



پژوهشگاه نیرو

پژوهشگاه نیرو

Spray Flame

برونداد تخصصی گروه پژوهشی مواد غیرفلزی

زمستان ۱۳۹۷



❖ اخبار آزمایشگاه

❖ برگزاری پنل های خبرگی

❖ پروژه های خاتمه یافته

❖ کارگاه های آموزشی

❖ بازدیدها

❖ مقالات منتشر شده





اهداف و رویکرد

بروندادهای تخصصی گروه پژوهشی مواد غیر فلزی با هدف فراهم نمودن بستری مناسب برای تبادل اطلاعات به صورت داخلی منتشر می شود.

صاحب امتیاز: پژوهشگاه نیرو
مدیر مسئول: دکتر نسترن ریاحی نوری
سر دبیر: مهندس مهرنوش هور
مدیران اجرایی: مهندس حسین کوهانی، مهندس النا اصغرزاده
همکاران این شماره: دکتر نرجس باقری، مهندس بهنام علم دوست، مهندس علی مهدیخانی، مهندس عباس فیضی نیا، دکتر سارا محسنی، دکتر فاطمه دبیر، دکتر اشکان ذوالریاستین، مهندس النا اصغرزاده
اعضای هیأت تحریریه: دکتر نسترن ریاحی نوری، مهندس مهرنوش هور، مهندس حسین کوهانی
اعضای هیأت داوران: دکتر مجید رضایی آبادچی، دکتر حسام فلاح آرانی
ناشر: گروه پژوهشی غیرفلزی پژوهشگاه نیرو
نشانی الکترونیکی: nonmetal@nri.ac.ir
نشانی: تهران، شهرک غرب، انتهای پونک باختری، پژوهشگاه نیرو، گروه پژوهشی مواد غیرفلزی

فهرست مطالب

- ۱..... سخن سردبیر
- ۲..... *انتخاب آزمایشگاههای گروه مواد غیرفلزی*
- ۲..... خدمات آزمایشگاهی آزمایشگاه سرامیک و پلیمر در زمستان سال ۱۳۹۷
- ۲..... خدمات آزمایشگاهی آزمایشگاه سیم و کابل در زمستان سال ۱۳۹۷
- برگزاری ممیزی سالانه تایید صلاحیت آزمایشگاه سیم و کابل به عنوان آزمایشگاه همکار سازمان
- ۳..... استاندارد
- ۴..... برگزاری دوره آموزشی توسط آزمایشگاه سیم و کابل
- ۵..... *برگزاری نمایشگاه سیمها و کابلهای*
- ۵..... دوازدهمین کنگره سرامیک ایران
- ۶..... ششمین کنفرانس انرژی بادی ایران
- ۸..... *برگزاری پنلهای خبرگی گروه مواد غیرفلزی*
- جلسه کمیسیون فنی پروژه "تدوین سند راهبردی و نقشه راه توسعه استفاده کامپوزیتها در صنعت
- ۸..... برق"
- ۱۰..... *بررزیهای انجام یافته گروه مواد غیرفلزی*

دستورالعمل استفاده از مقره‌های بتن پلیمری در صنعت برق.....	۱۰
ساخت کامپوزیت SiC/SiC به منظور استفاده به عنوان پره توربین گازی نسل جدید به روش ریخته‌گری	
ژلی.....	۱۱
تحقیق، بررسی و تهیه راهنمای انجام آزمون‌های مورد نیاز پوشش‌های نانو بر روی مقره‌های سرامیکی	
.....	۱۳
استفاده از فناوری‌های نوین با تاکید بر فناوری نانو برای مقابله با مسایل ناشی از آلودگی ریزگردها بر	
سطوح عایقی و ایزولاسیون خطوط و پست‌ها.....	۱۴
بازدیدها.....	۱۶
بازدید از شرکت درود کلید برق.....	۱۶
بازدید از پژوهشگاه پلیمر.....	۱۷
مقالات منتشر شده.....	۱۹
سنتر نانو ذرات افزودنی برای پوشش‌های سیلیکونی ابرآبگریز با استفاده از مواد ارزان قیمت.....	۲۰
استفاده از نانو سیلیکا در ساخت مقره بتن پلیمری بر پایه رزین پلی استر: بررسی خواص و معیارهای	
پذیرش.....	۳۱
تصفیه فاضلاب صنعتی به کمک فناوری نوین انرژی تجدیدپذیر.....	۴۱

سخن سردبیر

سپاس بی‌کران پروردگار مهربان را به خاطر این‌که زمینه انتشار این نشریه الکترونیکی را برای باری دیگر فراهم نمود. امیدواریم تا با مدد بی‌همتای یکتا بتوانیم رضایت خاطر مخاطبین عزیز را فراهم نماییم.

هدف از انتشار این شماره از برونداد، ارایه اخبار مربوط به اهم فعالیت‌های انجام شده در گروه پژوهشی مواد غیرفلزی مندرج در فهرست، منتهی به زمستان ۹۷ است. تلاش ما بر این است، تا با ارائه این نشریه زمینه افزودن دانسته‌های علمی و تجربی همکاران و متخصصین عزیز را فراهم نموده و نظر شما مخاطبین عزیز را جلب نماییم. امید آن داریم تا با تلاش اعضای هیئت تحریریه و کمک شما عزیزان بتوانیم به اهداف خود رسیده و در افزایش بار علمی شما سهم کوچکی را ایفاء کنیم.

لازم است از تمام اعضای هیئت تحریریه و کسانی که ما را در این امر یاری نموده‌اند، سپاسگزاری نماییم. آموخته‌ایم همیشه راه برای بهتر شدن باز است. از اینرو منتظر دریافت نقطه نظرات، پیشنهادات، انتقادات و مطالب ارزنده تک تک شما عزیزان برای بهتر شدن برونداد حاضر هستیم.

همواره سلامت و سرفراز باشید.

اخبار آزمایشگاه‌های گروه مواد غیرفلزی

خدمات آزمایشگاهی آزمایشگاه سرامیک و پلیمر در زمستان سال ۱۳۹۷

آزمایشگاه سرامیک و پلیمر پژوهشگاه نیرو ضمن ارائه خدمات آزمایشگاهی به پروژه‌های پژوهشی پژوهشگاه از جمله پروژه ارزیابی وضعیت مقره‌های کامپوزیتی مستعمل ۱۷ خط فوق توزیع و انتقال استان هرمزگان و پروژه مرتبط با پوشش نانو RTV مقره، در زمستان ۱۳۹۷، تعداد ۲۳ گزارش آزمون، عمدتاً مربوط به مقره‌های خطوط نیرو (آزمون‌های غیر الکتریکی مقره) با هماهنگی آزمایشگاه فشار قوی پژوهشگاه، به متقاضیان شامل شرکت توانیر، شرکت‌های برق و شرکت‌های تولید کننده مقره ارائه نموده است.

خدمات آزمایشگاهی آزمایشگاه سیم و کابل در زمستان سال ۱۳۹۷

آزمایشگاه سیم و کابل پژوهشگاه نیرو ضمن ارائه خدمات آزمایشگاهی به پروژه‌های پژوهشی پژوهشگاه از جمله پروژه مرتبط با پوشش نانو RTV مقره، در زمستان ۱۳۹۷، تعداد ۱۰۵ گزارش آزمون، مربوط به انواع کابل قدرت و هادی هوایی به متقاضیان شامل شرکت توانیر، شرکت‌های برق، شرکت‌های تولید کننده سیم و کابل و صنایع مصرف کننده این اقلام ارائه نموده است.

برگزاری ممیزی سالانه تایید صلاحیت آزمایشگاه سیم و کابل به عنوان آزمایشگاه همکار سازمان استاندارد

به منظور تمدید گواهینامه تایید صلاحیت آزمایشگاه همکار سازمان استاندارد، ممیزی سالانه آزمایشگاه سیم و کابل توسط نمایندگان آن سازمان در تاریخ ۹۷/۱۲/۲۰ انجام گردیده و گواهینامه مذکور با محدوده آزمون‌های کابل قدرت با ولتاژ اسمی ۱-۶/۰ kV و آزمون‌های هادی‌های خطوط هوایی نیرو تمدید گردید.



ممیزی سالانه تایید صلاحیت آزمایشگاه سیم و کابل

برگزاری دوره آموزشی توسط آزمایشگاه سیم و کابل

در اسفند ۱۳۹۷ به درخواست شرکت کابل باختر، یک دوره آموزشی دو روزه با موضوع "استانداردها، مشخصات و آزمون‌های کابل‌های فشار ضعیف" توسط کارشناس آزمایشگاه سیم و کابل، در محل شرکت مذکور واقع در شهر کرمانشاه برای آن شرکت برگزار گردید.



برگزاری دوره آموزشی در شرکت کابل باختر

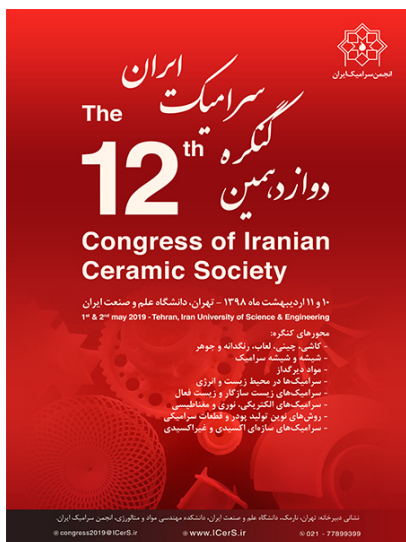
برگزاری همایش‌ها، سمینارها و کنفرانس‌ها

دوازدهمین کنگره سرامیک ایران

اردیبهشت ماه ۱۳۹۸ در تهران (دانشگاه علم و صنعت ایران)

انجمن سرامیک ایران در نظر دارد دوازدهمین کنگره سرامیک ایران را در اردیبهشت ماه ۱۳۹۸ در تهران (دانشگاه علم و صنعت ایران) برگزار نماید. از ویژگی‌های بارز این کنگره ارائه سخنرانی‌های راهبردی توسط اساتید، پیشکسوتان و متخصصین علم و صنعت سرامیک ایران می‌باشد. همچنین نمایشگاهی برای ارائه محصولات، تجهیزات و خدمات فنی و مهندسی توسط شرکت‌های داخلی و خارجی برگزار خواهد شد.

محورهای این کنگره عبارتند از:



- ✓ کاشی، چینی، لعاب، رنگدانه و جوهر
- ✓ شیشه و شیشه سرامیک
- ✓ مواد دیرگداز
- ✓ سرامیک‌ها در محیط زیست و انرژی
- ✓ سرامیک‌های زیست‌سازگار و زیست فعال
- ✓ سرامیک‌های الکتریکی، نوری و مغناطیسی
- ✓ روش‌های نوین تولید پودر و قطعات سرامیکی
- ✓ سرامیک‌های سازه‌ای اکسیدی و غیراکسیدی

ششمین کنفرانس انرژی بادی ایران

اردیبهشت ۹۸، تهران - سالن همایش‌های وزارت نیرو

[/http://www.iranwec.com](http://www.iranwec.com)

سال‌های اخیر انرژی بادی در جهان شاهد رشد چشمگیری بوده است و پیش‌بینی می‌شود با ادامه رشد سرمایه‌گذاری در این صنعت، این روند در سال‌های آتی ادامه یابد. به یاری خداوند ششمین کنفرانس انرژی بادی ایران در ۹ اردیبهشت ماه ۱۳۹۸ توسط انجمن علمی انرژی بادی ایران در سالن همایش‌های وزارت نیرو برگزار می‌گردد. در این کنفرانس ضمن بررسی چالش‌های پیش رو، راهکارهای توسعه این صنعت در کشور با توجه به شرایط اقتصادی کنونی مورد نقد و بررسی قرار خواهد گرفت. کنفرانس انرژی بادی ایران تنها همایشی است که همه فعالان صنعت انرژی بادی را اعم از مسئولین دولتی، قانون‌گذاران، سرمایه‌گذاران، مجریان و مشاوران گرد هم آورده و به صورت واقع‌بینانه به این بخش می‌پردازد. حضور مدیران ارشد شرکت‌های بزرگ بین‌المللی و مسئولین سازمان‌های معتبر جهانی بر غنای این گردهمایی خواهد افزود. ششمین کنفرانس انرژی بادی ایران فرصت مغتنمی برای همه دست‌اندرکاران و علاقمندان به انرژی بادی کشور فراهم می‌آورد که ضمن پرداختن به اقدامات انجام شده، نقشه راهی عملی برای توسعه هر چه سریعتر این صنعت ترسیم گردد. دست‌اندرکاران و علاقمندان به انرژی بادی کشور فراهم می‌آورد که ضمن پرداختن به اقدامات انجام شده، نقشه راهی عملی برای توسعه هر چه سریعتر این صنعت ترسیم گردد. انجمن علمی انرژی بادی ایران در نظر دارد، به عنوان یکی از برنامه‌های جانبی ششمین کنفرانس انرژی بادی، در تاریخ ۹۸/۲/۱۰ از بزرگترین نیروگاه بادی بخش خصوصی کشور در منطقه سیاهپوش استان قزوین بازدید نماید.

نهمین کنفرانس ملی نیروگاه‌های برق

۱۰ و ۱۱ اردیبهشت ۱۳۹۸

www.epgc9.ir

تهران - بزرگراه همت غرب- بعد از بزرگراه آزادگان، خیابان جدی اردبیلی-جنب دانشگاه علوم

انتظامی امین - مجموعه فرهنگی ورزشی غدیر

اجرای سالیانه پیاپی هشت دوره کنفرانس ملی نیروگاه‌های برق با هدایت انجمن مهندسين برق و الکترونیک ایران، مشعل فروزان این رویداد بزرگ ملی این بار به دست شرکت مدیریت تولید برق دماوند(نیروگاه سیکل ترکیبی شهدای پاکدشت) سپرده شده تا به یاری پروردگار میزبانی نهمین کنفرانس نیروگاه‌های برق را در تاریخ ۱۰ و ۱۱ اردیبهشت ماه ۱۳۹۸ به عهده گیرد. با گذشت ۸ سال از وقوع این حرکت تخصصی با اهمیت و آشنایی شما متخصصان حوزه صنعت تولید برق با درون مایه و ترتیبات اجرای کنفرانس، بی گمان بر تاثیرات آن بر ارتقا سطح دانش فنی در راستای تولید ایمن، پاک و اقتصادی انرژی الکتریکی و نیز بسترسازی برای ارائه تازه های فن آوری نیروگاهی از سوی کارشناسان نیروگاهها، نخبگان دانشگاهی، موسسات دانش بنیان، صنعتگران و مهندسان مشاور و قوف دارید. از این رو شایسته است با پیوستن به جریان علمی و فنی این کنفرانس و مشارکت و حضور فعال در آن، موجبات دلگرمی مجریان آن را فراهم سازید.

برگزاری پنل‌های خبرگی گروه مواد غیرفلزی

جلسه کمیسیون فنی پروژه "تدوین سند راهبردی و نقشه راه توسعه استفاده کامپوزیت‌ها در صنعت برق"

مدیر پروژه: فاطمه دبیر

صنعت برق پتانسیل این را دارد که یکی از مصرف‌کنندگان عمده مواد کامپوزیتی باشد. تولید قطعات کامپوزیتی بسیار سبک، با سختی و استحکام بالا برای تحمل بار ناشی از خطوط انتقال فشار قوی از جمله موارد بسیار موفق در صنعت برق بوده است. امروزه تیرها و بازوهای عرضی کامپوزیتی در بسیاری از نقاط دنیا در خطوط توزیع و انتقال کاربرد پیدا کرده و نتایج خوبی را نیز نشان داده‌اند. توسعه استفاده از کامپوزیت‌ها در مواد، قطعات و تجهیزات به کار رفته در بخش‌های مختلف صنعت برق کشور می‌تواند منجر به ارتقاء کیفیت تجهیزات و کاهش هزینه‌های نصب، نگهداری و تعمیرات آن‌ها شود. در این راستا و به منظور توسعه فناوری کامپوزیت‌ها در صنعت برق کشور، پروژه‌ای با عنوان "تدوین سند راهبردی و نقشه راه توسعه استفاده کامپوزیت‌ها در صنعت برق" در گروه پژوهشی مواد غیر فلزی در حال انجام است که کمیسیون فنی مراحل سوم و چهارم این پروژه در اسفند ماه ۹۷ برگزار شد. در مرحله سوم این پروژه، چشم‌انداز، اهداف کلان، راهبردهای کلان و سیاست‌های کلان سند، تعیین و تدوین شد و در مرحله چهارم، به تدوین اقدامات فنی و غیر فنی و سیاست‌های اجرایی سند پرداخته شد.



ساخت کامپوزیت SiC/SiC به منظور استفاده به عنوان پره توربین گازی نسل جدید به روش ریخته‌گری ذلی

پروژه‌های اتمام یافته گروه مواد غیرفلزی

دستورالعمل استفاده از مقره‌های بتن پلیمری در صنعت برق

مدیر پروژه: حسام فلاح

یکی از اجزاء مهم شبکه‌های توزیع، مقره‌های فشار قوی می‌باشند. مقره‌ها یکی از اجزای اصلی خطوط انتقال و توزیع محسوب می‌شوند. این وسایل به عنوان واسطه‌ای میان دکل و هادی عمل کرده که ضمن انتقال نیروی وزن کابل به دکل از اتلاف و هدایت جریان الکتریسته به زمین جلوگیری می‌کنند. امروزه سهولت تولید، انعطاف پذیری طراحی و امکان جاسازی فلزات و مزایای اقتصادی سبب شده که در ساخت مقره‌های الکتریکی از بتن پلیمر استفاده شود. بتن پلیمری بطور موفقیت‌آمیزی برای استفاده در ساخت مقره‌های الکتریکی توسعه پیدا کرده است.

کار انجام شده در موسسه تحقیقات الکتریکی در آمریکا باعث توسعه فرمولاسیون و تکنیک‌های تولید این محصول به عنوان جانشین پرسلان شده است. در پروژه حاضر، پس از بررسی دقیق فرمولاسیون و شناخت ماهیت ساختاری مقره بتن پلیمری، آزمون‌های فیزیکی، مکانیکی و الکتریکی لازم الاجرا جهت بهره برداری از این محصول ارائه گردید. نتایج هریک از این آزمون‌ها بر روی مقره بتن پلیمری ساخته شده در پژوهشگاه نیرو گزارش شد. همچنین در انتها، دستورالعملی تحت عنوان "دستورالعمل تعیین الزامات، معیارهای ارزیابی فنی و آزمون‌های مقره بتن پلیمری ۲۰ و ۳۳ کیلوولت اتکایی خط" جهت ثبت در شرکت توانیر تدوین شد.

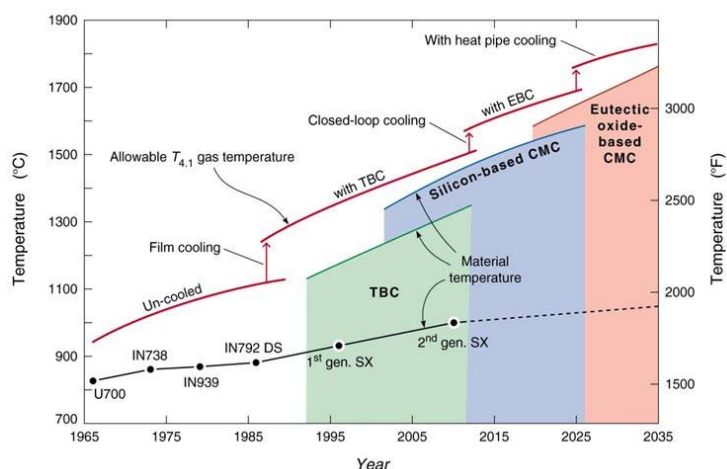
ساخت کامپوزیت SiC/SiC به منظور استفاده به عنوان پره توربین گازی نسل جدید به روش

ریخته‌گری ژلی

مدیر پروژه: حسام فلاح آرانی

سازندگان توربین‌های گازی همواره در حال تلاش برای بهبود راندمان، افزایش توان خروجی و کاهش انتشار گازهای آلاینده هستند. برای تحقق این اهداف، روش‌هایی نظیر افزایش دمای کاری توربین، بهبود طراحی قطعات و کاهش میزان هوای لازم برای خنک‌کاری توسط سازندگان استفاده شده است. در این میان، بیشترین تاثیر به افزایش دمای کاری توربین اختصاص دارد. بسیاری از قسمت‌های توربین‌های گازی مانند قطعات به کار رفته در محفظه‌ی احتراق و پره‌های ثابت و متحرک برای زمان‌های طولانی در معرض مستقیم گازهای داغ و خورنده ناشی از احتراق هستند. به همین دلیل باید از موادی ساخته شوند که خواص مکانیکی خود را در دماهای بالا حفظ نموده و در برابر خوردگی و اکسیداسیون نیز مقاوم باشند. در صد سال گذشته همواره از سوپر آلیاژها برای ساخت قطعات بخش‌های داغ توربین استفاده شده است. سوپر آلیاژها مانند سوپر آلیاژهای پایه نیکل و پایه کبالت موادی با استحکام بالا در دماهای زیاد و مقاوم در برابر اکسیداسیون هستند. قطعات ساخته شده از سوپر آلیاژها می‌توانند تا دماهای حدودا 1000°C در برابر خزش، اکسیداسیون، خوردگی و خستگی، مقاوم باشند. برای افزایش بیشتر دمای کاری توربین‌ها، راه‌کارهای زیادی تا به حال اجرا شده است تا بتوان سوپر آلیاژها را به بیشینه دمای کاری خود رساند. قطعات توربین دارای شکل‌های پیچیده هندسی و دقت ابعادی بسیار بالا هستند. به همین دلیل برای شکل‌دهی مواد سرامیکی با تحمل دمایی بالا و مقاومت شیمیایی مناسب، به منظور کاربرد در توربین‌های گازی روش ریخته‌گری ژل در مقایسه با سایر روش‌های شکل‌دهی سرامیک‌ها مناسب‌تر است. زیرا

تنها در این روش قابلیت شکل‌دهی نزدیک به هندسه نهایی (near net shape)، نرخ بالای تولید قطعات سالم و ماشین‌کاری در حالت خام وجود دارد. با استفاده از این روش می‌توان قطعاتی کوچک‌تر از یک گرم و بزرگ‌تر از ۶ کیلوگرم و شکل‌های پیچیده‌ای با سطح مقطع کمتر از ۰/۲ میلی‌متر را شکل داد. استحکام خام بالای قطعات تولید شده به روش ریخته‌گری ژل، یکی از مزایای این روش است، که امکان حمل و نقل آسان و خصوصاً ماشین‌کاری و سوراخ‌کاری را که از الزامات دستیابی به قطعات پیچیده با دقت‌های ابعادی بالا است را فراهم می‌سازد. در این پروژه، برای اولین بار، بدنه‌ی کاربید سیلیسیم با استفاده از پودرهایی در مقیاس میکرونی و نانو و کمک سینترهای آلومینا و ایتریا با روش ریخته‌گری ژلی و سینتر با حضور فاز مایع در دمای ۱۹۰۰ درجه سانتی‌گراد ساخته شده که این بدنه دارای ۳۶۰ مگاپاسکال استحکام خمشی و ۹۸٪ دانسیته تئوری است.



پیشرفت‌های اخیر در زمینه استفاده از سرامیک‌های نانوکامپوزیتی به همراه پوشش‌های مورد استفاده

تحقیق، بررسی و تهیه راهنمای انجام آزمون‌های مورد نیاز پوشش‌های نانو بر روی مقره‌های

سرامیکی

مدیر پروژه: دکتر روزبه سیاوش موخر

با توجه به تحقیقات و بررسی‌های به عمل آمده در این پژوهش یکی از جدیدترین راه‌حل‌ها جهت جلوگیری از تخلیه الکتریکی بر روی مقره‌های آلوده در شرایط مرطوب، استفاده از نانو پوشش‌ها بر روی سطح مقره می‌باشد. نانو پوشش‌های آبگریز با ایجاد تغییرات در سطح و زاویه تماس باعث ایجاد حفاظت سطح زیرین در برابر آلودگی‌های محیطی، تخریب ناشی از اشعه خورشید، تغییرات دمایی و بارش باران می‌گردد. این پوشش‌ها عموماً با هدف ارتقا آبگریزی و خودتمیزشوندگی مقره سرامیکی مورد استفاده قرار می‌گیرند. نانو پوشش‌ها را می‌توان به سه دسته کلی ذیل تقسیم بندی نمود: ۱. نانو پوشش‌های بر پایه RTV بهبود یافته با نانوذرات که عموماً ضخامت‌های چند صد میکرونی دارند، ۲. نانو پوشش‌های لایه نازک سرامیکی همراه با عملیات حرارتی و ۳. نانو پوشش‌های لایه نازک پلیمری-سرامیکی بدون عملیات حرارتی که عموماً این دو پوشش اخیر ضخامت‌های نانومتری دارند. در این پروژه کلیه نانوپوشش‌های قابل استفاده بر اساس مقالات، پتنت‌ها، گزارش‌های فنی و نظرات خبرگان و صاحب‌نظران، مورد مطالعه و ارزیابی قرار گرفت و پس از بررسی و تجزیه و تحلیل آزمون‌ها، سه دستورالعمل مجزا برای بررسی کیفی دراز مدت برای هر یک از سه نوع نانو پوشش ذکر شده با توجه به شرایط اعمال و نحوه عملکرد، تدوین گردید.

استفاده از فناوری‌های نوین با تاکید بر فناوری نانو برای مقابله با مسایل ناشی از آلودگی ریزگردها بر سطوح عایقی و ایزولاسیون خطوط و پست‌ها

مدیر پروژه: روزبه سیاوش موخر

مشکل آلودگی و تخلیه الکتریکی بر روی مقره‌های الکتریکی در شرایط مرطوب، تهدیدی جدی برای قابلیت اطمینان شبکه بوده که می‌تواند منجر به خارج شدن شبکه، خاموشی و بحران‌های اقتصادی، اجتماعی، سیاسی و امنیتی گردد. نمونه این حوادث در ایران در خطوط فشارقوی برق منطقه‌ای باخر و برق منطقه‌ای هرمزگان در سال‌های گذشته مشاهده شده است و هم‌اکنون نیز این مشکلات وجود دارد. اگرچه، مقره‌های کامپوزیتی (سیلیکونی) به دلیل بهبود عملکرد تحت شرایط آلوده در طراحی‌های جدید در مناطق با آلودگی و رطوبت بالا مورد استفاده قرار می‌گیرند، با این وجود، مسئله حال حاضر بسیاری از بهره‌برداران، میلیون‌ها مقره سرامیکی و شیشه‌ای است که امکان تعویض آن‌ها با توجه به ملاحظات فنی و اقتصادی وجود ندارد. همچنین مشکلات زیست محیطی مقره‌های کامپوزیتی، ادامه استفاده از مقره‌های سرامیکی و یا شیشه‌ای را اجتناب ناپذیر می‌کند. لذا می‌بایست جهت حفظ مقره‌های موجود، تا حد امکان مشکلات ناشی از تخلیه الکتریکی این مقره‌ها را تحت شرایط آلودگی حل نمود. در این راستا، تلاش‌های زیادی در کل دنیا، جهت حل مشکل آلودگی از جمله به کار بردن مواد خودتمیز شونده فوق آبگریز شده است. در این تحقیق به بررسی راه‌حل‌های قابل اجرا پرداخته

شده است. راه حل های مختلفی همچون استفاده از گریس ها^۱، پوشش های سیلیکون رابر پخت شونده در دمای اتاق (RTV)^۲، چترک افزاها^۳، هیت شرینک ها^۴، کلد شرینک ها^۵ و پوشش دهی مجدد سیلیکون رابر ها^۶ وجود دارد. در این پروژه کلیه نانوپوشش های قابل استفاده بر اساس مقالات، پتنت ها، گزارش های فنی و نظرات خبرگان و صاحب نظران، مورد مطالعه و ارزیابی قرار گرفت و همچنین پس از بررسی و تجزیه و تحلیل آزمون ها، "دستورالعمل آزمون و ارزیابی آزمایشگاهی پوشش های سیلیکون رابر پخت شونده در دمای اتاق" تدوین و جهت تأیید و اجرا به شرکت مادر تخصصی توانیر ارسال شد.

^۱ - Grease

^۲ - Room Temperature Vulcanized Silicon Rubber

^۳ - Creepage Extender

^۴ - Heat shrinkable

^۵ - Cold shrinkable

^۶ - Recoating RTV

بازدیدها

بازدید از شرکت درود کلید برق

بازدید از واحد تولیدی درود کلید برق در تاریخ ۱۳۹۷/۱۰/۱۸ توسط اعضا هیئت علمی و کارشناسان گروه مواد غیرفلزی پژوهشگاه نیرو انجام گرفت. درود کلید برق یکی از واحدهای تولیدی مقره‌های کامپوزیتی می‌باشد. این واحد تولیدی در سال ۱۳۷۴ در شهرستان نظرآباد استان البرز تأسیس شده و در سال ۱۳۹۲ فعالیت‌های این واحد به شهرک صنعتی کاسپین دو شهرستان آبیگ منتقل شده است. این شرکت در سال ۱۳۸۲ تولید مقره‌های کامپوزیتی را تا رده توزیع (۳۳ کیلوولت) آغاز نموده و در این زمینه به عنوان تولیدکننده نمونه صنعت برق ایران انتخاب گردید. در سال ۱۳۸۸ مقره‌های کامپوزیتی رده انتقال (۴۰۰ کیلوولت) پس از طراحی و تحلیل میدانی، برای اولین بار در ایران نمونه‌سازی شد و به لحاظ بکارگیری روش تولید یکپارچه این قبیل مقره‌ها، برگ زرین دیگری را در تاریخ صنعت جهان به نام ایران به ثبت رساند. در این بازدید قسمت‌های مختلف خط تولید مقره‌های کامپوزیتی، موانع و مشکلات این صنعت بررسی شد و توضیحاتی توسط کارشناس کارخانه ارائه گردید. پس از بازدید از خط تولید، از آزمایشگاه شرکت و نحوه انجام آزمون‌های موادی، آزمون‌های مکانیکی و الکتریکی بر روی مقره‌های پلیمری بازدید به عمل آمد. هدف از این بازدید بررسی مشکلات تولیدکنندگان داخلی برای ساخت مقره‌های پلیمری، میزان هزینه و تجهیزات مورد نیاز برای راه‌اندازی خط تولید این نوع از مقره‌ها و موانع موجود بود؛ که با توجه به واردات مواد اولیه این صنعت در صورتی که تولید مواد اولیه ساخت مقره‌های پلیمری در داخل کشور مقرون به صرفه باشد، تولید آن در داخل کشور می‌تواند نگرانی‌های وارد نشدن مواد اولیه و در پی آن تعطیلی خط تولید این قبیل شرکت‌ها را برطرف سازد.

بازدید از پژوهشگاه پلیمر



در تاریخ ۱۲ اسفند ماه، تعدادی از اعضا هیئت علمی و کارشناسان گروه مواد غیرفلزی، از پژوهشگاه پلیمر واقع در اتوبان تهران - کرج بازدید به عمل آوردند. در طی این بازدید، از تجهیزات و امکانات موجود در آزمایشگاه‌های پرینت سه بعدی، تولید غشا و رنگ و پوشش و همچنین محصولات پروژه‌های انجام شده، دیدن شد. همچنین جناب آقای دکتر رضادوست، توضیحات کاملی در ارتباط با پایلوت کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف شیشه و کف ارائه نمودند. از دیگر برنامه‌های این بازدید، آشنایی با پروژه‌های انجام شده بود که در غالب سخنرانی‌هایی تحت عناوین "پروژه‌های مرتبط با کامپوزیت"، "طرح‌های مکره و کوپلرها"، مباحث پوشش‌های پلیمری، خوردگی و بتن‌های پلیمری" و "سنتز RTV" توسط اساتید هیئت علمی پژوهشگاه پلیمر ارائه شد. در پایان این بازدید، از اعضا پژوهشگاه پلیمر دعوت شد تا در فراخوان پروژه‌های گروه مواد غیرفلزی پژوهشگاه نیرو شرکت کند.

برگزاری کارگاه آموزشی



در تاریخ ۹۷/۱۲/۵، کارگاه آموزشی آشنایی با ابرخازن‌ها توسط سرکارخانم مهندس آزادفلاح، دانشجوی دکتری مهندسی مواد دانشگاه بین المللی امام خمینی قزوین برگزار شد. در این کارگاه، اعضا هیئت علمی گروه، کارشناسان و محققان حضور داشتند و موضوعاتی مانند تئوری ابرخازن‌ها، انواع سلول‌های ابرخازن، اجزای یک ابرخازن، مواد مورد استفاده برای ساخت ابرخازن و کاربردهای آنها مورد بررسی قرار گرفت.

مقالات منتشر شده





سنتز نانو ذرات افزودنی برای پوشش‌های سیلیکونی ابرآبگریز با استفاده از مواد ارزان

قیمت

اشکان ذوالریاستین، لیلا سهرابی کاشانی

گروه مواد غیر فلزی، پژوهشگاه نیرو، تهران

azolriasatein@nri.ac.ir

چکیده — نانوذرات به دلیل ویژگی‌های منحصر به فردی که از خود بروز می‌دهند، مورد توجه بسیاری از پژوهشگران قرار گرفته‌اند. در این میان، سیلیکای سنتزی به دلیل بهبود خواص پوشش‌های سیلیکونی، جایگاهی ویژه دارد. نانوذرات سیلیکا مرسوم‌ترین ماده‌ی مورد استفاده در پوشش‌های آبرگریز است که کاربرد بیشتری نسبت به سایر اکسیدهای فلزی دارد. با قرار گرفتن این نانوذرات در بستر پلیمری مناسب و عامل دار کردن سطح این ذرات، خاصیت آبرگریزی مناسبی ایجاد می‌شود. معمولاً از آلکیل ارتوسیلیکات‌ها (TEOS) برای تهیه نانو ذرات سیلیکا استفاده می‌شود اگرچه آن‌ها با توجه به قیمت بالا، اشتعال پذیری و مشکلات جابه‌جایی و انبار بهترین منابع تولید سیلیکا نیستند. بنابراین، دانشمندان تلاش می‌کنند تا روش‌ها و منابع مقرون به صرفه بیابند. یکی از این روش‌ها، استفاده از سیلیکات سدیم (آب شیشه) می‌باشد. در این پژوهش، از سیلیکات سدیم، هیدروکلریک اسید و همچنین هگزا دو دسیل تری متیل آمونیوم برمید (CTAB)، به عنوان سرفکتانت استفاده شده است.

واژه‌های کلیدی — نانوسیلیکا، ابرآبرگریزی، آب شیشه، رسوب گذاری

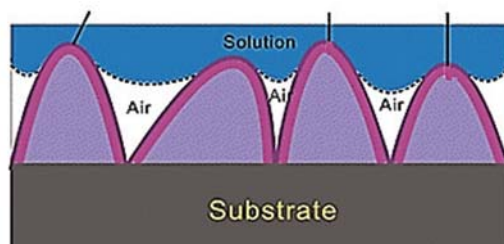
۱. مقدمه

بسیاری از نویسندگان نشان داده‌اند که دست‌یابی به سطوح ابر آبرگریز با افزودن نانو ذرات و مواد دارای انرژی سطحی کم در یک ماتریس پلیمری مناسب امکان‌پذیر است. نانو کامپوزیت‌های پلیمری برای ساخت سطوح ابر آبرگریز به دلیل مزایای ذاتی‌شان مانند سهولت فرآیند، مقرون به صرفه بودن و قابلیت اعمال بر روی سطوح بزرگ بطور گسترده مورد استفاده قرار گرفته‌اند. گزارش‌ها حاکی از آن است که در ساخت پوشش‌های

بر پایه ی PDMS (پلی دی متیل سیلوکسان) با خاصیت آبگریزی از دو روش استفاده شده است. نخست زبرکردن سطح بر اثر اصلاح آبگریزی توسط PDMS و همچنین استفاده از نانوذرات مناسب در PDMS و اعمال آن بر روی سطوح صاف [۲۱]. PDMS پلیمر اصلی سیلیکون رابر است. گروه های متیل هیدروکربنی آبگریز و دافع آب هستند. علاوه بر این، سیلیکون رابر توانایی بازیابی آبگریزی حتی پس از ایجاد یک لایه ی آلوده بر روی سطح را داراست که همین امر موجب توقف نشت جریان، آرک و تخلیه الکتریکی می گردد.

در حال حاضر از سیلیکون رابر RTV (room temperature vulcanization) به منظور پوشش روی مقره های سرامیکی استفاده می شود. برای حفظ کردن مقره ها، روش های نظیر شستن با فشار بالا، گریس ها و پوشش های RTV بر روی مقره های پرسلانی یا شیشه ای اعمال شده است و RTV ثابت کرده که موثرتر است و دارای ظرفیت بلند مدت برای ایجاد خواص ضد آلودگی می باشد. این روش به این دلیل که نیاز به جای گزینی مقره ها ندارد و پوشش می تواند توسط اسپری و یا رنگ کاری اعمال شود، توجه زیادی را به خود جلب کرده است [۳]. سیلیکون رابر اغلب دارای خواص مکانیکی ضعیفی است و باید با فیلرهایی مثل سیلیکای سنتزی برای کاربرد های صنعتی تقویت گردد. تقویت لاستیک سبب بهبود خواصی چون استحکام کششی، استحکام برشی، سختی، مقاومت به سایش و همچنین کاهش هزینه می شود. این امر به سبب حضور یک فاز جامد مثل سیلیکای سنتزی و اکسید های فلزی است که دارای مساحت سطح بزرگی هستند و نشان داده اند که در بهبود خواص لاستیک بسیار موثرند. در بین فیلر ها، سیلیکای آمورف بیشترین تقویت را ایجاد می کند [۴].

زمانی که یک سطح دارای بافت زبری در مقیاس نانومتری باشد، فصل مشترک بین هوا و آب در یک قطره که بر روی سطح قرار گرفته است، افزایش یافته و نیروی موئینگی بین قطره و سطح شدیداً کم می شود. بنابراین، قطره آب شکل کروی به خود می گیرد و امکان ایستایی ذرات آب روی سطح را از بین می برد (شکل ۱) [۵].



شکل ۱: وجود بافت زبر نانومتری بر روی سطح

ذرات نانومتری به دلیل ویژگیهای منحصر به فردی که در این ابعاد از خود بروز می دهند، مورد توجه پژوهشگران بسیاری قرار گرفته و در سال های اخیر تلاش هایی گسترده در تولید نانو ذرات مواد گوناگون انجام شده است. از جمله نانو ذرات تولید شده، اکسید سیلیسیم است. نانو ذرات سیلیکا جزء نخستین نانو ذرات تهیه شده به وسیله بشر بوده است. در سال ۱۹۴۰ نخستین گزارش تهیه سیلیکای آمورف به روش رسوب گیری در حضور عوامل قلیایی و در پی آن خنثی سازی با اسید منتشر شد. سیلیکاهای ناشی از فرآیند در محیط های آبی شامل سیلیکای کلوئیدی، سیلیکای تهیه شده از فرآیند سل-ژل، امولسیون و سیلیکای ناشی از فرآیند رسوب گذاری است. با توجه به شرایط تولید، سیلیکای بدست آمده می تواند ساختار ژل گونه تا رسوبی با پراکندگی بالا داشته باشد. طی فرآیند رسوب گذاری، ذرات سیلیکا از راه تجمع ذرات اولیه که در محلول فوق اشباع هسته گذاری شده اند، تشکیل می شود. بنابراین، اندازه و توزیع ذرات با تغییر غلظت مواد واکنش دهنده که بر روی هسته گذاری ذرات اولیه تاثیر گذاشته، تغییر می کند. سرفکتانت بیشتر برای کنترل اندازه و یکنواختی ذرات در فرآیند رسوب گذاری بکار می رود. یکنواختی در اندازه ذرات از فعل و انفعال مولکولی با سرفکتانت ناشی می شود.

استفاده از عامل‌های فعال کننده‌ی سطحی، تولید ذرات نانومتری سیلیکا را با پراکندگی بالا (کاهش کلوخه‌ای شدن) امکان‌پذیر می‌سازد [۶].

مقالات متعددی در مورد سنتز نانو سیلیکا با استفاده از آب شیشه مطالعه گردید. در اکثر مقالات از HCL استفاده شده بود [۷ و ۹ و ۱۰] و در برخی مقالات از اسید سولفوریک استفاده شده [۱۱ و ۱۲]. که برخی از سرفکتانت و برخی بدون سرفکتانت موفق به سنتز نانو سیلیکا شده بودند.

۲. روش پژوهش

از محلول سدیم سیلیکات Merck (SiO₂ ۲۵/۵-۲۸/۵٪، Na₂O ۷/۵-۸/۵٪)، اتیل استات دکتر مجللی (۹۹٪)، تیترازول HCL ۱ نرمال دکترمجللی، هگزا دو دسیل تری متیل آمونیوم برمید Merck (CTAB) و آب مقطر استفاده گردید. ابتدا تیترازول HCL در یک بالن ژوژه ۱ لیتری به حجم رسانده شد تا هیدروکلریک اسید ۱ نرمال به دست آید (شکل ۲-الف). مقدار مواد اولیه آزمایش در جدول ۱ ذکر شده است.

جدول ۱: شرایط آزمایش

ماده	HCL(1N)	آب شیشه (۳۵٪)	CTAB	آب
مول	۰/۱۵	۰/۱	۰/۰۰۲۸	۲
مقدار	cc ۱۵۰	۲۶ cc	۱g	۳۶ cc



شکل ۲: الف) به حجم رساندن اسید ۱ نرمال ب) تغییر رنگ محلول با اضافه شدن سدیم سیلیکات

آب مقطر در یک ارلن ۵۰۰ میلی‌لیتری ریخته شد و سپس هیدروکلریک اسید و CTAB به آن اضافه گردید و با سرعت ۴۰۰ rpm با استفاده از یک همزن مغناطیسی همزده شد. محلول سدیم سیلیکات در دکانتور ریخته شد و به همان مقدار آب مقطر در آن ریخته شد تا رقیق گردد و هنگام اضافه کردن آن، فولکولاسیون اتفاق نیفتد. قبل از اضافه کردن محلول سدیم سیلیکات، pH مخلوط داخل ارلن اندازه گرفته شد که کمتر از ۱ را نشان داد. سپس قطره قطره یا سرعت یک قطره در ثانیه سدیم سیلیکات تحت همزدن مداوم اضافه شد تا به تدریج رنگ محلول شیری رنگ گردد (شکل ۲-ب). پس از خالی شدن دکانتور، همزدن متوقف گردید و مخلوط واکنش بمدت ۲ ساعت پیرگردید. pH مخلوط با گذشت زمان نیز اندازه‌گیری شد.

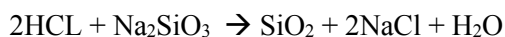
سپس مخلوط واکنش سانتریفیوژ گردید و بار اول بمدت ۴ دقیقه با دور ۳۰۰۰ سانتریفیوژ شد اما، نانو ذرات هنوز در مایع شفاف بالای رسوب دیسپرس بود به همین دلیل دو بار دیگر هر کدام به مدت ۴ دقیقه سانتریفیوژ شد. پس از ۱۰ دقیقه که ذرات روی رسوب نشستند، مایع شفاف بالای رسوب که هنوز حاوی نانو ذرات بود، از کاغذ صافی گذرانده شد. سپس آب مقطر به آن اضافه گردید و دور دوم بمدت ۸ دقیقه سانتریفیوژ شد و دوباره مایع شفاف چون هنوز حاوی نانو ذرات دیسپرس بود، از کاغذ صافی گذرانده شد. در دور سوم،

چهارم و پنجم پس از هربار سانتریفیوژ مایع شفاف روی رسوب تخلیه گردید و به آن آب مقطر اضافه شد و بمدت ۴ دقیقه سانتریفیوژ گردید. سپس ذرات سیلیکای روی کاغذ صافی به رسوبات که بسیار نرم بودند، اضافه گردید و رسوبات در بوته با درب بسته به آون منتقل شد و در دمای 50°C بمدت ۶۵ h ماند.

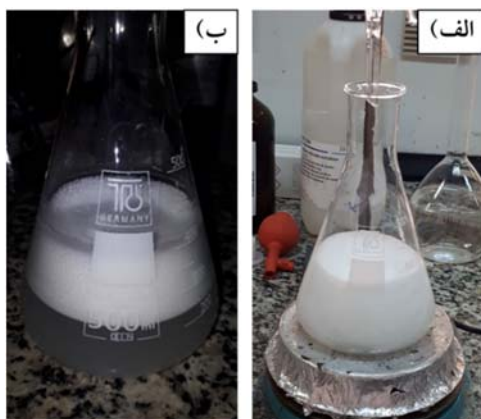
پودر خشک شده در هاون کوبیده شد تا ذرات بهم چسبیده از هم جدا شوند و سپس پودر دوباره در بوته قرار گرفت و با درب به کوره منتقل گردید تا کلسیناسیون در در دمای 600°C بمدت ۱۰ h اتفاق بیفتد و CTAB حذف گردد. در زمان ۴۰ دقیقه دمای کوره از ۲۵ درجه به ۶۰۰ درجه رسید و سپس ۱۰ ساعت در ۶۰۰ درجه ماند. جذب نوری پراکنش نانوذرات سنتز شده در اتانول با غلظت ۱ g/l با طیف‌سنج نوری Vis-UV اندازه‌گیری شد.

۳. نتایج و بحث

در سنتز نانو ذرات سیلیس بوسیله آب شیشه از واکنش آن با اسید کلریدریک بهره گرفته می‌شود. واکنش آزمایش مطابق با زیر است:



در این واکنش HCL محدودکننده است. همان‌طور که پیداست، در طی واکنش نمک تولید می‌گردد که با استفاده از سانتریفیوژ شسته می‌شود و از سیستم حذف می‌گردد. همان‌طور که از شکل ۳ (ب) پیداست، رسوب حاصل در مخلوط واکنش کاملاً پراکنده است و این به دلیل نانومتري بودن ذرات سیلیکای تشکیل شده می‌باشد.



شکل ۳: مخلوط واکنش (الف) در حین اضافه شدن آب شیشه (ب) پس از اضافه شدن کامل آب شیشه

دلیل این که ذرات کلوخه‌ای نشدند، استفاده از سرفکتانت می‌باشد. بدون سرفکتانت، جوانه‌های سیلیکا که در محلول تشکیل می‌شوند، به یکدیگر می‌پیوندند و توده‌های متراکم بوجود می‌آورند که خود باعث رشدهای چندگانه می‌شود، ولی مولکول‌های سرفکتانت با پوشش دادن سطوح جوانه، انرژی سطحی را کاهش می‌دهند. در نتیجه، واحدهای سازنده در حضور سرفکتانت، نانو ذراتی با سطوح پایدار شده با یک پوشش آلی هستند که مانع کلوخه‌ای شدن می‌شوند.



شکل ۴: پس از مراحل مختلف فرایند سانتریفیوژ بمدت (الف) ۴ دقیقه (ب) ۲۰ دقیقه (ج) ۳۲ دقیقه

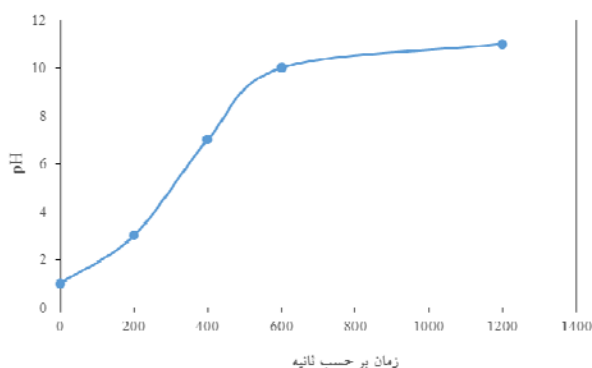
مطابق با شکل ۴، با افزایش زمان فرایند سانتریفیوژ ذرات معلق در مایع شفاف کاهش یافت. پس از اولین و دومین سانتریفیوژ ذرات سیلیکا هنوز در مایع شفاف بالای رسوب دیسپرس بودند که همین امر نشانه‌ی خوبی از نانومتري بودن ذرات می‌باشد (شکل ۴، الف و ب). به همین دلیل مایع بالای رسوب از کاغذ صافی گذرانده شد

تا ذرات سیلیکا کمتر اتلاف گردد. مطابق شکل ۵(الف)، رسوب حاصل بصورت یک ژل نرم ایجاد گردید. که پس از انجام خشک شدن در آون در دمای 50°C بمدت ۶۵ h رسوب خشک شکل ۵(ب) ایجاد گردید. در نهایت پودر نهایی پس از انجام کلسیناسیون در 600°C و کوبش با هاون بصورت پودر نرم بدست آمد (شکل ۶).



شکل ۵: رسوب واکنش الف) پس از سانتریفیوژ ب) پس از خروج از کوره
شکل ۶: پودر سیلیکای حاصل

با گذشت زمان و افزایش سدیم سیلیکات در مخلوط واکنش، اسید HCL با سدیم سیلیکات واکنش داده و نمک و سیلیس تشکیل می شود و به همین دلیل از میزان اسیدی بودن سیستم کم می شود. روند افزایش pH در شکل ۷ نشان داده شده است.



شکل ۷: سرعت تغییر pH پس از افزودن آب شیشه

جدول ۲: وزن پودر بدست آمده در طی مراحل سنتز

پس از کلسیناسیون در کوره ۱۰ h / ۶۰۰ °C	پس از خشک شدن در آون ۶۵ h / ۵۰ °C	پس از سانتریفیوژ	مراحل سنتز
۰/۸۷۸ گرم	۳/۵۷۸ گرم	۱۶/۲ گرم	وزن رسوب

جدول ۲ وزن پودر بدست آمده در طی مراحل سنتز را نشان می‌دهد. طبق محاسبات استوکیومتری، وزن

تئوری سیلیکای به دست آمده برابر با ۴/۵ گرم می‌باشد.

$$0.15 \text{ mol HCL} \times \frac{1 \text{ mol SiO}_2}{2 \text{ mol HCL}} \times \frac{60 \text{ g SiO}_2}{1 \text{ mol SiO}_2} = 4.5 \text{ g SiO}_2$$

بازده واکنش بصورت زیر محاسبه می‌گردد:

$$\frac{0.878}{4.5} \times 100 = 19.5\%$$

بازده کم را می‌توان با از دست دادن نانو ذرات در حین انجام فرآیند توجیه نمود.

شکل ۸ جذب نوری پراکنش نانو ذرات سنتز شده در اتانول با غلظت ۱ g/l با طیف سنج نوری-Vis

UV را نشان می‌دهد.

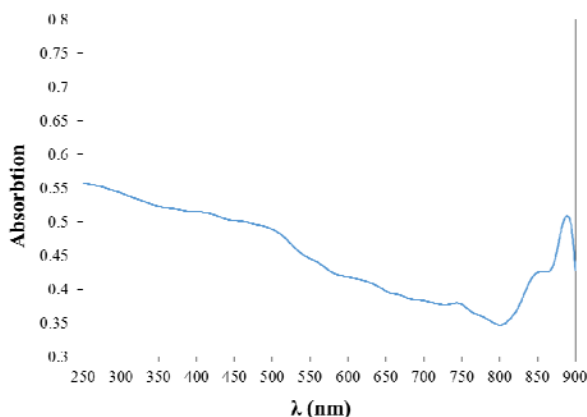
۴. نتیجه گیری

در این پژوهش نانوذرات سیلیکا با استفاده از مواد اولیه ارزان تر سنتز گردید. مواد اولیه هیدروکلریک

اسید و محلول سدیم سیلیکات و سرفکتانت مورد استفاده CTAB بود. با افزودن آب شیشه به مخلوط آب،

CTAB و HCL، رنگ محلول رفته رفته کدر گردید. با افزایش مدت زمان و مراحل سانتریفیوژ، ذرات معلق در

مایع شفاف بالای رسوب کاهش یافت. pH محلول با افزودن آب شیشه روند افزایشی داشت. به این دلیل که با گذشت زمان HCL مصرف شده و H^+ کاهش یافت.



شکل ۸: جذب نوری پراکنش نانو ذرات سنتز شده در اتانول با غلظت g/l با طیف سنج نوری Vis-UV

قدردانی

از همکاری آقایان مهندس امیر سهرابی کاشانی، مهندس مجتبی ملکی، مهندس عباس فیضی نیا، مهندس آرش کوکب پیک و مهندس فرزاد برهان آزاد برای همکاری در انجام بخش‌های آزمایشگاهی این پژوهش تقدیر به عمل می‌آید.

منابع

- 1) V.M. Kopylov, Silica fillers for silicone rubber, State Research Institute for the Chemistry and Technology of Hetero-Organic Compounds, Russian Federation State Scientific Centre, Moscow, 2010
- 2) Bharathibai J. Basu, Superhydrophobic oleophobic, PDMS-silica nanocomposite coating, CSIR-National Aerospace Laboratories, Surface Engineering, Division, Bangalore, India, 2013
- 3) Momen, Survey of Micro/Nano Filter Use to Improve Silicone Rubber For Outdoor Insulators, NSERC / Hydro-Quebec / UQAC Industrial Chair on Atmospheric Icing of Power Network

Equipment (CIGELE) and Canada research chair on engineering of power network atmospheric icing(INGIVRE), Chicoutimi, Canada,2010

- 4) ANSARIFAR, Reinforcement of Silicone Rubber with Precipitated,Amorphous White Silica Nanofiller—Effect of Silica Aggregates on the Rubber Properties, Institute of Polymer Technology and Materials Engineering, Loughborough University, Leicestershire, LE11 3TU, UK, Journal of Rubber Research, Volume 9(3), 2006

۵) مجموعه گزارش‌های صنعتی فناوری نانو گزارش شماره ۱۰۶، کاربرد فناوری نانو در رنگ‌ها و پوشش‌های

آبگریز، ۱۳۹۴

۶) مهدیه محمدی، سنتز نانو سیلیکا به روش رسوب‌گذاری با کاربرد عوامل فعال‌کننده‌ی سطحی، مجله‌ی مواد

نوین ، ۱۳۹۰

- 7) Mohammed H. Al-maamori, Production of Nano-Silica from Water Glass ,Department of Polymer and Composite Materials, College of Materials Engineering, Babylon University, IRAQ,2015.
- 8) Marzieh Shekarriz , Systematic Synthesis of High Surface Area Silica Nanoparticles in the Sol–Gel Condition by Using the Central Composite Design , (CCD) Method, Research Institute of Petroleum Industry (RIPI), Tehran, Iran
- 9) Sang-Wook Ui, Control of the size and morphology of nano-size silica particles using a sodium silicate solution, Divison of Materials Science and Engineering, Hanyang University,Seoul 133-791, Republic of Korea,2009
- 10)Jin Seok Choi, Synthesis of High Purity Nano-Silica Using Water Glass, Department of Advanced Materials Science and Engineering, Kumoh National Institute of Technology,2014
- 11) Maurice. ABOU RIDA ,Synthesis and Characterization of Amorphous Silica Nanoparticles from Aqueous Silicates Using Cationic Surfactant, Lebanese University, Faculty of Sciences II, Fanar, Lebanon, 2014



ششمین کنفرانس فناوری نانو در صنعت برق

۳۰ مهرماه تا آبان ماه ۱۳۹۷

استفاده از نانو سیلیکا در ساخت مقره بتن پلیمری بر پایه رزین پلی استر: بررسی خواص و معیارهای پذیرش

حسام فلاح آرانی^{*}، نازنین صادقی^۱، بهنام علم دوست^۱، حسین کوهانی^۱، نسترن ریاحی نوری^۱، اشکان ذوالریاستین^۱

۱- گروه پژوهشی مواد غیر فلزی، پژوهشگاه نیرو، تهران، ایران

*hfallah@nri.ac.ir

در بحث شبکه‌های قدرت و خطوط توزیع و انتقال، مقره‌ها یکی از اجزا مهم به شمار می‌روند. فراوانی چشمگیر کاربرد مقره‌ها در تولید، انتقال و توزیع انرژی الکتریکی نشان‌دهنده اهمیت این تجهیزات در شبکه برق است. این تجهیزات علیرغم قیمت کم‌شان نسبت به دیگر تجهیزات مانند ژنراتورها و ترانسفورماتورها، به دلیل نقش حساس و تعداد زیادشان همواره مورد توجه بوده‌اند. پیش‌تر، بطور عمده از مقره‌های پرسلانی که برای تولید، نیاز به کوره‌هایی با دمای بیش از ۱۳۰۰ درجه سانتی‌گراد دارند، استفاده می‌شد. بنابراین تولید این نوع از مقره‌ها با مصرف زیاد انرژی و همچنین آلودگی محیط زیست همراه بود. نوع دیگری از مقره‌ها که امروزه بسیار مورد توجه قرار گرفته، مقره بتن پلیمری است. بتن پلیمری در واقع کامپوزیتی است که هزینه تولید پایین داشته و بر خلاف شیشه و پرسلان، برای تولید به دمای بالا نیاز ندارد و در دمای اتاق نیز فرآیند می‌شود. در این ماده از نانوذرات سیلیکا به عنوان پرکننده و ایجاد تراکم حداکثری و نهایتاً استحکام بالا استفاده می‌شود. هدف از انجام این پروژه، مرور فن‌آوری ساخت مقره‌های بتن پلیمری ۲۰ کیلو ولت سوزنی در کشور است. سپس معیارهای پذیرش این مقره به کمک آزمون‌هایی نظیر اندازه‌گیری چگالی، جذب آب، استحکام خمشی، استحکام فشاری، استحکام ضربه، مقاومت ویژه حجمی، ولتاژ فرکانس قدرت و با توجه به استانداردهای ASTM D576، IEC 60383، ASTM D570، IEC 61952، ASTM D256، ASTM C579، ASTM D257 و IEC 60383 بیان می‌شود.

واژه‌های کلیدی — مقره، بتن پلیمری، خواص الکتریکی، رزین پلی استر، خواص مکانیکی، نانو سیلیکا

۱. مقدمه

بتن پلیمر یک ماده کامپوزیتی نسبتاً کم قیمت است که بر خلاف شیشه و پرسیلان که انرژی زیادی برای فرآیندشان نیاز دارند، در دمای اتاق می تواند پخت شود. کار اساسی بر روی مواد بتن پلیمری توسط موسسه EPRI (Electric power Research Institute) در اواسط دهه ۷۰ شروع شد، اما بتن پلیمر به تدریج پیشرفت کرد بطوریکه امروزه به عنوان یک انتخاب جدی بجای مواد عایق متداول مانند پرسیلان مطرح شده است [۱]. بیشتر صنایع اصلی در آمریکا شروع به استفاده از عایق های بتن پلیمری در ایستگاه های شان در تمام ولتاژها حتی ولتاژهای بالا مانند ۱۳۸kV نموده اند [۲]. همچنین چندین مرکز تحقیقاتی مشهور در تلاش و جستجو برای استفاده از عایق های بتن پلیمری بجای پرسیلان در کلیدها، فیوزها، مبدل ها، خازن ها و غیره می باشند [۳]. عایق بتن پلیمر اکنون به اروپا، آسیا و آمریکای لاتین معرفی شده است و امروزه برای طراحی مقره های بیرونی (Outdoor) و داخلی (Indoor) از ۲/۵ تا ۳۴۵ کیلوولت بکار می رود. همچنین این ماده برای تهیه پوشینگ ها، مقره های سوزنی، مقره های نوع پست ۱۵ تا ۳۴ کیلوولت، مقره های آویزی و برقیگیرها نیز استفاده می شود [۴]. منظور از بتن پلیمر، بتن سیمانی هیدرولیکی با آمیزه پلیمری داخل آن نیست بلکه منظور یک ماده کامپوزیتی است که پلیمر به عنوان چسب در آن بکار می رود. شاید تنها شباهتی که بتن پلیمر با بتن های متداول دارد این است که ماتریس پلیمری آن شامل سنگدانه های کوچک و بزرگ و پرکننده های نانوذره ای و میکروذره ای است که این مواد عمدتاً به منظور ایجاد بیشترین فشردگی و متعاقباً کارایی مناسب به ماتریس پلیمری اضافه می شوند. امروزه بتن پلیمر، به عنوان ماده ای غیرقابل نفوذ، مقاوم در برابر خوردگی و با قابلیت فرآیند شدن سریع و در دمای پایین، جایگاه خوبی در صنعت برق پیدا کرده و همچنین به عنوان جانشین بتن های متداول نیز، در کاربردهای دیگر از جمله در ساخت لوله ها استفاده می شود. رزین های متداول جهت ساخت مقره بتن پلیمری، وینیل استر و رزین های آکریلیک می باشد. این

مقره‌ها به طور متوسط طول عمری حدود ۴۰ ساله داشته و در شرایط محیطی گوناگون همچون آلودگی، مه، باران، رعد و برق و ... بسیار بهتر از مقره‌های پرسیلانی عمل می‌کنند. در این مقره‌ها شاهد کاهش ۱۵ الی ۲۰ درصدی جرقه‌زنی نسبت به نمونه مشابه پرسیلانی هستیم. همچنین از آنجایی که بتن پلیمری به طور ذاتی در برابر خوردگی مقاوم است، لذا این مقره‌ها نسبت به سیستم‌هایی با مقادیر زیاد قطعات فلزی، عملکرد بهتری دارند. در این تحقیق از بتن پلیمری برای ساخت مقره از نوع سوزنی استفاده شده است.

مقره‌های سوزنی که از جمله قدیمی‌ترین طرح‌های مقره هستند، مقره‌های یکپارچه‌ای بوده که از طریق میله‌ای که از داخل آن عبور می‌کند، بر روی سازه هوایی نصب می‌شوند [۵]. کاربرد این نوع مقره‌ها در پایه‌های میانی خطوط هوایی است. انواع مقره‌های مورد استفاده در خطوط هوایی (outdoor) از نوع شیشه‌ای، پرسیلانی و کامپوزیتی هستند. مقره کامپوزیتی مقره‌های کامپوزیت حداقل از دو ماده عایقی تشکیل می‌شوند، یکی برای تأمین خواص الکتریکی (روکش پلیمری مقره یا Housing) و دیگری برای تأمین خواص مکانیکی آن (هسته کامپوزیت). قرار گرفتن این دو قسمت در کنار هم مزیت‌هایی چون وزن سبک و مقاومت در برابر تخریب انسانی را برای این نوع مقره‌ها بخصوص در کاربردهای فشار قوی موجب شده است. همان‌طور که پیشتر گفته شد بتن پلیمر یک ماده کامپوزیتی با هزینه تولید تقریباً کم بوده که بر خلاف موادی از جنس شیشه و پرسیلان، برای فرآیند شدن به دمای بالا نیاز نداشته و در دمای اتاق نیز فرآیند می‌شود. این ماده همچنین به دلیل داشتن چقرمگی بالاتر نسبت به مقره‌های پرسیلانی، برای استفاده در محیط‌های زلزله‌خیز نیز مطلوب است. علاوه بر این، بتن پلیمری به دلیل چگالی پایین‌تر (در حدود دو gr/cm^3) در مقایسه با پرسیلان، منجر به تولید مقره‌ای با وزن کم‌تر

می‌گردد. مقره بتن پلیمری همچنین دارای خواص مکانیکی و دی‌الکتریکی مناسب‌تر نسبت به مقره‌های پرسلانی و شیشه‌ای می‌باشد. البته این مقره‌ها دارای خواص خودپالایندگی ضعیف‌تر نسبت به مقره پرسلانی می‌باشند [۶].

انواع مقره‌های بتن پلیمری و بازار مصرف آن‌ها

سه نوع از مهم‌ترین انواع مقره‌های بتن پلیمری به شرح زیر می‌باشند:

۱. نوع پست

۲. نوع سوزنی

۳. نوع آویزی

این سه نوع اصلی برای توزیع، انتقال و کاربردهای ایستگاه پست بکار می‌رود. مقره‌های پست اولین محصولات تولید شده از بتن پلیمر بودند. امروزه حتی بدون امکانات تولید حجیم، مقره ۶۹kV پلی‌سیلی با قیمت ۹۰-۱۰۰ دلار در مقایسه با ۱۶۰-۱۵۰ دلار برای این نوع مقره با جنس پرسلانی، تولید می‌شود. مقره‌های کوچک در محدوده ۳۵-۱۵ کیلوولتی نیز در دسترس هستند و در حد مقره‌های پرسلانی یا حتی بهتر از آنها عمل می‌کنند. در حالیکه این مقره‌ها صرفه‌جویی اقتصادی نیز دارند، با استفاده از تجهیزات تولید اتوماتیکی هزینه‌ها به مقدار بیشتری نیز کاهش پیدا خواهد کرد. بوشینگ‌ها، زمینه دیگری از مزایای بتن پلیمری را نمایان می‌کنند. میله قرار گرفته در مرکز بوشینگ باید دارای خطای کمی باشد درحالیکه با استفاده از پرسلان تخمین ابعاد مشکل است، اما فرآیند قالب‌گیری بتن پلیمری امکان خطاهای کم را فراهم می‌کند. میله موردنظر با مقره قالب‌گیری می‌گردد و مانند بتن پلیمر پخت می‌شود. در هنگام استفاده از این مواد عایقی، بتن پلیمری ضریب انبساط حرارتی نزدیک به فلز جاسازی شده در آن دارد و همراه با فلز منبسط و منقبض می‌شود. مقره‌های بتن پلیمری نوع پست و سوزنی بیشتر از سایر آنها در تمام دنیا مورد توجه و آزمایش قرار گرفته‌اند. مقره‌های نوع پست تهیه شده از بتن پلیمری

دارای فاصله خزشی بیشتر از مقره پرسلانی با همان ارتفاع هستند. خواص الکتریکی ولتاژ بالای این مقره‌ها در ولتاژ اسمی یکسان از مقره‌های پرسلانی بهتر است. بدلیل عدم استفاده از کلاهک‌های انتهایی در بتن پلیمر، این مقره‌ها سبک‌تر از مقره‌های پرسلانی هستند. علاوه بر اینکه این مقره‌ها خواص مکانیکی بهتری نسبت به پرسلان نشان می‌دهند، استحکام یک سر درگیر (Cantilever) آنها با استفاده از طراحی‌های دقیق می‌تواند از استحکام پرسلان بیشتر شود. بیشتر مقره‌های بتن پلیمری در سیستم‌های AC استفاده می‌شوند و فقط یک کاربرد از آنها در سیستم DC مشاهده شده است. ولتاژ مورد استفاده برای این محصولات از ۳ تا ۱۳۸ کیلو ولت است و برای کاربردهای ویژه تا حدود ۲۳۰ کیلو ولت و بیشتر نیز مورد استفاده قرار می‌گیرند [۷].

۲. روش تحقیق

مواد مورد مصرف: مواد معمول مورد استفاده در فرمولاسیون ساخت مقره‌های بتن پلیمری در جدول ۱ ذکر شده است. در ادامه آزمون‌های الکتریکی و مکانیکی مقره‌های بتن پلیمری مورد بررسی قرار گرفتند.

قالب‌گیری و ساخت مقره: ابتدا با توجه به ملاحظات میدانی و خواص مکانیکی و الکتریکی مد نظر و با در نظر گرفتن شرایط محیطی آلودگی سنگین، محاسبات لازم انجام گرفت و به تبع آن طرح‌های مقره سوزنی ۲۰ کیلوولت بتن پلیمری بر اساس استانداردهای IEC 71-1، IEC 71-2، IEC 60815 و ANSI C 29.8 آماده شد. بر اساس این طرح‌ها، نقشه‌های قالب مناسب تهیه شده و قالب‌هایی از جنس سیلیکون رابر ساخته شد، تصویری از این قالب در شکل ۱ به نمایش درآمده است [۸ و ۹ و ۱۰].

بطور کلی فرآیند تولید مقره‌های بتن پلیمری ساده بوده و تجهیزات مورد نیاز برای تولید این مقره شامل مخلوط‌کن، میزهای لرزنده، وسایل آزمایشگاهی معمول و قالب است. فرآیند تولید ناپیوسته این مقره شامل مراحل

زیر است: وزن کردن فیلرها و رزین بطور جداگانه، اختلاط فیلرها، افزودن مواد آلی به فیلرها و اختلاط دوباره، ریختن مخلوط داخل قالب و لرزش، پخت برای یک تا ۳ ساعت بسته به اندازه مفره و سرعت واکنش، خارج کردن قطعه از قالب و بررسی‌های کنترل کیفی. به منظور تولید ماده‌ای با حداکثر دانسیته و بدون حفرات هوا، در حین اختلاط فیلرها با رزین، از خلاء استفاده می‌شود تا یک ماده کاملاً هموزن و بدون حجم آزاد تولید شود. وجود حفرات در داخل مفره باعث تخلیه الکتریکی شده و این مسئله نهایتاً منجر به شکست الکتریکی می‌گردد. بطورعمومی زمان تخلیه قالب برای تولید مفره مطلوب، ۲ تا ۳ ساعت است. همچنین دمای مورد استفاده به منظور جلوگیری از تخریب قالب و ایجاد ترک در آن همواره کم‌تر از ۶۰ درجه سانتی‌گراد است.

جدول ۱: مشخصات مواد معمول مورد مصرف در ساخت مفره‌های بتن پلیمری

مواد	شرکت تولید کننده	درصد وزنی (%)
رزین پلی استر	صنایع شیمیایی بوشهر	۱۱-۲۵
متیل اتیل کتون پراکسید	شرکت شیمی تکس آریا	۰/۱ - ۰/۳
نفتانات کبالت	شرکت شیمی پوشش کالا	۰/۱ - ۰/۱۵
هیدروکینون	Merck	۰/۰۰۷۲ -
سیلیکا (مش ۲۰)	پاسارگاد سیلیس	۳۹/۳۸ - ۴۵/۷
سیلیکا (مش ۴۰)	پاسارگاد سیلیس	۱۱/۸۱ - ۱۴
سیلیکا (مش ۶۰)	پاسارگاد سیلیس	۶ - ۷/۰۴۵
سیلیکا (پودری)	پاسارگاد سیلیس	۹/۸۵ - ۲۲
هیدرات آلومینیوم	Merck	۹/۷۸ - ۱۱/۰۸
دی اکسید تیتانیم	Evonik Co. (Germany)	۱/۶ - ۱/۹۶
سیلان	International Laboratory Co. (USA)	۰/۱ - ۰/۷



شکل ۱: نمایی از قالب سیلیکونی



شکل ۲: مقره‌های سوزنی ۲۰ کیلوولت بتن پلیمری

آزمون‌های ارزیابی مشخصات الکتریکی و مکانیکی: به منظور تعیین کیفیت مقره‌های بتن پلیمری ساخته شده در پژوهشگاه نیرو آزمون‌های مختلف همچون چگالی، سیکل حرارتی، جذب آب، استحکام فشاری و مقاومت الکتریکی بر روی نمونه‌های تهیه شده، در محل آزمایشگاه‌های پژوهشگاه نیرو انجام شد. آزمون چگالی سنجی بر اساس استاندارد ASTM D567 بر روی مقره بتن پلیمری انجام می‌گیرد. در این آزمون نمونه‌های قرصی شکلی با ضخامت حدود ۵mm و قطر حدود ۵۰mm تهیه شده. سپس نمونه‌ها با ترازوی دیجیتالی دقیق تا دو رقم اعشار وزن شده و حجم آنها نیز محاسبه گردید. برای بدست آوردن چگالی، وزن بدست آمده بر حسب gr را بر حجم بر حسب cm^3 تقسیم شد. نتیجه، مقدار چگالی را برابر با $2/05 \text{ gr/cm}^3$ مشخص نمود [۱۱]. سپس

آزمون سیکل حرارتی نیز مطابق استاندارد IEC 60383 و در محدوده دمایی °C ۲۵ تا ۹۵ بر روی مقره انجام شد و نتیجه آزمون مثبت اعلام گردید [۱۲]. پس از آن مقره تحت آزمون جذب آب طبق استاندارد ASTM D570 قرار گرفت. نتایج آزمون مقدار جذب آب کمتر از ۰/۵ درصد را نشان داد. در کاربرد مقره در مناطق مرطوب و آلوده میزان جذب آب، مسئله حساسی بوده که باید با برآوردهای اقتصادی، میزان بهینه مصرف رزین را مشخص نمود. علاوه بر آن، آزمون استحکام خمشی و فشاری و ضربه‌ای به ترتیب بر اساس استانداردهای IEC 61952، ASTM D256 و ASTM C579 بر روی مقره مذکور صورت پذیرفت که نتایج بهینه و قابل قبول آن در جدول ۲ گزارش شده است [۱۳]. به منظور درک بهتر ویژگی های مقره بتن پلیمری، نتایج مربوط به مقره بتن پلیمری با ۱۷/۵٪ وزنی رزین پلی استر نیز در جدول ۲ آورده شده است. پس از آن آزمون‌های الکتریکی انجام شد. بدین منظور آزمون‌های مقاومت ویژه حجمی، فرکانس قدرت و پانچ بر نیز بر اساس استاندارد ASTM D257 و IEC 60383 بر روی مقره‌های بتن پلیمری انجام شد و نتایج قابل قبول آن در جدول ۲ گزارش شده است. مقره تولیدی باید کلیه آزمون‌های مذکور را با موفقیت پشت سر گذارد. لازم به ذکر است مقادیر قابل قبول ذکر شده در جدول ۲ لزوماً مقادیر مطلق نبوده و با انجام مطالعات و تحقیقات از منابع و کاتالوگ‌های مختلف بدست آمده است.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق فرمولاسیون ساخت مقره سوزنی ۲۰ کیلوولت بتن پلیمری براساس رزین پلی استر ارائه گردید. کلیه آزمون‌های الکتریکی و مکانیکی مقره معرفی شد. نتایج آزمون‌های مکانیکی نظیر استحکام خمشی، فشاری و ضربه به ترتیب برابر با ۳۳/۰۸، ۱۷۰ (MPa) و ۱/۸ (ft.lbf/in) گزارش گردید. همچنین آزمون‌های الکتریکی

مقاومت ویژه حجمی، ولتاژ ضربه صاعقه خشک و پانچ به ترتیب برابر با 2×10^6 ($\Omega\text{-cm}$)، ۱۶۱ و ۱۹۵ کیلو ولت گزارش شد.

جدول ۲: نتایج آزمون‌های الکتریکی و مکانیکی انجام شده بر روی مقره بتن پلیمری

آزمون	مقره بتن پلیمری با ۱۷/۵٪ وزنی رزین پلی استر	حداقل مقدار قابل قبول بر اساس استاندارد
مقاومت ویژه حجمی ($\Omega\text{-cm}$)	2×10^6	2×10^5
ولتاژ ضربه صاعقه خشک (KV)	۱۶۱/۰۲۸	۱۲۵
پانچ (KV)	> ۱۹۵	۱۲۰
استحکام خمشی (MPa)	۳۳/۰۸	۳۲/۰۱
استحکام فشاری (MPa)	۱۷۰	۱۵۱
استحکام ضربه‌ای (ft.lbf/in)	۱/۸	۰/۷۱

منابع

- [1] Gunasekaran M., Boneti H. J., October 20-30,(1996), Performance of Polymer Concrete Insulators in Latin America, IEEE Annual Report- Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomenon, San Francisco.
- [2] Muthion Gunasekaran, (1993), 'Polymer Concrete High Voltage insulation: A Versatile material for the 90,s and Beyond', Woodland Hills CA 91367.
- [3] Perry E. R, (1981), Polymer Concrete and The Electric Power Industry, Polymer in Concrete, SP 69-4.

- [4] Arun Pratap, (2002), 'Vinyl ester and acrylic Based polymer concrete for electrical applications', progress in Crystal growth and characterization of materials, 717-725.
- [5] J. Slocum, P.N. Kiproff, (1994), US Patent 5340512.
- [6] E.Robert perry, (1975), 'Polymer concrete and the Electric power Industry', Polymer in concrete
- [7] EPRI Journal, (1987), 'poly sil poised for the marketplace'
- [8] IEC 60815, (1986), 'Guide for the selection of insulators in respect of polluted conditions'.
- [9] IEC 71-1, (1976), Insulation Co-ordination Part1: terms, definition, principles and rules'.
- [10] ANSI-C 29.8, (2016), 'American national standard for wet-process porcelain insulators apparatus, cap and pin type'.
- [11] ASTM- D567, (2016) 'Standard test method for determining density of structural light weight concrete'.
- [12] IEC 60383, (2002), 'Tests on insulators of ceramic material or glass for overhead lines with a nominal voltage > 1000V'.
- [13] IEC 61952, (2002), 'Insulators for overhead lines-composite line post insulators for alternative current with a nominal voltage > 1000V'.



ششمین کنفرانس فناوری نانو در صنعت برق

۳۰ مهرماه تا آبان ماه ۱۳۹۷

تصفیه فاضلاب صنعتی به کمک فناوری نوین انرژی تجدیدپذیر

فاطمه نوربخش^۱

۱- پژوهشگاه نیرو، گروه مواد غیرفلزی

۲- باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، واحد کرج

fnourbakhsh@nri.ac.ir

در سال‌های اخیر محافل علمی و صنعتی توجه شایانی به فناوری پیل سوختی میکروبی به دلیل پتانسیل بالا در تصفیه فاضلاب های مختلف و تولید همزمان انرژی، داشته است. میزان توان خروجی پیل سوختی میکروبی به دلیل سرعت آهسته واکنش کاهش اکسیژن و فرآیند انتقال الکترونی به ترتیب در کاتد و آند با محدودیت‌های رو به رو است. در این تحقیق، کاتالیزورهای اکسید پروسکایتی لانتانیم برای اولین بار به عنوان کاتالیزورهای کاتدی در پیل سوختی میکروبی مورد استفاده قرار گرفته است. دانسیته توان پیل سوختی میکروبی در این شرایط دو برابر بیشتر از الکتروکاتالیزور پارچه کربنی و تنها ۵,۲۱ درصد کمتر نسبت به کاتالیزور پلاتین بوده است. نانوکامپوزیت اکسید نیکل / نانولوله کربنی / پلی آنیلین نیز به عنوان کاتالیزور آند ستز و مورد ارزیابی قرار گرفته است. پیل سوختی میکروبی مکعبی با استفاده از این کاتالیزورها ۶۱,۸۸ درصد دانسیته توان بیشتری نسبت به حالت بدون کاتالیزور، داشته است. این افزایش قابل ملاحظه توان ناشی از افزایش خاصیت الکتروکاتالیستی آند در فرآیند انتقال الکترونی بوده که به وسیله آنالیزهای الکتروشیمیایی مورد تایید قرار گرفته است.

واژه‌های کلیدی — پیل سوختی میکروبی دو مخزنی، نانولوله کربنی، اکسید نیکل، اکسید پروسکایت پایه لانتانیم، امپدانس

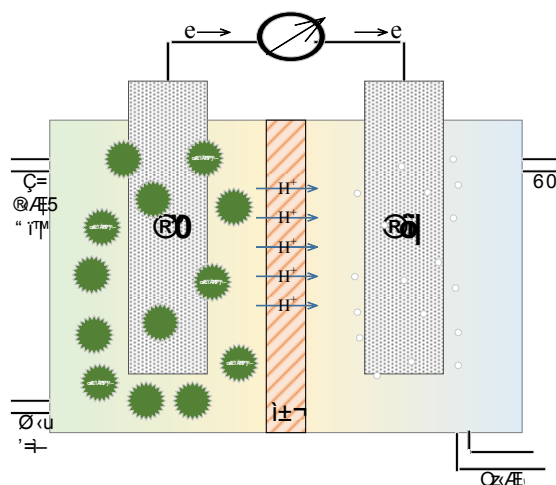
الکتروشیمیایی

۱. مقدمه

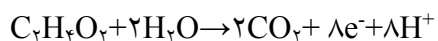
پیل سوختی میکروبی به دلیل کاربرد دوگانه در زمینه تصفیه و همچنین تولید انرژی پاک بسیار مورد توجه پژوهشگران دنیا به خصوص در دهه‌های اخیر بوده است. این فناوری را می‌توان از نظر تولید انرژی از فاضلاب، از دسته انرژی‌های تجدیدپذیر و از طرف دیگر از نظر تصفیه آلاینده‌های مختلف، در میان روش‌های حذف آلاینده‌های زیست محیطی به حساب آورد [۱]. میزان اندک تولید انرژی در این فناوری یکی از چالش‌های مهم پیش روی پژوهشگران به حساب می‌آید که امروزه تحقیقات گسترده‌ای در این زمینه در حال انجام است. البته همین میزان حداقل تولید انرژی پاک به همراه صرفه‌جویی در مصرف انرژی که در این فناوری انجام می‌پذیرد، توجه شایان دنیای امروز را که با چالش‌های بزرگ گرم شدن زمین ناشی از مصرف سوخت‌های فسیلی روبرو است، به همراه داشته است. از طرف دیگر توانایی حذف انواع متنوعی از آلاینده‌ها [۲]، سازگاری با شرایط دمایی محیط و حتی پایین‌تر، و تولید لجن فعال اندک در این روش تصفیه سبب گردیده است تا این فناوری به عنوان یک روش دوست‌دار محیط زیست جایگاه ارزشمندی داشته باشد. همچنین پیل سوختی میکروبی علاوه بر تولید الکتریسیته و تصفیه فاضلاب، کاربردهای متنوع و شگفت‌انگیز دیگری نیز دارد [۳، ۴].

اجزا تشکیل دهنده یک پیل سوختی میکروبی آند، کاتد و در صورت وجود غشا تبادل پروتونی است. در مخزن آندی میکروارگانیزم‌ها به صورت بی‌هوازی موجب اکسیداسیون ترکیبات سوخت می‌گردند که در اثر این فرآیند الکترون و پروتون و دی‌اکسید کربن تولید می‌گردد. الکترون تولید شده از طریق الکتروود آند به سمت مدار خارجی هدایت می‌گردد و پس از آن به الکتروود کاتد می‌رسد که در این بین الکترون‌های منتقل شده از طریق مدار خارجی منشا تولید نیروی الکتریسیته خواهند بود. از طرف دیگر پروتون تولید شده در فرآیند اکسیداسیون سوخت توسط میکروارگانیزم‌ها در مخزن آندی از طریق غشا تبادل پروتونی به سمت مخزن کاتدی

نفوذ می‌کند (جهت تعادل بار در سیستم). در مخزن کاتدی نیز پذیرنده الکترون (معمولا اکسیژن) به وسیله الکترون‌های منتقل شده از مدار و پروتون‌های نفوذی از طریق غشا کاهیده شده و تولید آب می‌نماید.

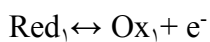


شکل ۱: نمای کلی از ساز و کار یک پیل سوختی میکروبی که از استات به عنوان رشدمایه در آن استفاده شده است.



نمای طرح واره یک پیل سوختی میکروبی به همراه نحوه کارکرد آن در شکل ۱ نمایش داده شده است.

به بیان دیگر می‌توان فرآیند تولید انرژی در پیل سوختی میکروبی را در یک واکنش کلی اکسایش-کاهش خلاصه نمود. در این واکنش اکسایش-کاهش، گونه شیمیایی کاهنده منبع کربنی (سوخت) است که توسط میکروارگانیسم‌ها اکسید شده و در حین این فرآیند الکترون تولید می‌نماید.



(۱)

بر طبق قانون بقای بار، الکترون‌های تولید شده باید توسط یک پذیرنده دریافت شوند. پذیرنده الکترونی

(Ox_2) الکترون‌های تولید شده از واکنش اکسیداسیون (۱) را دریافت کرده و خود کاهیده می‌گردد.



پس واکنش اکسایش-کاهش کلی شامل واکنش اکسایش سوخت و کاهش پذیرنده الکترون است.



مواد انتخاب شده برای الکترودهای پیل سوختی میکروبی به طور قابل توجهی در دانسیته توان و کارایی

کولومبی آن موثر است. موادی که به عنوان الکتروود قابلیت کاربرد در پیل سوختی میکروبی را دارند باید ویژگی

هایی نظیر مساحت سطح و میزان تخلخل بالا، عدم گرفتگی و مسمومیت، هدایت الکتریکی بالا، زیست

سازگارپذیری، پایداری، دوام، قیمت مناسب و در دسترس بودن را دارا باشند [۵]. به تازگی، اصلاح الکتروودی به

وسیله نانو ذرات در پیل‌های سوختی میکروبی به طور گسترده‌ای مورد توجه قرار گرفته است. نانو ذرات به سبب

افزایش مساحت سطح الکتروود تاثیر به سزایی بر کارایی پیل سوختی میکروبی دارند [۶، ۷].

یکی از مهمترین فاکتورهای محدود کننده دانسیته توان در پیل سوختی میکروبی سرعت کم واکنش

کاهش اکسیژن و محدودیت‌های سینتیکی آن است. از این روی در غالب موارد از کاتالیزور پلاتین در جهت

افزایش سرعت واکنش کاهش اکسیژن استفاده گردیده است. از آنجا که پلاتین فلز گرانبه‌ای است به خصوص

در مقیاس‌های صنعتی امکان استفاده از این کاتالیزور وجود ندارد و امروزه محققان به دنبال یافتن جایگزینی

مناسب برای آن هستند. خانواده اکسیدهای پروسکایتی بر پایه لانتانیم دسته‌ای از کاتالیزورها هستند که به عنوان

کاتالیست‌ای ارزان قیمت برای واکنش های اکسایش اکسیژن با توانایی انتقال سریع بار شناخته شده‌اند [۸]. به

همین دلیل در این تحقیق از این دسته از کاتالیزورها به عنوان کاتالیست کاتدی استفاده شده است. کاتالیزور

پروسکائیتی سنتز شده و پس از پوشش دهی کاتد پارچه کربنی با این کاتالیزور، خاصیت الکتروکاتالیستی آن در پیل سوختی میکروبی مکعبی مورد بررسی قرار گرفته است.

از طرف دیگر، سهولت در انتقال الکترون از زنجیره تنفسی میکروارگانسیم به الکتروکاتالیست از عوامل بسیار مهم در تولید دانسیته توان بیشتر در پیل سوختی میکروبی می باشد. از این روی یافتن کاتالیزوری برای آند که توانایی آن را در دریافت الکترون افزایش دهد و توانایی تحمل تجمع میکروبی آن را بالا ببرد، یکی از مباحث های چالش برانگیز در این زمینه است. در این میان روش های اصلاح آندی متفاوتی که تا به حال انجام پذیرفته است، استفاده از کاتالیزورهای نانوکامپوزیتی به خصوص نانوکامپوزیت های حاوی پلیمرهای هادی و نانولوله کربنی بسیار مورد توجه قرار گرفته است. در این تحقیق از کاتالیزور نانوکامپوزیتی استفاده شده که حاوی پلی آنیلین به عنوان پلیمر هادی به منظور ایجاد اتصال بهتر میکروارگانسیم با آند، نانولوله کربنی به جهت افزایش مساحت سطح و افزایش هدایت الکتریکی و اکسید نیکل به عنوان واسط الکترونی بوده است.

۱. روش تحقیق

پیل سوختی میکروبی: پیل به صورت تحقیقاتی و دومخزنی طراحی شده است. ابعاد این پیل 10×6 سانتی متر مربع و حجم کلی مخازن آندی و کاتدی 500 میلی لیتر و حجم قابل استفاده آن 400 میلی لیتر می باشد. در طراحی این پیل سعی شده است که اتصالات آن به نحوی باشد که برای استفاده مجدد و شستشوی آن نیازی به باز نمودن تمامی صفحات از یکدیگر نباشد، که این امر به طور قابل ملاحظه ای از نشتی آن در حین راه اندازی جلوگیری نموده است. همچنین برای جلوگیری از خوردگی سیم ها محافظی برای آنها تعبیه شده است. از آن جایی که این پیل به منظور مطالعه برای بهینه سازی الکترودها در نظر گرفته شده است، در این طراحی سعی بر

آن بوده است که اندازه الکترودها برای صرفه‌جویی در هزینه‌های پوشش‌دهی تا حد امکان کوچک در نظر گرفته شود. مساحت سطح الکترودها در این پیل ۳۲ سانتی‌متر مربع طراحی شده است. مساحت سطح غشا بکار رفته نیز ۶۰ سانتی‌متر مربع بوده است. همچنین به منظور استفاده از این پیل در سیستم نیمه‌پیوسته شیرهایی برای هر دو مخزن آندی و کاتدی تعبیه شده است که شیرهای مخزن کاتدی به منظور تزریق بافر و خروج آب و شیرهای آند به منظور تزریق محیط کشت و مواد مورد نیاز میکروارگانیسم، ورودی فاضلاب و خروجی قرار داده شده‌اند. در این سیستم در حالت بسته و نیمه پیوسته از فاضلاب شهری شرکت فاضلاب تهران به عنوان آنولیت استفاده شده که به وسیله یک پمپ پرستالتیک (E7401 QCM) با دبی ۱۰ میلی لیتر بر دقیقه مخزن ۲ به مخزن ۱ پمپ شده و از مخزن ۱ با همان دبی به مخزن آندی پیل وارد گردیده است. پس از آن مجدد از پیل به سیکل بازگردیده است.

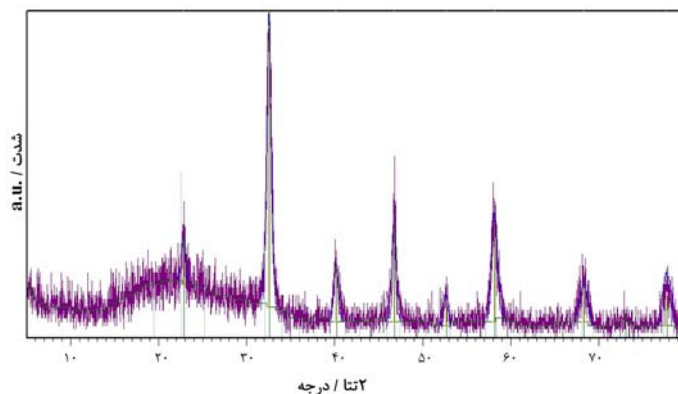
سنتز کاتالیزورها: برای سنتز این کاتالیزورها از روش سل ژل و از نمک‌های نترات لانتانیم شش آب و نترات منگنز چهار آب مطابق با نسبت استوکیومتری استفاده شده است [۹]. برای سنتز کاتالیزورهای نانوکامپوزیتی اکسید نیکل/نانولوله کربنی/پلی آنیلین (NCP) از دو فرآیند پلیمریزاسیون شیمیایی و رسوب‌گیری استفاده شده است. نانوکامپوزیت NPC با ترکیب ۲۰٪ از نانولوله کربنی، ۳۰٪ از پلی آنیلین و ۵۰٪ از اکسید نیکل تهیه شده است [۱۰].

تهیه الکتروود اصلاح شده: آند و کاتد از جنس پارچه کربنی در نظر گرفته شده است. میزان پوشش‌دهی سطح الکترودها، ۰٫۵ میلی گرم کاتالیزور به ازای هر سانتی‌متر مربع پارچه کربنی است. برای این کار مقدار لازم از پودر کاتالیزور سنتز شده با ۲۰ میکرولیتر محلول نفیون ۱ درصد وزنی (به عنوان پیوند دهنده) و ۵۳٫۱۸ میکرولیتر ایزوپروپانول خالص با هم مخلوط شده و به همراه ۶-۸ دانه شیشه‌ای به مدت یک دقیقه و برای چندین

بار متوالی در دستگاه (Velp RX³) ورتکس شده است. سپس مخلوط خمیری شکلی به دست آمده روی سطح الکتروود پارچه کربنی پوشش داده شده و به مدت یک شب در هوای آزاد خشک شده است.

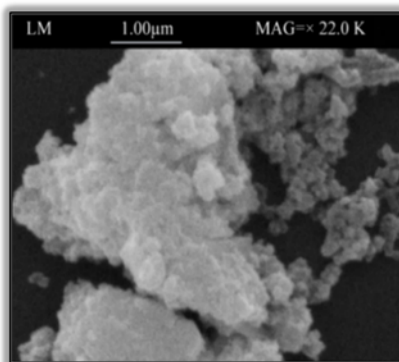
۲. یافته‌ها و تحلیل نتایج

تعیین خصوصیات ساختاری کاتالیزورهای سنتز شده: کاتالیزور LaMnO_3 تهیه گردیده و ساختار کریستالی آن به کمک آنالیز XRD بررسی شده است. به منظور سهولت در بحث، کاتالیزورهای تهیه شده با نام های آورده شده است. در طیف XRD (شکل ۲) چند پیک اصلی در ناحیه 2θ های ۲۲،۸۱۸، ۳۲،۴۷۳، ۴۰،۰۸۹، ۴۶،۷۲۱، ۵۸،۱۴۷، ۶۸،۲۸۸ و ۷۷،۶۵۱ درجه مشاهده شده است که نمایانگر ساختار مکعبی کاتالیزور پروسکایتی LM می باشد.



شکل ۲: طیف XRD کاتالیزگر LM

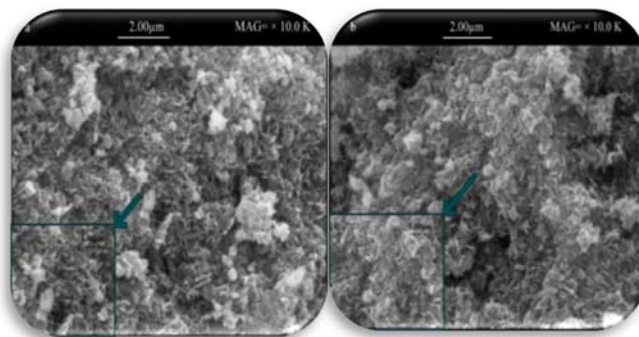
برای تعیین مورفولوژی نانوکاتالیزور پروسکایتی و همچنین تعیین تقریبی اندازه ذرات از میکروسکوپ الکترونی SEM کمک گرفته شده است. نتایج حاصل از این تصویربرداری نشان داده است که اندازه تقریبی ذرات متخلخل در حدود کمتر از ۱۰۰ نانومتر بوده است.



شکل ۳: تصویر اسکن میکروسکوپ الکترونی مربوط به LM

تصاویر نانوکامپوزیت تهیه شده به وسیله دستگاه اسکن میکروسکوپ الکترونی، شبکه نانوساختار میله

ای نوارهای کامپوزیت نانولوله کربنی/ پلی آنیلین را به خوبی نشان داده است (شکل ۴).



شکل ۴: تصاویر اسکن میکروسکوپ الکترونی مربوط به نانوکامپوزیت NCP

ساختار پلی آنیلین به تنهایی دارای نوارهای شاخه‌ای است که در این جا در ترکیب با نانولوله کربنی

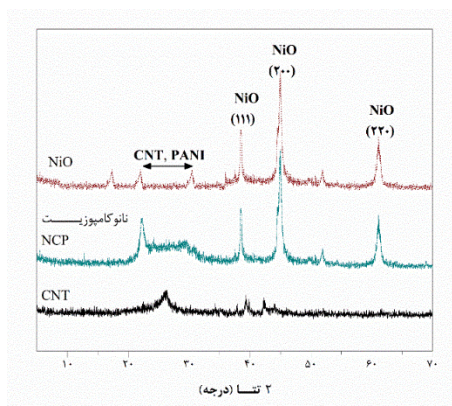
شبکه میله‌ای را تشکیل داده است که لایه خارجی شبکه میله‌ای مشاهده شده از پلی آنیلین و لایه داخلی به وسیله

نانولوله کربنی ساخته شده است [۱۱].

ساختار کریستالی کامپوزیت تهیه شده به وسیله سنجش XRD مورد بررسی قرار گرفته است. پیک‌های

مشاهده شده در 2θ های ۳۷,۲، ۴۳,۲ و ۶۲,۸ درجه به ترتیب بیانگر صفحات کریستالی (۱۱۱)، (۲۰۰) و (۲۲۰)

هستند که گواه وجود اکسید نیکل در ترکیب می‌باشد.



شکل ۵: طیف XRD کاتالیزور نانوکامپوزیتی NCP

اولین پیک پهن آشکار، در محدوده 2θ حدود ۲۲-۳۰ درجه عموماً متعلق به نانولوله کربنی و زنجیره

های پلی آنیلین پنخس شده می‌باشد. شدت سایر پیک‌ها نیز گواهی این مطلب است که پلی آنیلین نشسته بر سطح

تأثیری بر ساختار کریستالی اکسید نیکل نداشته است [۱۲، ۱۳]. طیف FTIR پودر نانوکامپوزیت NCP در شکل

۶ نشان داده شده است. پیک a در طول موج 835 cm^{-1} و پیک f در اطراف 1600 cm^{-1} متعلق به پیوند N-H و

ارتعاش کششی حلقه‌های کینوئیدی و بنزنوئیدی می‌باشد که از ساختار پلیمر هادی پلی آنیلین ناشی می‌شوند.

شدت پیک‌های ۱۵۰۰-۱۰۰۰ نشان دهنده تشکیل پیوندهای کووالانسی C-N مابین زنجیره‌های پلیمری و نانولوله

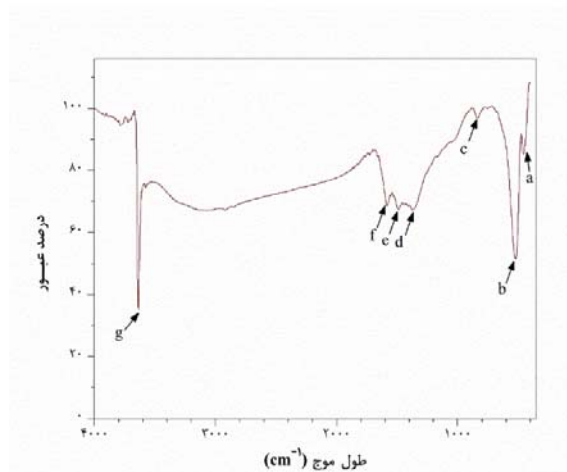
کربنی می‌باشد [۱۱]. پیک‌های d و e در اطراف 1380 cm^{-1} و 1430 cm^{-1} به خوبی گویای دگرگونی ساختاری

در نیکل و تشکیل نانوذرات اکسید نیکل هستند. پیک g در اطراف طول موج 3500 cm^{-1} نیز تبیین کننده وجود

NiO می‌باشد. همچنین قابل ذکر است که هیچ پیکی مربوط به وجود گروه‌های آمونیاک و یا کلراید در طیف

FTIR مورد نظر مشاهده نشده است که این مطلب گویای این حقیقت است که نانوکامپوزیت NCP فاقد کمترین

ناخالصی است [۱۴].

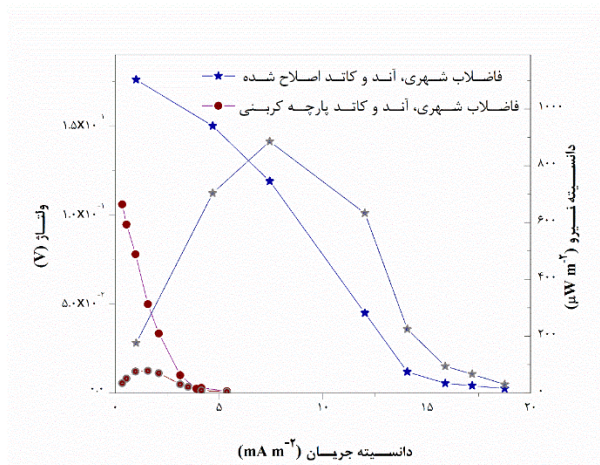


شکل ۶: طیف FTIR کاتالیزور نانوکامپوزیتی NCP

بررسی تاثیر الکترودهای بهینه شده بر جریان و توان به دست آمده از پیل سوختی میکروبی: منحنی

پلاریزاسیون و توان پیل سوختی میکروبی مکعبی یکبار با الکترودهای پارچه کربنی و بار دیگر با الکترودهای

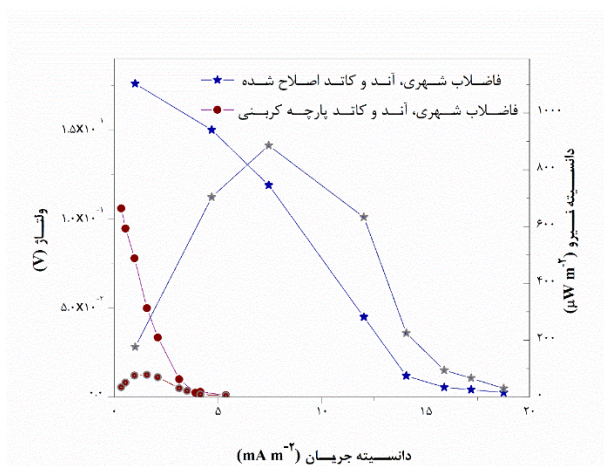
پارچه کربنی اصلاح شده با کاتالیزور نانوکامپوزیت NCP برای آند و کاتالیزور LM برای کاتد مورد ارزیابی قرار



گرفت که نتایج آن در

شکل ۷ قابل مشاهده است.

بیشینه دانسیته توان پیل در حضور الکترودهای بهینه شده حدود یازده برابر بیشتر از حالتی است که الکترودهای پارچه کربنی استفاده شده و مقاومت داخلی آن تقریباً سه برابر کمتر بوده است. این افزایش قابل توجه توان و جریان خروجی از پیل را می‌توان ناشی از تاثیر خاصیت الکتروکاتالیستی بی نظیر این کاتالیزورها بر فرآیند انتقال الکترونی و تسهیل واکنش کاهش اکسیژن دانست. فراهم آوردن محیط مناسب برای رشد و اتصال میکروارگانسیم‌ها به سطح الکتروود آند نیز خود عاملی برای افزایش تولید الکتتریسیته خواهد بود که مستقیماً منجر به افزایش تولید جریان خواهد گشت. در جدول ۱ مقادیر بیشینه ولتاژ، دانسیته توان و جریان آورده شده است.

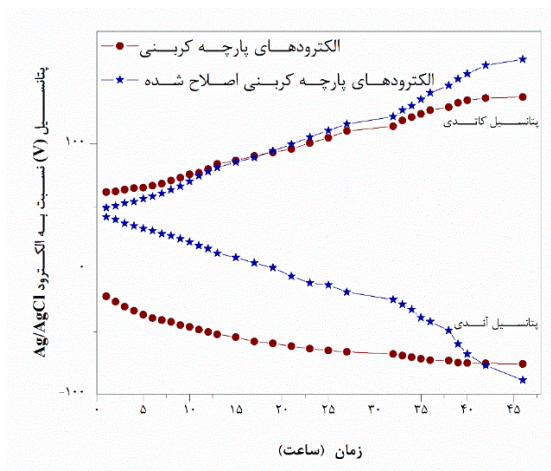


شکل ۷: نمودار پلاریزاسیون و توان پیل سوختی میکروبی مکعبی با فاضلاب شهری و الکترودهای پارچه کربنی و پارچه کربنی اصلاح شده

جدول ۱: اطلاعات به دست آمده از منحنی پلاریزاسیون و توان پیل سوختی میکروبی مکعبی با فاضلاب شهری و الکترودهای پارچه کربنی و پارچه کربنی اصلاح شده a: الکتروود پارچه کربنی پوشیده شده با کاتالیزور

C/CC ^a	CC	نمایه الکترودهای آندی و کاتدی
۸۸۵,۰۶	۷۸,۱۲	بیشینه دانسیته توان ($\mu\text{W/m}^2$)
۱۸,۷۵	۵,۳۷	بیشینه دانسیته جریان (mA/m^2)
۲۸۰,۰۷	۱۷۲,۰۵	بیشینه ولتاژ (mV)

به منظور مشخص نمودن تاثیر هر کاتالیزور بر کارایی پیل، پتانسیل هر الکتروود به طور جداگانه نیز مورد بررسی قرار گرفته است. بنابر شکل ۸ پتانسیل الکتروود آند اصلاح شده با نانوکامپوزیت NCP بسیار منفی تر از الکتروود آند پارچه کربنی بوده که در مورد کاتد تفاوت کمتری مشاهده شده است. به طور کلی نتایج این آنالیز نیز بیان کننده فعالیت الکتروکاتالیستی قابل ملاحظه الکتروود آند اصلاح شده با NCP و بهبود واکنش کاهش اکسیژن به کمک کاتالیزور LM بوده که در توافق با نتایج آنالیز ولتامتری چرخه‌ای نیز می‌باشد.



شکل ۸: پتانسیل الکتروودهای آند و کاتد نسبت به الکتروود مرجع $Ag/AgCl$ در حضور الکتروودهای پارچه کربنی و پارچه کربنی اصلاح شده

مقایسه عملکرد پیل سوختی میکروبی به صورت بسته و نیمه پیوسته: پیل سوختی میکروبی مکعبی با پساب شهری و الکتروودهای آند بهینه شده با کاتالیزور NCP و کاتد بهینه شده با LM به دو صورت بسته و نیمه پیوسته مورد مقایسه قرار گرفتند. در طول مدت دو هفته به کمک دستگاه دیتالاگر، ولتاژ پیل هر ده دقیقه ثبت گردید. متوسط و بیشینه ولتاژی که در هر حالت حاصل شد در جدول ۲ آورده شده است. متوسط ولتاژ در حالت بسته و نیمه پیوسته بسیار بهم نزدیک بوده است [۱۵].

جدول ۲: مقایسه عملکرد پیل سوختی میکروبی مکعبی با فاضلاب شهری در حالت بسته و نیمه پیوسته

سیستم پیل سوختی میکروبی مکعبی	بسته	نیمه پیوسته
متوسط ولتاژ (mV)	۲۸۰,۷	۲۷۰,۹
COD	۶۸	۵۳

COD نمونه فاضلاب شهری که از مرحله ثانویه تصفیه استخراج شده در حدود ۱۱۸ بوده است که پس از دو هفته در سیستم پیل سوختی میکروبی به صورت بسته تقریباً ۴۲ درصد و در حالت نیمه پیوسته ۵۵ درصد کاهش داشته است که گویای این واقعیت است که در حالت نیمه پیوسته نیروی کولومبی پیل افزایش بیشتری را نشان می‌دهد و حذف آلاینده‌ها در این شرایط بهتر صورت خواهد گرفت [۱۵].

۳. نتیجه‌گیری

از آنجا که یکی از کاربردهای مهم پیل سوختی میکروبی در تصفیه فاضلاب می‌باشد، کاتالیزورهای آندی و کاتدی تهیه شده در این شرایط مورد آزمون قرار گرفته‌اند. نتایج حاکی از آن بوده است که هر دو کاتالیزور سبب افزایش فعالیت الکتروشیمیایی پیل گردیده‌اند ولی تاثیر کاتالیزور آند تا حد قابل توجهی بیشتر بوده است. به گونه‌ای که استفاده از نانوکامپوزیت NCP در آند سبب افزایش دو برابری جریان تولیدی در پتانسیل ۰,۳- تا ۰,۳ گردیده است. به طور کلی میزان دانسیته جریان و توان در پیل سوختی میکروبی با فاضلاب شهری نسبت به فاضلاب سنتزی بسیار کمتر بوده که این امر ناشی از عدم استفاده از میکروارگانسیم خاص در این شرایط است. با این حال استفاده از کاتالیزورهای آندی و کاتدی سبب افزایش یازده برابری دانسیته توان و ۳,۵ درصدی بیشینه دانسیته جریان در پیل سوختی میکروبی گردیده است که گویای پتانسیل بالای این کاتالیزورها برای استفاده در صنعت می‌باشد. تفاوت کارایی پیل سوختی میکروبی در سیستم بسته و نیمه پیوسته نیز مورد بررسی قرار

گرفته است. بررسی سیستم نیمه پیوسته به منظور هرچه نزدیک‌تر شدن به کاربرد صنعتی پیل سوختی میکروبی صورت گرفته است. همانطور که انتظار می‌رفت میزان جریان و توان خروجی در سیستم نیمه پیوسته نزدیک به حالت بسته باقی مانده با این مزیت که کاهش COD در این شرایط ۱۳ درصد بیشتر بوده است.

منابع:

- [1] B.E. Logan, P. Aelterman, B. Hamelers, R. Rozendal, U. Schröer, J. Keller, S. Freguia, W. Verstraete and K. Rabaey, "Microbial fuel cells: methodology and technology", *Environ. Sci. Technol.*, Vol. 40, pp. 5181–5192, 2006.
- [2] ف. نوریخس، ف. ذوالفقارزاده، م. پازوکی و م.ج. رضایانی، "جایگاه فناوری پیل سوختی میکروبی در تصفیه انواع فاضلابهای صنعتی، خانگی و شهری"، *مجله شیمی و مهندسی شیمی*، ۱۳۹۷، در دست چاپ.
- [3] M.Z. Khan, A.S. Nizami, M. Rehan, O.K.M. Ouda, S. Sultana, I.M. Ismail and K. Shahzad, "Microbial electrolysis cells for hydrogen production and urban wastewater treatment: A case study of Saudi Arabia", *Applied Energy*, Vol. 185, pp. 410-420, 2017.
- [4] J. Liu, J. Liu, W. He, Y. Qu, N. Ren and Y. Feng, "Enhanced electricity generation for microbial fuel cell by using electrochemical oxidation to modify carbon cloth anode", *Journal of Power Sources*, Vol. 265, pp. 391–396, 2014.
- [5] J. Wei, P. Liang and X. Huang, "Recent progress in electrodes for microbial fuel cells", *Bioresour. Technol.*, Vol. 102, pp. 9335–9344, 2011.
- [6] F. Nourbakhsh, M. Mohsennia and M. Pazouki, "Nickel oxide/carbon nanotube/polyaniline nanocomposite as bifunctional anode catalyst for high-performance *Shewanella*-based dual-chamber microbial fuel cell", *Bioprocess and Biosystems Engineering*, Vol. 40, pp. 1669-1677, 2017.

- [7] F. Nourbakhsh, M. Pazouki and M. Mohsennia, "Impact of modified electrodes on boosting power density of microbial fuel cell for effective domestic wastewater treatment: A case study of Tehran", *Journal of Fuel Chemistry and Technology*, Vol. 45, pp. 871-879, 2017.
- [8] B.E. Logan. (2007) *Microbial Fuel Cell*. ed. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken.
- [9] G.R. Moradi, M. Rahmanzadeh and S. Sharifnia, "Kinetic investigation of CO₂ reforming of CH₄ over La–Ni based perovskite", *Chem. Eng. J.*, Vol. 162 pp. 787–791, 2010.
- [10] J. Huang, N. Zhu, T. Yang, T. Zhang, P. Wu and Z. Dang, "Nickel oxide and carbon nanotube composite(NiO/CNT) as anovel cathode non-precious metal catalyst in microbial fuel cells", *Biosens. Bioelectron.*, Vol. 72, pp. 332-339, 2015.
- [11] Y. Qiao, C.M. Li, S.-J. Bao and Q.-L. Bao, "Carbon nanotube/polyaniline composite as anode material for microbial fuel cells", *J. Power Source*, Vol. 170, pp. 79-84, 2007.
- [12] J.Y. Lee, K. Liang, K.H. An and Y.H. Lee, "Nickel oxide/carbon nanotubes nanocomposite for electrochemical capacitance", *Synth. Met.*, Vol. 150, pp. 153-157, 2005.
- [13] Y. Zou and Y. Wang, "NiO nanosheets grown on graphene nanosheets as superior anode materials for Li-ion batteries.", *Nanoscale*, Vol. 3, pp. 2615-2620, 2011.
- [14] A.S. Adekunle, j. Oyekunle, O.S. Oluwafemi, A.O. Joshua, W.O. Makinde, A.O. Ogunfowokan, M.A. Eleruja and E.E. Ebenso, "Comparative catalytic properties of Ni(OH)₂ and NiO nanoparticles Towards the Degradation of Nitrite (NO₂⁻) and Nitric Oxide (NO)", *Int. J. Electrochem. Sci.*, Vol. 9, pp. 3008-3021, 2014.
- [15] K. Ganesh and J.R. Jambeck, "Treatment of landfill leachate using microbial fuel cells: Alternative anodes and semi-continuous operation", *Bioresour.Technol.*, Vol. 139, pp. 383–387, 2013.

