربن در زمینه کامپوزیت ضمن افزایش رسانایی الکتریکی کامپوزیت، باعث بهبود خواص مکانیکی کامپوزیت شد. همچنین افزایش درصد وزنی رزین باعث چسبندگی بیشتر بین الیاف و زمینه می‌شود و استحکام مکانیکی ماده را بهبود می‌بخشد.

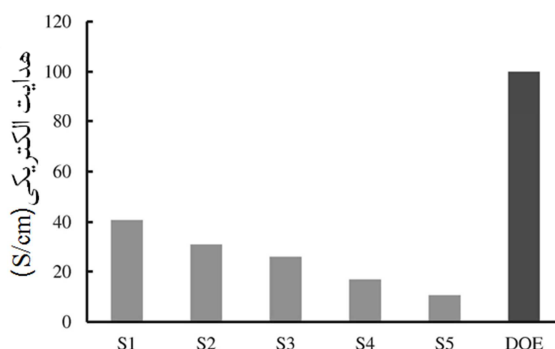


شکل ۱۴- احاطه شدن الیاف کربن توسط رزین در تصویر SEM از سطح شکست نمونه S₁ پس از آزمون خمش با بزرگ‌نمایی ۲۵۰ برابر

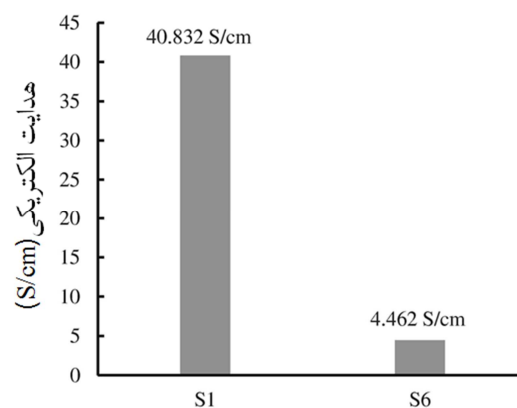


شکل ۱۵- تصویر SEM از سطح شکست نمونه S₁ پس از آزمون خمش با بزرگ‌نمایی ۵۰۰ برابر

پاشش الیاف کربن به صورت تصادفی باعث قرارگیری نامظم الیاف می‌شود، در صورتی که الیاف کربن در کامپوزیت در یک راستا قرار داشته باشند، انتقال الکترون از یک نقطه به نقطه‌ی دیگر سریع‌تر انجام می‌شود. همچنین روش ساخت و عمل‌آوری کامپوزیت در میزان رسانایی الکتریکی تأثیر زیادی دارد. به طوری که با کاهش میزان حفره‌ها در کامپوزیت، رسانایی الکتریکی نمونه بهبود یافته و همچنین خواص مکانیکی بهینه می‌شود. برای افزایش میزان رسانایی الکتریکی صفحات دوقطبی کامپوزیتی، باید از تقویت‌کننده‌های رسانا با صفحات مولکولی بزرگتر استفاده کرد و همچنین با اصلاح روش ساخت ضمن بهبود سایر خواص کامپوزیت، میزان رسانایی الکتریکی آن را نیز افزایش داد.



شکل ۱۲- میزان رسانایی الکتریکی نمونه‌های آزمایش و معیار DOE



شکل ۱۳- میزان رسانایی الکتریکی برای نمونه‌های S₁ و S₆

۳-۴- مطالعات ریخت‌شناسی

تصاویر SEM گرفته شده از سطح شکست نمونه‌های خمش در شکل‌های ۱۵ و ۱۶ نشان داده شده است. شکل ۱۵ سطح شکست نمونه S₁ با ۲۰٪ وزنی رزین را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۱۵ مشاهده می‌شود، در بخش‌هایی از سطح مقطع ترک‌هایی وجود دارد که علت اصلی آن شکست کامپوزیت و جدا شدن الیاف در اثر بار اعمال شده است. وجود این ترک‌ها به این مفهوم است که چسبندگی در سطح مشترک بین الیاف و زمینه ضعیف است. در اثر بار خمشی اعمال شده، ابتدا زمینه اصلی کامپوزیت (رزین) دچار شکست شده است، سپس نیروی اعمال شده به انرژی سطح میانی الیاف و زمینه

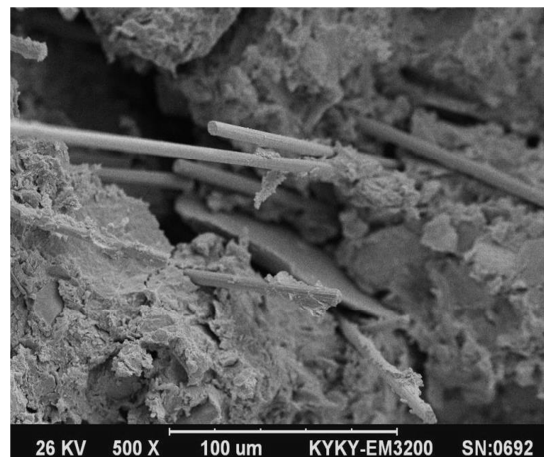
صفحات دوقطبی کامپوزیتی، نمونه‌هایی به صورت قرص دایره‌ای ساخته شد. برای بررسی تاثیر میزان درصد وزنی رزین در خواص کامپوزیت، از پودر رزین فنولیک با درصد وزنی مختلف در ساخت نمونه‌ها استفاده شد. با توجه به نتایج بدست آمده از آزمون‌های تجربی، استحکام مکانیکی نمونه‌ها در مقایسه با معیار DOE (دپارتمان انرژی) قابل قبول است، اما میزان رسانایی الکتریکی نمونه‌ها رضایت‌بخش نیست. همچنین در این تحقیق، صفحات دوقطبی با ضخامت کم (mm ۳) و با روش تولید ارزان‌تر تولید شد.

جدول ۵- مقایسه خواص نمونه‌های ساخته شده با معیار DOE

نمونه‌های کامپوزیتی و معیار دپارتمان انرژی					
خواص	DOE	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄
هدایت الکتریکی	> ۱۰۰ S/cm	۴۰/۸	۳۰/۸	۲۵/۹	۱۶/۸
استحکام خمشی	> ۲۵ MPa	۲۳/۰۶	۲۷/۷	۳۰/۳	۳۲/۳
استحکام ضربه	> ۴۰/۵ J/m	۱۱۱	۱۱۲/۳	۱۲۳	۱۵۸/۲
		۱۸۱/۵			

به طور کلی نتایج حاصل از آزمون‌های تجربی و مطالعات ریخت شناسی به شرح زیر است:

۱. نمونه S₁ با ۲۰٪ وزنی رزین دارای استحکام خمشی MPa ۲۳/۰۶ می‌باشد که ۷٪ از معیار DOE کمتر است.
۲. به ازای افزایش ۲٪ وزنی رزین، استحکام نهایی در نمونه S₂ ۱۱٪ از معیار DOE بیشتر شده و به ۲۷/۷۵ MPa رسید.
۳. استحکام ضربه به ازای کمترین درصد وزنی رزین (۲۰٪)، ۱۱۱ J/m می‌باشد که نسبت به معیار DOE (۴۰/۵ J/m) به طور چشم‌گیری، بیشتر است.
۴. افزایش درصد وزنی رزین در بیشتر نمونه‌های کامپوزیتی ساخته شده برای آزمون خمشی به جز نمونه S₃، استحکام نهایی را افزایش و استحکام تسلیم را کاهش می‌دهد.
۵. با توجه به نتایج ریخت‌شناسی، فراوری پودر گرافیت موفقیت آمیز بوده و گرافیت با صفحات مولکولی بزرگتر تولید شد که رسانایی الکتریکی نمونه‌ها را افزایش داد.
۶. وجود الیاف کربن و پارچه کربنی در کامپوزیت باعث بهبود خواص مکانیکی شد.
۷. روش ساخت و عمل‌آوری کامپوزیت مقرون به صرفه بوده و با هزینه‌ی کمتر، می‌توان صفحات دوقطبی بدون نیاز به ماشین‌کاری تولید کرد.



شکل ۱۶- تصویر SEM از سطح شکست نمونه S₃ پس از آزمون خمشی با بزرگ نمایی ۵۰۰ برابر

۳-۵- بررسی مشترک نتایج آزمون‌ها

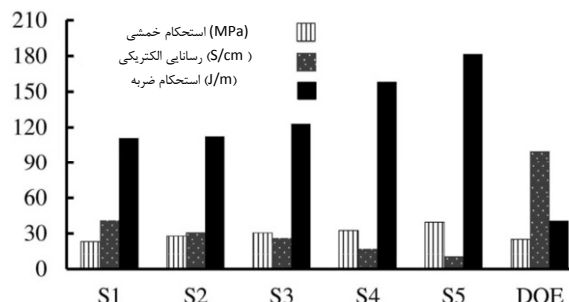
با توجه به بررسی نتایج آزمون‌های خمشی، آزمون ضربه و آزمون رسانایی الکتریکی، می‌توان خواص کامپوزیت طراحی و ساخته شده را تحلیل کرد. رزین فنولیک به‌عنوان زمینه کامپوزیت ضمن مقاومت در برابر بارهای مکانیکی، باعث چسبندگی مناسب الیاف و زمینه شده و سطح مشترک زمینه و تقویت‌کننده را تقویت می‌کند. با افزایش درصد وزنی رزین خواص مکانیکی افزایش می‌یابد، اما باعث کاهش میزان رسانایی الکتریکی نمونه‌ها می‌شود. گرافیت و گرافیت فراوری شده (EG) تا حدی باعث تقویت میزان رسانایی الکتریکی کامپوزیت شدند اما میزان رسانایی الکتریکی رضایت بخش نبود. در شکل ۱۷ مقایسه‌ای بین نتایج مشترک آزمون‌ها و معیار DOE (دپارتمان انرژی) انجام شده است. با توجه به بررسی‌های انجام شده، برای نمونه S₁ میزان استحکام نهایی ۲۳/۰۶ MPa و میزان رسانایی الکتریکی S/cm ۴۰/۸۳ و میزان استحکام ضربه ۱۱۱ J/m است. نمونه S₁ در مقایسه با معیار DOE از لحاظ استحکام خمشی و میزان جذب انرژی ضربه نتایج رضایت بخشی دارد، اما از نظر میزان رسانایی الکتریکی کمتر از معیار DOE می‌باشد.

همان‌طور که در جدول ۵ مشاهده می‌شود، میزان رسانایی الکتریکی نمونه‌های کامپوزیتی در تحقیق حاضر نسبت به معیار DOE رضایت بخش نیست. میزان استحکام خمشی به معیار DOE بسیار نزدیک است و میزان جذب انرژی ضربه در مقایسه با معیار DOE به طور چشم‌گیری افزایش یافته است. به طور کلی با توجه به مطالعات و آزمایش‌های انجام شده، نمونه S₁ به‌عنوان کامپوزیتی مناسب برای صفحات دوقطبی در پیل‌های سوختی پلیمری معرفی می‌شود.

۴- نتیجه گیری

در این تحقیق خواص مکانیکی و میزان رسانایی الکتریکی صفحات دوقطبی کامپوزیتی پایه پلیمری رزین/گرافیت/الیاف کربن/پارچه کربنی بصورت تجربی بررسی گردید. برای تحلیل تجربی رفتار مکانیکی صفحات دوقطبی کامپوزیتی، نمونه‌های کامپوزیتی مطابق با استانداردهای ASTM برای آزمون‌های خمشی سه نقطه‌ای و آزمون ضربه‌ی چارپی ساخته شد. برای بررسی میزان رسانایی الکتریکی

- fuel cell applications, Journal of Power Sources, Vol. 173, No. 1, pp. 394-403, 11/8/, 2007.
- [13] Kang S.-J., Kim D. O., Lee J.-H., Lee P.-C., M.-H. Lee, Y. Lee, J. Y. Lee, H. R. Choi, J.-H. Lee, Y.-S. Oh, J.-D. Nam, "Solvent-assisted graphite loading for highly conductive phenolic resin bipolar plates for proton exchange membrane fuel cells", Journal of Power Sources, Vol. 195, No. 12, pp. 3794-3801, 6/15/, 2010.
- [14] Taherian R., Hadianfard M. J., Golikand A. N., Manufacture of a polymer-based carbon nanocomposite as bipolar plate of proton exchange membrane fuel cells, Materials & Design, Vol. 49, pp. 242-251, 8//, 2013.
- [15] Hwang I. U., Yu H. N., Kim S. S., Lee D. G., Suh J. D., Lee S. H., Ahn B. K., Kim S. H., Lim T. W., Bipolar plate made of carbon fiber epoxy composite for polymer electrolyte membrane fuel cells", Journal of Power Sources, Vol. 184, No. 1, pp. 90-94, 9/15/, 2008.
- [16] S. I. Heo, K. S. Oh, J. C. Yun, S. H. Jung, Y. C. Yang, K. S. Han, "Development of preform moulding technique using expanded graphite for proton exchange membrane fuel cell bipolar plates, Journal of Power Sources, Vol. 171, No. 2, pp. 396-403, 9/27/, 2007.
- [17] Jiang B., Stübler N., Wu W., Li Q., Ziegmann G., Meiners D., Manufacturing and characterization of bipolar fuel cell plate with textile reinforced polymer composites, Materials & Design, Vol. 65, pp. 1011-1020, 1//, 2015.
- [18] Marc Andre Meyers, Krishan Kumar Chawla, Mechanical Behavior of Materials, Second Edition, pp. 193-198, New York: cambridge university press, 2006.
- [19] 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, Vol. 265, pp. 370-390, 11/1/, 2014.



شکل ۱۷- مقایسه استحکام خمشی، انرژی ضربه و رسانایی الکتریکی نمونه‌ها با معیار DOE

۵- سپاسگزاری

این تحقیق با حمایت مالی دانشگاه تربیت دبیر شهید رجائی، طی قرارداد طرح پژوهشی به شماره قرارداد ۳۳۵۸۹ مورخ ۹۳/۱۲/۴ و در آزمایشگاه تحقیقاتی پیل سوختی دانشگاه تربیت دبیر شهید رجائی انجام شده است.

۶- مراجع

- [1] Belali Owsia M., Hosseinipour S. J., Bakhshi Jooybari M., Gorji A., 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.
- [2] Antunes R. A., de Oliveira M. C. L., Ett G., Ett V., Carbon materials in composite bipolar plates for polymer electrolyte membrane fuel cells: A review of the main challenges to improve electrical performance, Journal of Power Sources, Vol. 196, No. 6, pp. 2945-2961, 3/15/, 2011.
- [3] Kakati B. K., Deka D., Differences in physico-mechanical behaviors of resol(e) and novolac type phenolic resin based composite bipolar plate for proton exchange membrane (PEM) fuel cell, Electrochimica Acta, Vol. 52, No. 25, pp. 7330-7336, 9//, 2007.
- [4] Mathur R. B., Dhakate S. R., Gupta D. K., Dhama T. L., Aggarwal R. K., Effect of different carbon fillers on the properties of graphite composite bipolar plate, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 203, No. 1-3, pp. 184-192, 7/18/, 2008.
- [5] P. K. Bhlapibul S., Preparation of graphite composite bipolar plate for PEMFC, Korean JChem Eng, Vol. 25, pp. 1226-31, 2008.
- [6] Mohammadtabar N., Bakhshi-Jooybari M., Hosseinipour S.J., Gorji A.H., Study of effective parameters in hydroforming of fuel cell metallic bipolar plates with parallel serpentine flow field, Modares Mechanical Engineering, Vol. 14, No. 8, pp. 17-27, 2014.
- [7] Kakati B. K., Sathiyamoorthy D., Verma A., Electrochemical and mechanical behavior of carbon composite bipolar plate for fuel cell, International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 35, No. 9, pp. 4185-4194, 5//, 2010.
- [8] Vielstich W., Handbook of Fuel Cells: Fundamentals, Technology, Applications, 4-Volume Set., pp. 3826, New York: Wiley, 2003.
- [9] D. a. B. Brett, N, Bipolar Plates: The Lungs of The PEM Fuel Cell, The Fuel Cell Review', Vol. 2, pp. 15-23, 2005.
- [10] Tawfik H., Hung Y., Mahajan D., Metal bipolar plates for PEM fuel cell—A review, Journal of Power Sources, Vol. 163, No. 2, pp. 755-767, 1/1/, 2007.
- [11] Dhakate S. R., Sharma S., Borah M., Mathur R. B., Dhama T. L., Expanded graphite-based electrically conductive composites as bipolar plate for PEM fuel cell, International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 33, No. 23, pp. 7146-7152, 12//, 2008.
- [12] Maheshwari P. H., Mathur R. B., Dhama T. L., Fabrication of high strength and a low weight composite bipolar plate for